



Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE MASTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA.

Título: Propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos. Un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán.

Autor: Ing. Ernesto L Barrera Cardoso.

Tutor: DrC. Osvaldo Romero Romero.

Consultante: Ing. Félix Orestes Hermidas García

Cienfuegos. 2007

"Año 49 de la Revolución"

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo realizar propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos a partir de los residuos biodegradables reportados en el territorio espirituano. En él se conciben las tecnologías de producción de biogás no sólo como la etapa de digestión sino como un conjunto de ellas que abarca el pretratamiento de los sustratos, la digestión anaerobia, la purificación del gas, la compresión–almacenamiento y la generación de energía en ese orden. Estas propuestas tecnológicas tienen la finalidad de aprovechar eficientemente los potenciales de residuos biodegradables para la producción de energía a partir de una fuente renovable como es la biomasa y contribuir de esta forma a la preservación del medio ambiente. Para dar cumplimiento a esto se utiliza un modelo combinado y de procedimientos que consiste en una estrategia para la transferencia tecnológica de un proceso químico, aplicándose el mismo a la producción de biogás con fines energéticos. Como resultado de esto se logra conformar tres grupos de sustratos integrados por un total de siete escenarios y una propuesta tecnológica para cada uno de los grupos conformados. También se logra adaptar una de las propuestas a un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán, demostrándose su factibilidad técnica, económica y ambiental. Como hallazgo del trabajo se realizan modificaciones necesarias a la estrategia utilizada brindándose un nuevo procedimiento específico para la transferencia tecnológica de un proceso de producción de biogás con fines energéticos.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. Marco teórico referencial.	
1.1 Historia de la producción de biogás.....	6
1.2 Tendencia actual de la producción de biogás.....	7
1.3 Tecnologías de producción de biogás en Cuba.....	9
1.4 Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás.....	12
1.5 Descripción y generalidades de las etapas tecnológicas de la producción de biogás con fines energéticos.....	13
1.5.1 Etapa de pretratamiento.....	13
1.5.2 Etapa de digestión anaerobia.....	15
1.5.2-1 Tipos de digestores para la producción de biogás.....	16
1.5.3 Etapa de purificación.....	22
1.5.4 Etapa de compresión-almacenamiento del biogás.	23
1.5.5 Etapa de generación de energía eléctrica.....	23
1.5.6 Etapa de empleo de los bioabonos.....	26
1.6 La asimilación y la transferencia de tecnología.....	27
1.6.1 Modelos de asimilación de tecnologías.....	28
CAPÍTULO II. Materiales y métodos.	
2.1 Descripción de las etapas de la estrategia de Ley, N., 2006 modificada por el autor.	31
2.2 Inicio del proceso	34
2.3 Vigilancia tecnológica.....	36
2.4 Selección de la tecnología apropiada y competitiva.	37
2.4.1 Selección de la etapa de pretratamiento para cada grupo de sustrato.....	39
2.4.2 Selección de la etapa de digestión para cada grupo de sustrato.....	41

2.4.3 Selección de la etapa de purificación para todos los grupos de sustratos.....	43
2.4.4 Selección de la etapa de compresión – almacenamiento para todos los grupos de sustratos.....	45
2.4.5 Selección de la etapa de generación de energía eléctrica para todos los grupos de sustratos.....	45
2.5 Estimado preliminar del costo de inversión.....	48
2.6 Elaboración de las propuestas tecnológicas.....	48
2.7 Proceso de adaptación.....	48
2.7.1 Determinación de los sustratos existentes y los principales consumidores energéticos de la granja.....	48
2.7.2 Selección de la propuesta tecnológica correspondiente.....	51
2.7.3 Elementos que hacen posible una mejor adaptación tecnológica.....	52
2.8 Desarrollo del proceso.....	52
2.8.1 Diagrama de flujo del esquema tecnológico.....	52
2.8.2 Diseño preliminar de la planta.....	53
2.8.3 Análisis preliminar del efecto ambiental.	60
2.8.4 Evaluación económica final y análisis de sensibilidad.....	61
2.8.4-1 Análisis de sensibilidad.....	63

CAPÍTULO III. Análisis de los resultados.

3.1 Desarrollo de la estrategia para la transferencia tecnológica de un proceso de producción de biogás con fines energéticos.....	65
3.2 Inicio del proceso.....	65
3.2.1 Selección de los sustratos.....	65
3.3 Vigilancia tecnológica.....	70
3.3.1 Aspectos seleccionados de la búsqueda de patentes.....	70
3.4 Selección de la tecnología apropiada y competitiva.....	71

3.4.1 Selección de la etapa de pretratamiento para cada grupo de sustrato.....	71
3.4.2 Selección de la etapa de digestión para cada grupo de sustrato.....	76
3.4.3 Selección de la etapa de purificación para todos los grupos de sustratos.....	81
3.4.4 Selección de la etapa de compresión- almacenamiento para todos los grupos de sustratos.	85
3.4.5 Selección de la etapa de generación de energía eléctrica para todos los grupos de sustratos.....	85
3.5 Estimado preliminar de los costos de inversión.....	87
3.6 Elaboración de las propuestas.....	88
3.7 Adaptación de las propuestas tecnológicas.....	88
3.7.1 Determinación de los sustratos existentes y los principales consumidores energéticos de la granja.....	89
3.7.2 Selección de la propuesta tecnológica correspondiente.....	90
3.7.3 Elementos que hacen posible una mejor adaptación tecnológica.....	90
3.8 Desarrollo del proceso.....	91
3.8.1 Diagrama de flujo del esquema tecnológico.....	91
3.8.2 Diseño preliminar de la planta.....	92
3.8.3 Análisis preliminar del efecto ambiental.....	97
3.8.4 Evaluación económica final y análisis de sensibilidad.....	100
3.8.4-1 Análisis de sensibilidad.....	101
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La situación actual del panorama energético es muy controvertida. El consumo aumenta y es previsible que siga aumentando. Las fuentes de que se dispone son múltiples pero solo unas pocas tienen una importante aportación al abastecimiento, justamente aquellas que por sus previsibles efectos futuros o experiencias del pasado, han ocasionado un importante rechazo popular. Estamos frente a un dilema energético: se necesita más energía pero no se aceptan las fuentes que permiten su abastecimiento, hasta tal punto que la energía, base del desarrollo, es considerada, hoy, como un “diablo necesario”.

Los hidrocarburos son una de las grandes bases energéticas de la sociedad, pero son de tipo no renovables, que una vez agotadas las reservas en el mundo no podrán ser repuestas.

El incremento de la población en el mundo, la demanda de energía y la contaminación ambiental crecen de forma acelerada, sin embargo la producción de energía no se incrementa de la misma manera.

La crisis energética de la década de los 70 introdujo una nueva línea de pensamiento en materia de energía y sus formas tradicionales han dado paso a la búsqueda de energías renovables como sustitutos del petróleo, sus derivados y demás combustibles fósiles, los cuales tienden a agotarse en un futuro cercano y a su vez producen gases de efecto invernadero durante su transformación.

Las formas de energía renovable son muchas en la naturaleza e incluyen la energía solar, la eólica, energía marítima, geotérmica, energía de la biomasa, etc.

Los recursos energéticos renovables no producen el efecto de los fósiles, solamente la biomasa produce CO₂ en su uso, sin embargo a juicio de los expertos, la cantidad emitida puede ser balanceada con la fijación de esta sustancia durante el proceso de fotosíntesis, por ello si es usada adecuadamente y de forma sustentable, el balance neto es cero.

Una de las maneras de convertir esta biomasa en energía ha sido mediante la degradación anaerobia para la obtención de biogás o gas de los pantanos como

también se le conoce. Este recurso se ha utilizado desde las penurias de la segunda guerra mundial, en sus inicios, su uso como fuente de energía estuvo dirigida hacia la cocción de alimentos y la iluminación. En la actualidad, este gas ha representado una alternativa para la generación de energía eléctrica lográndose reducciones hasta del 40% en los costos del Kwh comparado con la generación a partir de combustibles convencionales (CIPAV., 1997).

En Cuba más del 80 % de la generación eléctrica se realiza a partir de combustibles fósiles (fuel oil, crudo nacional y diesel), por lo que reviste especial importancia la participación de otras fuentes energéticas que contribuyan a su sustitución. (Meneses, E., 1998).

Una de las principales fuentes de energía renovable existente en el país es precisamente la biomasa, (176 000 tep/a) (Red solar, 2004; Turrini, E., 2006.) ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. La biodegradación de esta biomasa para la producción de biogás podría aportar beneficios no sólo energéticos, sino también ambientales contribuyendo al mejoramiento del entorno rural, urbano e industrial y a la recuperación de los suelos. (Doria, A., 2001)

El sistema electroenergético nacional ha sufrido cambios en los últimos años, llevando a cabo una política de descentralización basada en la instalación de grupos electrógenos que utilizan diésel y fuel oil para su funcionamiento. Sin embargo existen reportes en la literatura que afirman que el uso del biogás podría sustituir a estos combustibles fósiles en un 80 % o más. (CIPAV., 1997).

En Sancti Spíritus se estima que a partir de los residuos biodegradables se pueden generar más de 80 millones de m³ de biogás /a. Por tal motivo podría resultar ventajoso el aprovechamiento del biogás producido de la degradación anaerobia de los mismos para generar energía eléctrica, sin dejar de un lado el resto de sus potencialidades, como son el tratamiento de residuales, la producción de bioabonos y la generación de energía térmica.

La problemática radica en cómo producir biogás, es decir qué etapas tecnológicas emplear para obtener energía eléctrica a partir de estos residuos. Muchos de los

autores de los países subdesarrollados cuando mencionan las tecnologías para producir biogás lo hacen refiriéndose solamente a la etapa de digestión y fundamentalmente a digestores de pequeña y mediana escala. Sin embargo, resulta importante concebirlas como un conjunto de etapas que incluyan además de la digestión el pretratamiento de los sustratos, la purificación del gas, su almacenamiento y la generación de energía pues existen ejemplos en Cuba en los que no se han tenido en cuenta y otros en los que la selección ha sido errónea.

Entre ellas podemos mencionar la planta del CAI "Heriberto Duquesne" en Villa Clara, concebida para producir biogás para uso industrial y para la cocción de alimentos utilizando vinazas como sustratos pero debido a errores en la selección de la tecnología en la etapa de purificación aún no es posible el aprovechamiento de las potencialidades energéticas del gas.

En Ciego de Ávila se ha construido otra planta con tecnología Biogás Nord, donde se está importando un paquete tecnológico que no tiene en cuenta las necesidades y los recursos de que dispone nuestro país pues utiliza para la recolección del gas bolsas de polietileno que deben ser importadas y que pueden ser poco resistentes a climas tropicales obviando otras variantes de la etapa de digestión como la utilizada en la planta del CAI Antonio Guiteras en Las Tunas, aplicada a residuos similares que ya han rebasado el proceso de adaptación. Además, no han sido concebidas en este diseño ni la purificación, ni el aprovechamiento energético del gas por lo que este último está siendo enviado a la atmósfera en la actualidad.

Estos problemas o puntos débiles de la producción de biogás en Cuba hacen necesario el análisis del proceso de producción de biogás como un conjunto de etapas tecnológicas que deben ser seleccionadas cuidadosamente para lograr el máximo aprovechamiento energético del gas teniendo en cuenta las tendencias tecnológicas más recientes en función de las posibilidades de adquisición del país y del tipo de sustrato a tratar.

Todo lo antes planteado, nos conduce a reconocer como **problema** de esta investigación, el siguiente:

Problema científico.

La falta de un estudio sobre las tendencias tecnológicas existentes a nivel mundial para producir biogás con fines energéticos y de los tipos de residuos orgánicos existentes en territorio espiritano limita realizar propuestas tecnológicas para el aprovechamiento de los mismos como fuente de energía.

Objetivo general.

Realizar propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos a partir de los residuos orgánicos reportados en el territorio espiritano.

Objetivos específicos.

- Identificar las etapas de un proceso de producción de biogás con fines energéticos.
- Seleccionar los residuos biodegradables del territorio que mayores volúmenes de biogás pudieran generar.
- Elaborar las propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos para cada tipo de residuo.
- Adaptar las propuestas al escenario de la granja Remberto Abad Alemán.

En correspondencia con los aspectos señalados anteriormente y de la revisión de la literatura especializada y otras fuentes, se planteó la **hipótesis** siguiente:

Hipótesis de la investigación:

De realizarse un estudio sobre las tendencias tecnológicas existentes a nivel mundial para producir biogás con fines energéticos y de los tipos de residuos orgánicos existentes en el territorio espiritano entonces se podrán realizar propuestas tecnológicas para el aprovechamiento de los mismos como fuente de energía.

Como **objeto** de investigación: Tecnologías de producción de biogás con fines energéticos en función de los tipos de residuos. Lo que define que nuestro **campo de**

acción sea el proceso de asimilación de tecnologías de plantas químicas aplicada a la producción de biogás.

La tesis consta de introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos. El capítulo 1: aborda la fundamentación teórica y científica del problema de la investigación. El capítulo 2: describe los procedimientos utilizados para la realización de la investigación y en el capítulo 3: se conforman las propuestas tecnológicas para la producción de biogás con fines energéticos y su adaptación al estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán.

Las conclusiones del trabajo generalizan los resultados parciales y las recomendaciones indican el camino a seguir en lo adelante para dar seguimiento a la investigación. El listado de bibliografía consultada y los anexos completan el cuerpo de la tesis.

En relación con lo anterior puede resumirse el *aporte teórico* de la presente tesis, de la siguiente manera:

- Los antecedentes bibliográficos referidos a la temática muestran que en el país las tecnologías de producción de biogás refieren solamente la etapa de digestión y no existen propuestas tecnológicas que den respuesta a los diferentes tipos de residuos existentes en el territorio espirituano.
- Se brindan propuestas tecnológicas que incluyen etapas de pretratamiento, digestión, purificación, almacenamiento y generación de energía eléctrica seleccionadas para cada tipo de residuos orgánico del territorio espirituano.

Es de **significación práctica** que el trabajo brinda las posibilidades de aplicar las propuestas a diversos escenarios del territorio constituyendo una alternativa energética y de tratamiento de residuales, además se propone la aplicación de una de ellas al escenario de la granja Remberto Abad Alemán como una solución económica, energética y ambiental.

CAPÍTULO I. Marco teórico referencial.

1.1 Historia de la producción de biogás.

En la incesante búsqueda de alternativas energéticas renovables que garanticen la sostenibilidad del entorno se cuenta con una fuente de energía utilizada durante y después de la última guerra mundial. Se trata del biogás, producido por la fermentación anaerobia del estiércol de animales, los residuos agrícolas y los residuos biodegradables en general. Este gas es una mezcla de gases que contiene metano, anhídrido carbónico, hidrógeno, oxígeno, gases diversos y vestigios de anhídrido sulfuroso. Durante el proceso de producción del mismo se genera también un lodo residual utilizado como fertilizante orgánico de mayor calidad y contenido de nitrógeno que el estiércol fresco.

Los orígenes de la producción de biogás, según un breve recuento que hace (Hernández, A., 1990) en el segundo Forum Nacional de Energía, Se remontan al siglo XVII, exactamente en 1667 que fue cuando se identificó el gas metano (CH_4) por SHILEY, llamándosele “Gas de los pantanos”.

En 1806, en Inglaterra, HUMPHREY DAUY, identificó un combustible gaseoso, rico en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), como resultado de fermentación de desechos animales en un ambiente húmedo. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás.

Durante la II Guerra Mundial en Francia y Alemania se construyeron grandes fábricas productoras de biogás que se emplearon en abastecer de energía gaseosa a tractores y vehículos.

En 1941 los franceses Ducellier e Isman desarrollaron las primeras plantas denominadas “Constrúyala usted mismo”, que consistían en digestores de Bach o lotes para campesinos. Casi todas estas fábricas de biogás cesaron de funcionar en el decenio de 1950 – 1959 al desarrollarse el uso de los combustibles fósiles, por la comodidad, simplicidad y bajos costos que significaban. (Montalvo, S., 2003)

Durante 1950 en Asia y particularmente en la India se conocía el uso de procesos fermentativos para producir el biogás y tratar ecológicamente los residuales orgánicos de forma artesanal, allí se desarrollaron modelos simples de cámaras de fermentación,

más conocidos como biodigestores, para la producción de energía, bioabonos insuperables y saneamiento ambiental necesarios en los hogares. (Turzo, E., 1984)

China es el país que ha llevado a la práctica el uso del biogás en mayor escala. Existen allí más de 6.7 millones de digestores rurales en funcionamiento. Estos proveen gas para cubrir necesidades de cocción e iluminación, a la vez que van recuperando suelos degradados a través de los siglos. (Lugones, B., 2003)

En América Latina, Guatemala (1954) fue el primer país en iniciar el desarrollo de la tecnología del biogás utilizando muy bajos volúmenes de agua y desechos vegetales y/o animales. Posteriormente, México desarrolla también una tecnología de digestión apropiada en este campo, construyendo plantas de biogás para uso doméstico de muy bajo costo y de fácil difusión.

En el año 2001, CIPRES (Centro para la Investigación, la promoción y el Desarrollo Rural y Social) comenzó a implementar nuevas tecnologías de digestión aplicadas como una alternativa al deterioro de las condiciones socioeconómicas, ambientales y en general de desarrollo humano en el sector rural de Nicaragua. Donde se construyeron 50 biodigestores para uso doméstico y agrícola en comunidades rurales. El objetivo fundamental era lograr que en todos los hogares campesinos se disminuyera la utilización de la leña para cocinar. (León, S., 2003).

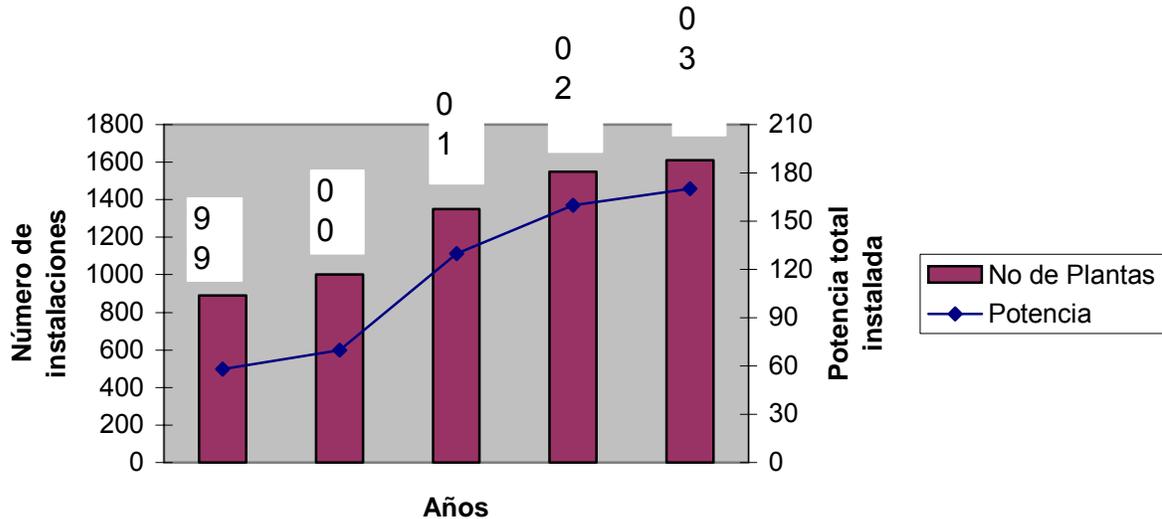
Existen otros ejemplos del aprovechamiento del biogás como fuente de energía pero con estos elementos se puede afirmar que desde sus orígenes la producción de biogás ha estado destinada al uso de este como combustible en la cocción de alimentos, la iluminación, el accionamiento de vehículos con los motores de combustión interna, el saneamiento ambiental y la producción de bioabonos.

1.2 Tendencia actual de la producción de biogás.

En el libro “**Producción y uso de biogás**” del Ministerio Federal Alemán para la Protección del Consumidor, la Alimentación y la Agricultura, 2004, se da información sobre el incremento de las instalaciones que generan energía eléctrica a partir de biogás. En Alemania de 850 plantas que existían en 1999 se incrementaron a 1 600 en el 2003, con una potencia eléctrica total instalada que pasó de 60 a 180 MW en igual

periodo (gráfico 1.1) lo que evidencia que la construcción de estas plantas a tenido como fin la producción de electricidad. (Mähner P., Linke, B., 2006)

Gráfico 1.1 Desarrollo del número de instalaciones de biogás y la potencia total instalada en Alemania desde 1999 - 2003.



En Madrid, se puso en marcha en 2003 una planta en la localidad de Pinto donde se tratan residuos y se exportan 117.000 MWh /año de electricidad a la red eléctrica que llega a unos 40 000 hogares.

También en América Latina se han realizado esfuerzos aislados, y de esta forma en Colombia, durante el primer semestre de 1997, CIPAV dio inicio a un proyecto para la utilización del biogás como reemplazo del combustible diesel en motores de combustión interna para la generación eléctrica.

Por lo que se puede plantear que la generación de energía eléctrica es otra de las alternativas de diversificación de las producciones de una planta de biogás lo que puede constituir una oportunidad para Cuba, si se tienen en cuenta las transformaciones del sistema electroenergético nacional que basa ahora la generación en la utilización de grupos electrógenos (Motores de combustión interna) que consumen diésel y fuel oil como combustible y para los cual se reportan trabajos como CIPAV, 1997, que asegura que el biogás puede sustituir a estos hasta en un 80 %.

1.3 Tecnologías de producción de biogás en Cuba.

Resulta peculiar en Cuba que cuando los autores se refieran a las tecnologías para la producción de biogás se aborde solamente la etapa de digestión anaerobia como por ejemplo [Barreto, S., 2006](#), quien propone en su tesis doctoral una metodología para la selección de alternativas óptimas y evaluación de plantas de biogás, cuyo aporte principal es la inserción industrial de estos procesos en el desarrollo regional pero cuando aborda la selección de tecnologías se dan criterios cualitativos para cada tipo de digestor como la carga orgánica que pueden asimilar, el % de sólidos, los tiempos de retención de líquidos y sólidos, las eficiencias de remoción de materia orgánica, sin embargo solo se menciona muy brevemente las etapas de pretratamiento como una vía para solucionar las incompatibilidades del sustrato con la tecnología y no se exponen ejemplos sobre como varía el tipo de digestor con el tipo de sustrato empleado. Además una de las principales limitaciones para el uso del biogás en la generación de energía eléctrica es el sulfuro de hidrógeno presente y esta autora no aborda los diferentes métodos existentes para esto, así como la importancia del almacenamiento del gas en determinadas circunstancias.

De igual forma, [Savran, V., 2005](#), en su tesis de maestría aborda las tecnologías para producir biogás refiriendo solamente los biodigestores de pequeña escala chino, hindú y tubulares con bolsas de polietileno, haciendo solamente alusión a su uso en la cocción de alimentos mediante ejemplos prácticos en el territorio espirituario.

Lamentablemente la tendencia en los países subdesarrollados ha estado dirigida hacia la producción a pequeña escala también, [López, A., et al, 1999](#) plantea como criterio de selección que en zonas rurales los biodigestores más utilizados son los de régimen semi – continuos, que de acuerdo a su principio de funcionamiento y construcción pueden ser: de tipo hindú, de tipo chino, tubular, y otras variantes con diferentes tipos de materiales de construcción pero todos a pequeña escala.

[León, A., 2006](#), propone aspectos a considerar para el diseño de plantas de biogás refiriéndose únicamente a la etapa de digestión y tiene en cuenta definir el objetivo de la planta, las restricciones ambientales y socioeconómicas, la caracterización del residual y sus volúmenes, así como PH, DQO, sustancias inhibidoras, nutrientes y temperatura. Este autor considera necesario tomar en cuenta además, los parámetros técnicos de cada uno de los digestores más difundidos en Cuba y el mundo. Sin embargo, tampoco

en este trabajo se analiza la importancia de otras etapas tecnológicas como el pretratamiento, la purificación y la generación de energía eléctrica como un todo necesario para la producción de biogás.

Zamora, E., 2001, propone una metodología para el diseño de plantas de biogás pero en ella no se especifica el tipo de planta aunque si se exponen factores a tener en cuenta para un buen funcionamiento de una planta de biogás, también refiriéndose únicamente a la etapa de digestión.

Montalvo, S., 2003 aborda con profundidad varias etapas tecnológicas en el libro “Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás”, sin embargo se obvian las etapas de pretratamiento y no se realizan propuestas concretas sobre cuáles de la alternativas son las más idóneas para el país.

La **National Academy of Sciences, 2005** reporta que un proceso de producción de biogás debe incluir múltiples etapas tecnológicas como son el pretratamiento de los residuos orgánicos, digestión anaerobia, purificación, uso del gas y disposición final del efluente y los lodos según el diagrama de flujo de la **figura 1, anexo 1**.

Sin embargo, este diagrama no muestra una etapa para la compresión y almacenamiento del biogás lo que está muy a tono con los países desarrollados donde los que consumen el gas lo hacen de manera continua en generadores eléctricos fundamentalmente, pero cuando al sistema se conectan consumidores del tipo discontinuos (comedores), consumidores que trabajan a diferentes presiones o cuando se trabaja con digestores que no logran mantener la presión constante en su interior, se hace imprescindible su uso como vía para mejorar la eficiencia y estabilidad en estos consumidores. Además el almacenamiento presurizado del biogás brinda la posibilidad de utilizarlo para lograr una correcta agitación en el interior de los digestores.

(Hermidas, F., 2006)

En Cuba ya se observan algunos trabajos que incluyen varias de estas etapas, tal es el caso del ICIDCA, que ha desarrollado una tecnología basada en reactores del tipo UASB, de origen holandés, única de su tipo en el país y de 3.000 m³ de capacidad. La misma ha sido destinada al tratamiento de las aguas residuales de la Empresa Mielera Heriberto Duquesne, en Remedios, Villa Clara. **(Obaya, C., 2004)**. Esta planta tiene en cuenta en su diseño el pretratamiento de los sustratos, la digestión anaerobia, la

purificación el uso final del biogás y empleo de los bioabonos, pero dificultades en la etapa de purificación han obstaculizado el aprovechamiento del gas en un generador de vapor, lo que atenta contra el entorno por la quema directa del combustible al medio ambiente, contra la recuperación de la inversión y contra el rendimiento energético de la planta. Esto demuestra la importancia de una adecuada selección de las etapas tecnológicas previo al diseño y construcción de una planta de este tipo.

Por otra parte, BIOGAS NORD ha proyectado una planta demostrativa que está en fase constructiva ubicada en la Empresa Azucarera Enrique Varona González, Chambas, Ciego de Ávila, Cuba, específicamente en la destilería Nauyú. Esta planta estará destinada al tratamiento de cachaza y vinazas (Levys, A., 2006). En la actualidad el biogás producido está siendo enviado a la atmósfera a pesar de que el paquete tecnológico incluye también, las etapas de pretratamiento de los sustratos, la digestión anaerobia, la purificación del biogás el uso directo para la generación de energía eléctrica y térmica, además del almacenamiento del residual tratado (bioabonos) para su uso como fertilizante (Figura 2, Anexo 1). Sin embargo, existen tecnologías probadas en el país, construidas con materiales autóctonos, funcionando con resultados satisfactorios y destinados a tratar de igual forma cachaza y vinazas como por ejemplo la planta de biogás del central Antonio Guiteras, ubicada en Las Tunas, que opera desde los años 90, con eficiencias de producción de biogás comparables con los de Biogás Nord y que ya han escalado los problemas de la asimilación de tecnologías a los cuales no está exenta esta nueva planta. Tampoco se especifican aquí, cuales son las posibles etapas de pretratamiento para residuos de compleja biodegradabilidad como la cachaza, los métodos de purificación a emplear, ni las tecnologías idóneas para la generación de energía eléctrica.

También Miranda, A. et al, 2006, da a conocer en el XII Taller Nacional de biogás la futura construcción de una planta para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos con tecnología Sueca (Figura 3, anexo 1) pero no se aclaran las características técnicas del equipamiento en cada una de las etapas.

En resumen el proceso de producción de biogás en el país intenta dar un salto tecnológico, pero no se reportan trabajos que propongan alternativas tecnológicas que incluyan las etapas de pretratamiento de los sustratos, digestión anaerobia, purificación

del biogás (eliminación de H₂S), la compresión, almacenamiento y generación de energía, así como el tipo de tecnología a utilizar en cada una de estas etapas según el sustrato empleado y la finalidad del proceso. Por otra parte los intentos para la aplicación de tecnologías de punta no han tenido en cuenta las posibilidades del país receptor pues se importan nuevas tecnologías de digestión sin tener presentes las ya asimiladas y desarrolladas. Además, estos intentos están constituyendo un mal ejemplo de la producción de biogás a escala industrial, ya que no se ha logrado en las plantas citadas el aprovechamiento energético del gas.

1.4 Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás.

Los residuos biodegradables son la materia prima por excelencia para la producción de biogás. La [Red solar, 2004](#) y [Turrini, E., 2006](#) reportan que estos son una de las fuentes renovables con mayor potencialidad en el país, con un potencial estimado en el orden de las 176 000 tep/a proveniente de residuales vacunos, porcinos, de la producción de azúcar, destilerías de alcohol, despulpadoras de café y de vertederos sanitarios

Por otra parte [López, L., 2006](#) estudia además de los anteriores, otros como los desechos provenientes de la producción agropecuaria, forestal, cañero – azucarera e industrial y lo hace específicamente para el territorio espirituario reportando un potencial que pudiera generar más de 80 millones de m³ de biogás.

El [CITMA, 2006](#) reporta también los residuos del territorio espirituario abordando fundamentalmente los residuos de excretas e industriales.

De manera general los residuos biodegradables reportados en Sancti Spíritus por estos dos trabajos se pueden clasificar en:

- *Residuos industriales* que incluyen los vertimientos de todo tipo de industrias con muy variadas composiciones que pueden originar dificultades en su biodegradación ([Florencio, 1997](#)). Entre ellos la cachaza que contiene materiales lignocelulósicos en su estructura y que necesitan de transformaciones para mejorar su rendimiento. ([López, M., 2000](#))
- *Residuos pecuarios* que los conforman las deyecciones de los animales, desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas), camas de gallinas

ponedoras con contenidos de sólidos totales que oscila entre un 20 -30 %. Estos residuos son de fácil biodegradación solamente se necesita la reducción de sus % de sólidos totales hasta valores entre el 8-10 %. (Savran, V., 2005).

- *Residuos de cosecha* formados por los desechos de las producciones agrícolas, sobre los que el Dr. Bernd Linke del Instituto de Ingeniería agrícola de Bornin en Alemania, reporta un incremento en la producción de biogás cuando estos son mezclados con residuos de excretas por encima a la fermentación de los sustratos por separado aunque no se reportan las cantidades de biogás que se incrementan por este concepto.

Por tanto podemos decir que la diversidad, en cuanto a la naturaleza los sustratos, hace que las transformaciones necesarias para el mejoramiento sus rendimientos sean también diversas lo que puede originar cambios en las etapas tecnológicas necesarias de un proceso de producción de biogás con fines energéticos.

1.5 Descripción y generalidades de las etapas tecnológicas de la producción de biogás con fines energéticos.

1.5.1 Etapa de pretratamiento.

Como se explicó anteriormente resulta común que los residuos biodegradables no sean vertidos al medio de manera que se facilite la interacción microorganismo – sustrato. Cuando esto sucede se hace necesario transformar los mismos y para esto se utilizan según convenga ***etapas de pretratamiento de los sustratos.***

Entre los pretratamientos que se reportan se encuentran los físicos, que incluyen los mecánicos y los térmicos (Haug, 1983; Pinnekamp, 1989; Hwang, 1997; Ying-Chih, 1997). El pretratamiento mecánico puede llevar en algunos casos a la disminución del tamaño de los sólidos presentes en el residuo y en otros a la destrucción de las células. Esta técnica de reducción de tamaño incrementa el acceso de los microorganismos, debido a la ruptura de grandes estructuras en cadenas más cortas, de ahí que por esta vía se pueda esperar un mejoramiento de la velocidad y del rendimiento de la hidrólisis. Estudios basados en este principio fueron reportados por (Jerger y col.1983) donde se

encontró que la velocidad de producción de gas (CH_4) fue significativamente afectada por el tamaño de partículas (0,003 - 8 mm). Encontrándose los mejores resultados para tamaños de partículas de 3 mm. Sin embargo, otros como [Braun, R. 2002](#) propone reducir el tamaño de partículas en los residuos de cosecha entre 1- 2 mm coincidiendo con [\(Edelman, W., Engeli, H. and Gradenecker, M, 2000\)](#).

También [Ley, N., 2006](#), en su tesis doctoral propone reducir el tamaño de los residuos lignocelulósicos hasta 3 mm para mejorar su biodegradabilidad e hidrólisis facilitando el contacto microorganismos - sustrato y ayudando de esta manera a la ruptura de la lignina y la celulosa que son componentes de la mayoría de los residuos agrícolas.

Por otra parte los pretratamientos térmicos son otra de las alternativas que dentro de esta categoría conduce a un mejoramiento en la eficiencia del proceso de digestión. Hay autores que hacen referencia a los problemas que conlleva el uso de esta opción, asociado a los requerimientos excesivos de energía para el calentamiento y enfriamiento del residual [\(Pinnekamp, 1989; Hwang, 1997\)](#). Por lo que en aras de reducir los consumos energéticos no se utiliza este tipo de pretratamiento en el presente trabajo.

Sin embargo, existen otros materiales complejos que aun cuando el tamaño de sus partículas haya sido reducido muestran resistencia a la biodegradabilidad entre ellos los residuos celulósicos la cachaza a los cuales se recomienda realizar un pretratamiento químico (alcalino). [\(ICIDCA, 1990; Rodríguez - Vázquez, 1992\)](#).

Existen varias formas de pretratamiento alcalino unas utilizan como álcalis el NaOH y otras el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en ambas se incrementa el área superficial producto del hinchamiento de la celulosa y se produce una disminución de la cristalinidad de la misma mejorando el rendimiento de los sustratos y su biodegradabilidad. [\(Jerger, R., 1983\)](#) [\(López, M., 2000\)](#)

Los principales estudios de solubilización química se llevan a cabo con el empleo de NaOH. Sin embargo, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puede generar ventajas económicas debido a sus bajos costos y procedencia nacional, lográndose los mejores resultados con la adición de 3,20 Kg/m³ de residuo y empleando un tiempo de solubilización de 6 horas para la cachaza [\(López T, M 2002\)](#).

Ropars, 1992 plantea que los residuos lignocelulósicos se pueden tratar mediante pretratamientos biológicos que basan su acción en el empleo e inoculación de enzimas específicas capaces de hidrolizar este tipo de material. Sin embargo, no menciona que estas tienen como inconvenientes la necesidad de una etapa previa que garantice el ataque enzimático y la importación de las enzimas desde los países productores elevando los costos de operación y dificultando la asimilación de la tecnología por el uso de materias primas que no se producen en el país.

En resumen, para facilitar la biodegradabilidad de los residuos de cosecha es posible utilizar un diámetro de partícula de 3 mm que puede lograrse mediante el uso de molinos de cuchillas rotatorias, mientras que para residuos más complejos como la cachaza se hace necesario agregar un pretratamiento químico con hidróxido de calcio aunque no se justifica en los trabajos reportados si es económica y ambientalmente factible respecto al uso directo del sustrato.

No se encontraron reportes de pretratamientos para sustratos con pH que difieren del valor óptimo para la digestión, como es caso de las vinazas aunque se sabe que la estabilización del pH con hidróxido de calcio en Heriberto Duquesne ha reportado resultados satisfactorios.

1.5.2 Etapa de digestión anaerobia.

Esta etapa es la más importante dentro del proceso bajo estudio pues es el momento en el que se produce el gas combustible, los bioabonos y se reduce la carga contaminante del residuo, ella tiene por objeto descomponer materias orgánicas y/o inorgánicas en un digestor hermético, sin oxígeno molecular, prosiguiendo el proceso hasta que se produzca metano, dióxido de carbono y otros gases. El proceso es una suma de reacciones bioquímicas provocadas por el cultivo de una mezcla de bacterias. La descomposición se produce en tres fases, hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis.

(Díaz, M., 2006).

Los gases producidos tienen un valor calórico de alrededor de 20 – 25 MJ/m³ y una composición que varía de acuerdo al sustrato que se alimenta, donde el porcentaje de metano y sulfuro de hidrógeno oscila entre el 40 y el 70 % para el primero y hasta el 3 % para el segundo. (Werner, J. 1989)

1.5.2-1 Tipos de digestores para la producción de biogás.

Existen en el mundo más de 1000 reactores anaerobios a escala industrial en explotación. Tal como muestra la siguiente Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Distribución de los digestores en funcionamiento por tipo tecnologías.

Tipos de reactores	Cantidad de ellos	Por ciento.
Reactor anaerobio de flujo ascendente UASB.	650	65
Contacto anaerobio.	120	12
Lagunas anaerobias	60	6
Híbridos	40	4
Lecho fluidizado	20	2
Reactores de película fija.	20	2
Otros	90	9

Fuente: Valdés, A., 2002

Aquí se observa como la tecnología más aplicada es el UASB con un 65 %, muy por encima de los de contacto anaerobio con un 12 % que es el que le sigue en cantidad de ellos en funcionamiento (Valdés, A., 2002). Las características de algunos de ellos se muestran a continuación:

Minidigestores.

- *Tipo Chino.*

El digestor de tipo chino tiene techo fijo para la recolección del biogás. Son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. En este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo o cúpula fija, forzando el líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegando a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 cm de columna de agua. Esta presión aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, como consecuencia de esto se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. Es una de las tecnologías más

utilizadas en la provincia espiritana con un total de 10 digestores de este tipo. (Savran, V. 2005)

Parámetros de operación.

- Productividad volumétrica (Pv) 0.15 – 0.2 m³/m³.d. (Montalvo, S., 2003)
- Tiempos de operación 30 – 60 días. (Savran, V., 2005) (Montalvo, S., 2003)
- Eficiencia 50 % de remoción de DQO. (Montalvo, S., 2003)
- Residuales con alto contenido de sólidos totales(8-10 %). (Savran, V., 2005)
- Carga orgánica capaz de asimilar (Bv) 2 Kg DQO/m³.d. (Savran, V., 2005)
- Costo del digestor: \$180.00 / m³ de digestor. (Lugonez, B.,2003)

• *Tipo Hindú.*

El digestor de tipo hindú consiste, en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 300 mm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos digestores. Sus desventajas fundamentales han estado marcadas por los altos niveles de corrosión en la campana metálica que afecta considerablemente su vida útil lo que los ha llevado a que en la actualidad sólo se tiene un digestor de este tipo en la provincia objeto de estudio. Por tal motivo a pesar de que se reporta aquí no se tienen en cuenta en el transcurso de la investigación.

Parámetros. (Montalvo. S. 2003)

- Productividad volumétrica (Pv) 0.5 – 1 m³/m³.d.
- Tiempos de operación 15 – 30 días.
- Eficiencia 50 % de remoción de DQO.
- Residuales con bajo contenido de sólidos insolubles.
- Carga orgánica capaz de asimilar (Bv) 0.5 – 3 Kg DQO/m³.d.

• *Flujo Pistón.*

Este tipo de digestor se ha construido con el fin de reducir los costos de inversión inicial, la materia prima utilizada ha sido el polietileno y concreto, tiene como desventaja que su vida útil no rebasa los 10 años y que es susceptible a roturas de la bolsa recolectora del gas. Pueden ser construidos alargados o en forma de gusano (Lugonez, B.,2003). Por sus bajos costos por metro cúbico de digestor y fácil construcción son analizados en el transcurso del presente trabajo.

Parámetros de operación.

- Productividad volumétrica (Pv) $0.5 - 1 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$. (Lugonez, B.,2003)
- Residuales con alto contenido de sólidos totales(8-10 %). (Montalvo, S., 2003)
- Tiempo de retención 30 d
- Costo del digestor: \$140.00 / m^3 de digestor. (Lugonez, B.,2003).
- Carga orgánica capaz de asimilar $1.7 \text{ kg SV}/\text{m}^3/\text{d}$. (Sosa, R., 1999)
- *Lagunas anaerobias.*

Las lagunas de oxidación o estabilización, son estanques en tierra cuyo fondo y paredes o taludes laterales pueden estar recubiertos o no por material impermeable como arcilla o algún material plástico. (Safley M. and Westerman W., 1988).

Un tipo de laguna ampliamente utilizado, lo constituye las llamadas lagunas anaerobias, que es el reactor anaerobio más sencillo que existe y que como regla general, no está cubierta, escapándose el biogás a la atmósfera. Estas se construyen en muchas ocasiones, con el objetivo fundamental de reducir la carga orgánica sedimentable. Este tipo de laguna ofrece pocas posibilidades de recuperar el biogás producido y si por un lado reduce la carga orgánica del residuo líquido, por el otro envía grandes cantidades de metano a la atmósfera causando incrementos en el efecto invernadero, por lo que no serán objeto de análisis en esta investigación.

Parámetros (Montalvo, S., 2003)

- Productividad volumétrica (Pv) $0.03 - 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3.\text{d}$.
- Tiempos de operación 30 días.
- Eficiencia 65 % de remoción de DQO.
- Residuales con mediano contenido de sólidos insolubles.
- Carga orgánica capaz de asimilar (Bv) $1 - 2 \text{ Kg DQO}/\text{m}^3 .\text{d}$.
- *Rectores híbridos.*

Este tipo de reactor ha sido difundido en el país a escala industrial con resultados satisfactorios, son también conocidos y patentado como tecnología MININT y se basan en el principio de los digestores de tipo chino pues son de tapa fija, pero en su interior funcionan como digestores secuenciales o de flujo pistón pues describen un laberinto o gusano con el fin de ocupar menores áreas superficiales en el terreno, además trabajan a regímenes estrictamente laminares para mejorar el contacto entre los microorganismos y los sustratos. (Hermidas, O., 2006). Sus ventajas radican en el tratamiento de una gran variedad de residuales ya sean diluidos o concentrados, ha sido aplicado en el país a residuales de la industria azucarera, excretas vacunas y porcinas y residuos vegetales como los restos de la producción del tomate, alcanzando hasta 1000 m³ de capacidad de digestión (Planta Antonio Guiteras), el flujo en su interior es horizontal y la carga del sustrato se realiza por gravedad. Con esto se evita la probabilidad de cortos circuitos hidráulicos a que están sometidos otros digestores, su puesta en marcha no ocasiona graves problemas, la desventaja de los mismos radica en que su intensidad de carga es de 4 kg de sólidos volátiles/ m³.d lo que hace que se necesiten mayores tiempos de retención y volúmenes de digestor para tratar igual cantidad de materia orgánica que otros reactores de segunda generación como los UASB, los RALF y los RALEF los cuales se mencionan más adelante, sin embargo su eficiencia de remoción es igual a la de estos últimos.

Parámetros. (Hermidas, O., 2006)

- Productividad volumétrica (Pv) 1.0-1.2 m³/m³.d.
 - Tiempos de retención de 30 días.
 - Eficiencia 70 - 85 % de remoción de DQO.
 - Residuales con bajos y altos contenido de sólidos totales. (Hasta 10 %).
 - Carga orgánica capaz asimilar (diseño) (Bv) 4 Kg SV /m³.d.
 - Carga orgánica capaz asimilar (reales aplicadas) (Bv) 4 KgDQO/m³.d.
 - Los costos no exceden los \$ 522/ m³ de digestor.
-
- *Digestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodo (UASB).*

Este tipo de reactor es hoy, sin duda alguna, el sistema anaerobio más aplicado a escala real (tabla 1.1). Su característica distintiva es la retención de biomasa en su

interior sin necesidad de ningún medio de soporte, gracias a la formación de granos o gránulos, lo cual lo hace más económico y le da ventajas técnicas sobre otros tipos de reactores. Por lo general los tiempos de retención de sólidos (TRS) en estos reactores son mayores de 30 días. Sin embargo, el proceso de formación de gránulos es también su principal limitante, ya que la correcta operación del proceso UASB, dependerá del grado de sedimentación que logren sus aglomerados celulares, ya sea como gránulos o flóculos densos. Su aplicación es limitada a sustratos con bajos contenidos de sólidos en suspensión, pues un incremento en estos últimos ocasionan arrastres de lodo en el efluente reduciendo las cantidades de microorganismos presentes en ellos. (Montalvo, S., 2003)

Parámetros. (Montalvo, S., 2003)

- Productividad volumétrica (Pv) 2.7 –3.7 m³/m³.d.
- Tiempos de retención de sólidos mayores de 30 días.
- Tiempos de retención hidráulica 4 horas a 7 días.
- Eficiencia 70 - 85 % de remoción de DQO.
- Residuales con bajo contenido de sólidos insolubles.(< 2 g/l)
- Carga orgánica capaces asimilar (diseño) (Bv) 0 – 20 Kg DQO/m³ .d.
- Carga orgánica capaz asimilar (reales aplicadas) (Bv) 0- 15 KgDQO/m³ d.
- Consumo de energía por bombeo obligatorio 20 – 60 Wh/m³.
- Costos de \$ 1042/ m³ de digestor. (Moletta, R., 2005)

- *Reactor anaerobio de lecho fijo (RALF).*

El reactor anaerobio con lecho fijo o empacado o filtro anaerobio (FA) comenzó su desarrollo a mediados de la década de los 60 (Young C., 1991), (Young J. C, McCarty P. L, 1968). En este reactor, el agua residual pasa a través de un lecho con materiales inertes (piedra, medio plástico, cerámica, etc.), sobre los cuales, se establecen y desarrollan los microorganismos que actúan sobre el sustrato.

La elevada concentración de microorganismos dentro del reactor hace que los tiempos de retención hidráulica alcancen valores entre 3 horas y 6 días, obteniéndose elevadas eficiencias y rendimientos significativos en la producción de biogás (Hamoda M. F, Kennedy K. J, 1986), (Ladine R. C, 1982).

De acuerdo con el tipo de alimentación, los RALF pueden ser de flujo ascendente, descendente o longitudinal. Su aplicación en el país no rebasa la escala de planta piloto según reporta (Montalvo, S., 2003). Debido a estas características son considerados como reactores de segunda generación que se tendrán en cuenta para este estudio.

Parámetros. (Montalvo, S., 2003)

- Productividad volumétrica (Pv) 6 m³/m³.d.
 - Tiempos de retención de sólidos mayores de 100 días.
 - Tiempos de retención hidráulica 3 horas a 6 días.
 - Eficiencia 70 - 85 % de remoción de DQO.
 - Residuales con bajo contenido de sólidos insolubles. (<2 g/l)
 - Carga orgánica capaces asimilar (diseño) (Bv) 20 Kg DQO/m³.d.
 - Carga orgánica capaz asimilar (reales aplicadas) (Bv) 16 KgDQO/m³.d.
 - Consumo de energía 30-80 Wh/m³.
 - Costos de \$ 5000/ m³ de digester. (Moletta, R., 2005)
- *Digester anaerobio de lecho expandido o fluidizado. RALEF.*

La aplicación de este tipo de reactor se basa en el uso, como medio inerte, de partículas pequeñas, lo que aumenta considerablemente el área de contacto entre la materia orgánica degrada y el medio soporte donde se alojan los microorganismos que actúan sobre esta materia orgánica (Jewel W. J, 1987), (Toldr F, 1987). En este caso el medio soporte se mantiene en suspensión dentro del reactor. *El principio de fluidización* vence la dificultad que presenta el soporte fijo en los RALF, ya que éstos, logran un área de transferencia mayor.

Los tiempos de retención hidráulicos (θ) son de 20 minutos a 6 h. Estos θ tan bajos no permiten una buena separación del gas del efluente, por lo que se requiere adicionar generalmente un separador gas – líquido como segunda etapa del proceso. (Guerrero L, et al, 1998)

Parámetros. (Montalvo, S., 2003)

- Productividad volumétrica (Pv) 4 –6 m³/m³.d.
- Tiempos de retención de sólidos mayores de 100 días.

- Tiempos de retención hidráulica 20 minutos a 6 días.
- Eficiencia 80 - 90 % de remoción de DQO.
- Residuales con bajo contenido de sólidos insolubles.
- Carga orgánica capaces de asimilar (diseño) (Bv) 20 Kg DQO/m³ .d.
- Consumo de energía producto al bombeo. 20 – 1000 Wh/m³. (Montalvo, S., 2003)

Por lo tanto entre los reactores reportados para el tratamiento de residuos con altos contenidos de sólidos totales los de mayor importancia son los de tipo chino, flujo pistón, los híbridos y los de mezcla completa mientras que para el tratamiento de residuales altamente diluidos los más idóneos son los híbridos, los UASB, los RALF y los RALEF.

1.5.3 Etapa de purificación.

Existen varios métodos de purificación del biogás reportados en la literatura unos para la eliminación del dióxido de carbono, con el fin de elevar el poder calórico del combustible, y otros para la eliminación del sulfuro de hidrógeno, evitando la corrosión de los metales en los equipos que se pongan en contacto con él.

Generalmente la calidad con que se debe obtener el biogás está en función de su destino final, por ejemplo cuando se habla de biogás para producir energía eléctrica se hace necesario eliminar la presencia del sulfuro de hidrógeno hasta un 0.01 %, sin embargo, cuando se refiere a usos para calderas se requiere una reducción de hasta un 0.1 %.

Entre los métodos para la eliminación del sulfuro de hierro están los que utilizan compuestos del hierro: Montalvo, S., 2003. Este es uno de los métodos más empleados para eliminar el H₂S del biogás en instalaciones pequeñas y con cierta frecuencia en medianas. (Montalvo. S, Guerrero L, 2003). El método se basa en poner en contacto una corriente de biogás con una solución de sulfato de hierro en presencia de limallas de hierro para reponer los iones hierro que se van como sulfuro de hierro, precipitado pardo rojizo que se obtiene en esta etapa como corriente residual.

En resumen, para los fines de esta investigación es necesario utilizar métodos de eliminación de sulfuro de hidrógeno, pues la misma pretende el aprovechamiento

energético del gas en tecnologías específicas y para esto uno de los más difundidos es el que utiliza los compuestos del hierro.

1.5.4 Etapa de compresión-almacenamiento del biogás.

Esta etapa puede incluirse o no en un proceso de producción de biogás con fines energéticos, su utilización esta sujeta al tipo de consumidor y a la capacidad de la tecnología empleada para mantener la presión. La misma consta de un sistema de compresión acoplado a una bala de almacenamiento, generalmente a una presión 15 atm con su posterior conexión a válvulas reguladoras de presión en función de los requerimientos de cada tipo de consumidor, y tiene como ventajas que ofrece la posibilidad de almacenar el gas para en caso de fallas en el sistema continuar alimentando a los consumidores, puede brindar servicio a consumidores que requieran diferentes presiones de trabajo, al mismo tiempo tienen como desventaja fundamental el incremento del costo de operación y de inversión debido a los consumos de energía que requiere dicha etapa. Estos sistemas han sido aplicados en diversas plantas del país entre las que se encuentran la planta MININT Camaguey (1991), la Antonio Guiteras, en Las tunas (1998) y la planta MININT Sancti Spíritus (2006).

1.5.5 Etapa de generación de energía eléctrica.

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 como se ha dicho. 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, también en Pinar del Río se realizan esfuerzos en este sentido aunque con muy pocos resultados.

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 kilowatt 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. (A. Marcos, B. Aníbal, P. Inocente, 2003).

Es probable encontrar, con mayor facilidad que hasta el momento, el financiamiento para uno de estos proyectos de producción descentralizada que el necesario para una central convencional. La [tabla 1.2](#) muestra un resumen de la eficiencia y el costo de las tecnologías energéticas en explotación y desarrollo en la actualidad.

Tabla: 1.2 Características de las tecnologías de generación y cogeneración distribuidas.

Tecnología	Combustible	Potencia MW	η Eléctrica	η Global	Inversión USD/KW	O&M USD/KW H
<i>Turbina de vapor</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>0.25-500</i>	<i>12-25</i>	<i>60-80</i>	<i>200-18000</i>	<i>0.0027</i>
<i>Turbina de gas</i>	<i>Gaseoso o líquido</i>	<i>0.25-50</i>	<i>25-42</i>	<i>65-87</i>	<i>400-85000</i>	<i>0.004-0.009</i>
<i>Motores diesel Otto</i>	<i>Gaseoso o líquido</i>	<i>0.003-20</i>	<i>25-45</i>	<i>65-92</i>	<i>300-1450</i>	<i>0.007-0.014</i>
Ciclo combinado	Gaseoso o líquido	3-300	35-55	73-90	400-850	0.004-0.009
Macroturbinas	Gaseoso o líquido	0.005-0.1	15-30	60-85	600-850	<0.006-0.01
Celda de combustión	Gaseoso o líquido	0.003-3	37-50	85-90	-	-
Motor Stirling	Gaseoso o líquido	0.003	15-25	65-85	-	-
Celdas fotovoltaicas	Solar	0.003-1	17-15	-	5000-8000	0.0001

Fuente: A.Marcos, B. Aníbal, P. Inocente, 2003.

Ventajas eléctricas de la generación descentralizada.

- La generación local reduce las pérdidas de transmisión de energía.
- Se mejora la eficiencia global y el aprovechamiento de la energía primaria.
- Pueden evitarse congestionamientos en las redes de transmisión existentes.
- Se reducen los impactos de fallas en las redes de transmisión.
- Posibilita un mayor aprovechamiento del calor residual.
- Se mejora la calidad y fiabilidad del suministro de energía.

- Las fuentes de generación distribuidas se pueden poner en línea mucho más rápido.
- Se incrementa la diversidad de combustibles y fuentes de energía.

Ventajas económicas de la generación descentralizada.

- Regiones remotas y comunidades aisladas se benefician grandemente de las posibilidades ofrecidas por el desarrollo de las tecnologías energéticas descentralizadas.
- Se estimula el empleo, por ejemplo; en el caso del aprovechamiento de la biomasa en el sector rural.
- El monto y el riesgo de las inversiones se reducen, al poder tener una estrecha correspondencia entre la capacidad instalada y el crecimiento de la demanda.
- Los impactos medioambientales se reducen, en particular cuando se utilizan fuentes renovables de energía.
- Se reduce la vulnerabilidad de los sistemas energéticos a fenómenos climáticos y de otra índole.
- Se incrementa la seguridad energética al ampliarse la gama de fuentes de energía en el sistema.

En los *motores diésel* la generación de electricidad a partir de biogás puede reemplazar entre 80 y 85% del acpm o diesel (la baja capacidad de ignición del biogás no permite reemplazar la totalidad del acpm en este tipo de motores que carecen de bujía para la combustión). (Obaya C., 1999.) Mientras en los *motores de gasolina* el biogás puede reemplazar la totalidad de la misma.

Barreto, S., 2006, plantea que la eficiencia de generación de energía eléctrica está alrededor del 25 % en motores de combustión interna lo que se corresponde con lo reportado en la tabla 1.2 por Marcos, A., Aníbal, B., Inocente, P., 2003, donde se plasman eficiencias eléctricas entre 0.25 y 0.45.

Sin embargo la producción de energía eléctrica a partir del biogás como combustible en los países desarrollados se ha reportado fundamentalmente utilizando como tecnología los motores de combustión interna, las turbinas de gas y las turbinas de vapor por lo

que a ellas se les presta especial importancia en el transcurso de la presente investigación.

1.5. 6 Etapa de empleo de los bioabonos.

Los Bioabonos producidos como residual de la producción de biogás tienen una composición media según: (Pérez, V., 1998; Gutiérrez, 1998) de N₂ de (1.5-2.5) %, P₄ (1.16-1.4) %, K (0.7-0.9) % por lo que su uso ha contribuido a lo largo del tiempo a la mejora de los suelos sustituyendo agroquímicos causante del deterioro de los mismos. Barreto, S., 2006, en su tesis doctoral, enfoca su análisis en estudios de mercado para lo cual buscando la mejor rentabilidad económica propone ver las plantas de tratamiento anaerobio de residuos como un sistema íntegro en el que deben aprovecharse al máximo todos los productos y subproductos de la digestión anaerobia, esto lo hace refiriéndose fundamentalmente a los ingresos que pueden obtenerse por la venta de los lodos como abonos orgánicos y por la fabricación del compost para alimento animal. También Obaya, C., 1999, aborda temas relacionados con el valor agregado que los bioabonos aportan al proceso de producción de biogás con un precio de venta de \$ 20 la tonelada para el caso de los efluentes azucareros tratados, otros reportes atribuyen precios entre 16 – 22 \$ / tn, según la Energy Center Wisconsin, 2002. Miranda, et al., 1986 realiza un análisis de la efectividad económica de las plantas de biogás a partir de diferentes residuales (excretas, mostos de destilería) demostrando que las mismas no son rentables si no se aprovecha al máximo todos sus productos tratados. En Sancti Spíritus el precio en MN para el comercio de estos bioabonos como materia orgánica oscila, según el departamento de economía de la agricultura urbana, en alrededor de \$ 270/ t en moneda nacional.

También los efluentes pueden ser usados en la lombricultura para la fabricación de humus abono orgánico con propiedades para los suelos superiores a las excretas húmedas, así como acuicultura, fértil riego en el caso del efluente líquido el cual puede utilizarse también para la aplicación foliar. El humus es cotizado para la jardinería en el turismo entre 58-70 CUC / tn (Obaya, C. et al, 2004)

1.6 La asimilación y la transferencia de tecnología

La existencia de tecnologías diversas, unas utilizadas y otras poco estudiadas en el país conlleva a estudios de transferencia y asimilación de las mismas con el objetivo de no implementarlas con errores que muchas veces son letales.

Diferentes investigadores e instituciones (Behrman D, 1979), (Ávalos I, 1994), (Dueñas H, 2002) han planteado que la asimilación de tecnologías por medio de la transferencia tecnológica constituye un elemento común que conduce la estrategia de desarrollo tecnológico de un país, independiente del nivel o grado de desarrollo en que se encuentre, a pesar de las dificultades que se presentan en este proceso.

La transferencia tecnológica ha sido definida por muchos especialistas. Algunos la definen como un traspaso de conocimiento y equipamiento de quien la suministra a quien la recibe (Arriola J, 1988), (Claire S, 1998). Otros la consideran como un proceso o conjunto de pasos que conlleva a la búsqueda, negociación y contratación de una tecnología dada para su futuro uso en la producción de un bien o la prestación de un servicio; el cual se inicia con la comercialización de la tecnología (Herrera A, 1971), (Castro F, 1983), (Hidalgo A, 1994), (Kotelnikov V, 2001), (Dueñas H, 2002). Otro grupo trata de definirla como un proceso organizado, en el cual una Empresa o un país usan una tecnología para diseñar, producir, distribuir y sostener un proceso. (Anónimo III, 2000).

También puede ser interpretada como un flujo internacional de conocimientos que incluye las patentes, las licencias, la asistencia técnica y otras, abarcando tres momentos elementales: la adquisición, la asimilación y la difusión.

Partiendo de este concepto, los países en vía de desarrollo deben dedicar sus mayores esfuerzos a resolver los múltiples problemas que se derivan al asimilar una tecnología por esta vía, ya que las características estructurales de estos países limita la eficiencia en la utilización de los recursos tecnológicos e impiden que se logren los mayores beneficios en los conocimientos tecnológicos que inciden no solo en la puesta en marcha y su incorporación al proceso productivo sino también al enfrentamiento de tecnologías envejecidas, a los insumos de materias primas importadas por no poseer la calidad requerida, a la capacidad para poder concebir otro equipo de producción, a dificultades en la comunicación de proceso entre otras. (Katz J, 1986), (Sáez T, 1988), (Hidalgo A, 1994), (Bart K, 1999), (Rebentisch E, 2002). Por tanto el hecho de proponer

alternativas para producir biogás con fines energéticos debe transitar por un proceso de asimilación de tecnologías, utilizando para esto modelos o estrategias de transferencia tecnológica que tengan en cuenta no solo el conocimiento de la tecnología sino también las necesidades del país receptor.

1.6.1 Modelos de asimilación de tecnologías.

Entre los modelos de asimilación de tecnologías por transferencia tecnológica se encontraron: (Zelkowitz M, 1994)

1. *Modelo del facilitador* (People mover model): En este modelo existe un contacto personal entre el diseñador y el usuario de la tecnología, mediante un facilitador que se caracteriza por su espontaneidad y su responsabilidad y tiene la función de conocer la tecnología y comunicar los deseos de importarlo.

2. *Modelo de Comunicación* (Communication model): Es el modelo donde la nueva tecnología se encuentra publicada y el facilitador es capaz de difundirla a la organización que pertenece al igual que el modelo anterior.

3. *Modelo sobre el estante* (On the shelf model): En este modelo se requiere que la nueva tecnología se encuentre bien concreta y argumentada para que los no expertos en la materia puedan descubrirla, aprendan de él y comiencen el proceso de difusión. Esto exige que el diseñador documente bien el método a fin de que se pueda usar fácilmente.

Estos modelos describen como se llega a conocer una tecnología que se necesita transferir para satisfacer los requerimientos del usuario, en el cual juega un papel importante el diseñador y el facilitador, no obstante, no describen la forma y los procedimientos para lograr una eficiente adquisición y asimilación de la tecnología, obviando lo conveniente para el país receptor y la toma de decisiones, solo la tecnología se valora en función de la capacidad de un tercero (facilitador), sin herramientas de análisis aplicados a las particularidades del país.

Asimismo, estudios realizados por Ley N, 2006, proponen una estrategia para la transferencia tecnológica de plantas químicas, de la cual se obtiene la información necesaria de la tecnología en cuestión y permite un análisis interactivo ante las problemáticas que enfrenta el receptor de la tecnología. En este modelo se controlan y

se establecen las necesidades de los recursos requeridos en la tecnología deseada, así como la forma de accionar para solucionar las problemáticas que pueden surgir al transferir una tecnología, específicamente para plantas químicas. Según el autor la estrategia planteada responde a un **Modelo combinado y de procedimiento**, en el cual se han aprovechado las ventajas de los modelos antes mencionados, sobre la base de la recopilación de toda la información que se requiere para la tecnología en cuestión, con el objetivo de obtener una identificación más exacta de la misma y de que se conozcan los aspectos a profundizar para lograr una correcta adaptación tecnológica. Además como proceso interactivo, analiza las necesidades del usuario, dando a conocer su disponibilidad, su argumento y conocimiento de la tecnología. (Ley, N., 2006). Este autor no considera criterios que establezcan diferencias en cuanto al efecto ambiental de las corrientes de entrada y salida de las etapas tecnológicas. No obstante, se decide trabajar con este último modelo para asimilar tecnologías de producción de biogás con fines energéticos agregando el análisis del efecto ambiental como un aporte al mismo.

Conclusiones parciales.

- La producción de biogás desde sus inicios se destinó al aprovechamiento energético del gas, el saneamiento ambiental y la producción de bioabonos.
- Resulta una oportunidad las nuevas formas de generación descentralizada del país, para el uso del biogás como sustituto de los combustibles convencionales en la generación de energía eléctrica.
- No se encontraron reportes en la literatura que incluyan propuestas tecnológicas que den respuesta a diferentes tipos de sustratos brindando las etapas de pretratamiento, digestión, purificación, almacenamiento y generación de energía eléctrica específicas para cada uno de ellos.
- La revisión bibliográfica permitió además, agrupar los parámetros técnicos de 8 tipos de digestores que pueden constituir una base de datos organizada para trabajos posteriores.
- Se identificaron un total de cuatro modelos de asimilación de tecnologías por transferencia tecnológica, determinándose que el propuesto por Ley, N., 2006 se ajusta tanto al conocimiento de la tecnología como a las necesidades del país receptor, aunque necesita ser adaptado al caso específico de la producción de biogás con fines energéticos.

CAPÍTULO II. Materiales y métodos.

En este capítulo se exponen los métodos empleados para dar cumplimiento a los objetivos trazados. Se trata de una investigación que persigue obtener propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos a partir de los residuos del territorio espiritano. Su empleo como parte de la intervención y adaptación de las propuestas se aplicó en un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán.

En función de lo antes expuesto, tal y como se expresa en el capítulo I página 29, se utilizó la estrategia propuesta por **Ley, N., 2006** para plantas químicas, modificada por el autor en algunos de sus componentes para aplicarla a la asimilación de tecnologías de producción de biogás con fines energéticos, tal como se describirá más adelante.

2.1 Descripción de las etapas de la estrategia de **Ley, N., 2006** modificada por el autor. **Figura 2.1**, primera y segunda parte.

El uso de esta estrategia para realizar propuestas tecnológicas de producción de biogás con fines energéticos debe abarcar el estudio de cuatro etapas fundamentales:

Etapa 1: Inicio del proceso.

Etapa 2: Vigilancia tecnológica.

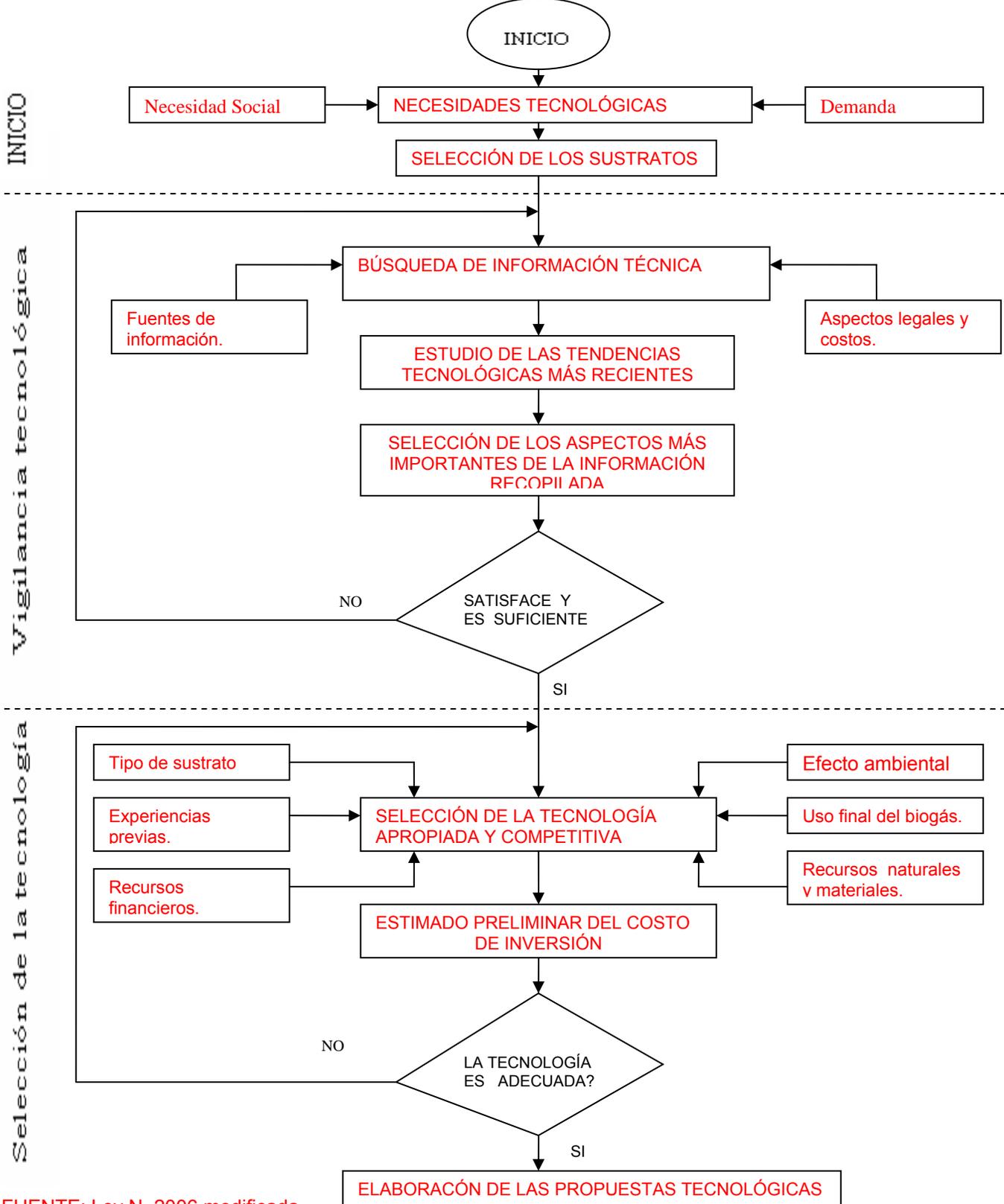
Etapa 3: Selección de la tecnología.

Etapa 4: Proceso de Adaptación.

Etapa 5: Desarrollo de proceso.

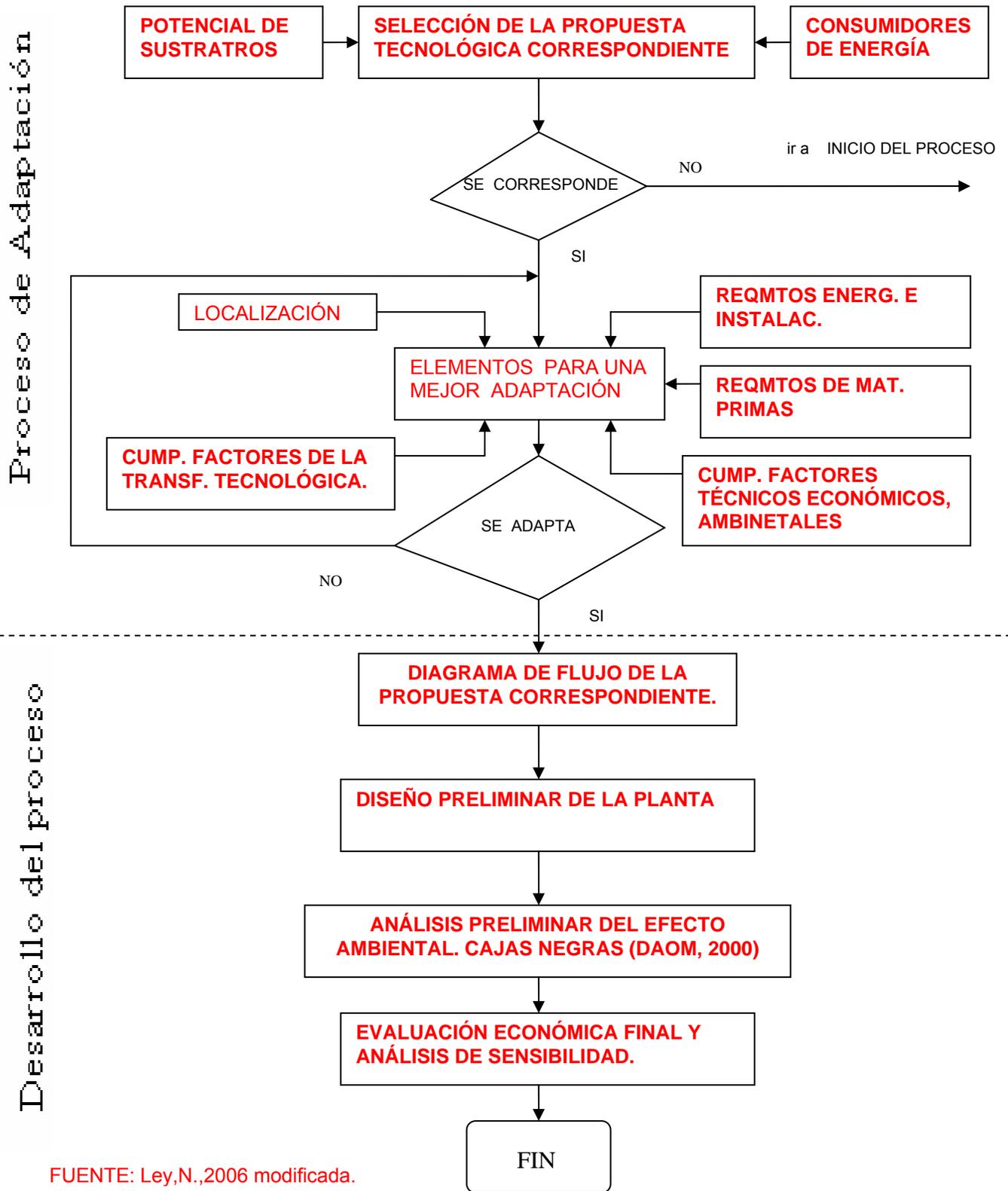
La manera en que se deben realizar cada una de estas etapas y las modificaciones realizadas a la estrategia de **Ley, N., 2006** se describen a continuación.

Figura 2.1. Estrategia para la asimilación de tecnologías modificada. Primera parte.



FUENTE: Ley, N., 2006 modificada.

Figura 2.1. Estrategia para la asimilación de tecnologías modificada. Segunda parte.



FUENTE: Ley,N.,2006 modificada.

2.2 Inicio del proceso.

Esta etapa persigue promover las necesidades tecnológicas que tiene el país receptor, en ella se debe partir de dos aspectos fundamentales:

Demanda de mercado: Según **Cruz, R. 1996** es la cantidad máxima de producto que los consumidores que pertenecen a ese mercado estarían dispuestos a consumir. Se considera que la producción de energía a partir del biogás, por tratarse de una fuente renovable de energía que genera además bioabonos capaces de sustituir agroquímicos causantes del deterioro de los suelos, tiene un mercado seguro para todos sus productos.

Necesidades sociales: Se debe tener presente que la tecnología objeto de estudio puede atenuar dos de los postulados globales reportados por **Castro, F. 2003** en el libro Ciencia, Tecnología y Sociedad y uno reportado por **Herminia, J. 2007** en el tabloide Universidad para todos, los cuales son mencionados a continuación:

- El crecimiento de la demanda energética mundial, que para los próximos 20 años se multiplicará por 3. Durante este tiempo se calcula que las principales fuentes de producción de electricidad que son los combustibles fósiles deberán disminuir su contribución para cumplir con las exigencias del protocolo de Kyoto que incluye una reducción del 12 % para el año 2010. (**Castro, F. 2003**).
- La futura escasez de agua de riego pudiera causar para mediados de este siglo una disminución del 25 % en la producción de cereales de la India. Se pronostica que una cuarta parte de la población mundial vivirá en países que padecen escasez crónica o insuficiencia de agua dulce. (**Castro, F. 2003**)
- Los cambios ambientales con el incremento del efecto invernadero y el cambio climático asociado al agotamiento de la capa de ozono y la contaminación de los suelos producida por la actividad agrícola, cuando tiene lugar la aplicación inadecuada, excesiva y prolongada de agroquímicos los cuales pueden provocar efectos adversos en las poblaciones de microorganismos que determinan el equilibrio biológico de las áreas objeto de aplicación. (**Herminia, J. 2007**).

También se tuvo en cuenta que la producción de biogás contribuye al tratamiento de los residuales respondiendo a la recuperación de la cuenca hidrográfica de la presa Zaza sometida al constante vertimiento de residuos biodegradables en sus afluentes.

De la determinación de la necesidad social y la demanda de mercado surge y se justifica la necesidad tecnológica pero la materia prima para la producción de biogás, es decir los sustratos, tienen características y composiciones diversas lo cual influye sobre la tecnología a emplear por lo que es aconsejable antes de llegar a la etapa de vigilancia tecnológica realizar un estudio sobre los potenciales de residuos orgánicos en el territorio objeto de estudio para seleccionar aquellos sustratos que puedan aportar los mayores beneficios.

Selección de los sustratos.

Esta selección constituye un aporte del presente trabajo a la estrategia de [Ley, N., 2006](#), la misma surge por la necesidad de conocer los sustratos a partir de los cuales se realizarán las propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos. En ella se deben realizar los siguientes pasos:

1. Determinación de los vertimientos de residuos biodegradables.
2. Caracterizar los residuos teórica o experimentalmente.
3. Estimación preliminar de las cantidades de biogás que ellos pueden generar mediante índices establecidos en la literatura o determinados experimentalmente.
4. Selección de los sustratos que mayores volúmenes de biogás pueden generar y que más contribuyen al deterioro del medio ambiente.
5. Establecimiento de los principales escenarios a que se pretende dar respuesta y formar grupos de sustratos teniendo en cuenta su similitud en cuanto a biodegradabilidad, composición y % de sólidos.

En esta investigación se analizaron reportes bibliográficos ya existentes sobre los potenciales de biogás del territorio espirituano, teniendo en cuenta el artículo “La producción de biogás a partir de desechos pecuarios y agroindustriales: una alternativa energética” realizado por ([López, L., 2006](#)) de conjunto con el autor del presente trabajo y el Informe sobre el potencial de biogás de la provincia de Sancti Spíritus ([CITMA,](#)

2006) agregando los pasos 3 y 4 del procedimiento antes descrito y conformando tres grupos de sustratos tal como se muestra:

- **1er Grupo:** Sustratos con alto contenido de sólidos totales (8-10 %) y de compleja biodegradabilidad.(López, M., 2000)
- **2do Grupo:** Sustratos con alto contenido de sólidos totales (8-10 %) de menor complejidad para su biodegradabilidad. (Linke, B., 2006)
- **3er Grupo:** Sustratos altamente diluidos con concentración de sólidos en suspensión (S.S)<2g/l según Montalvo, S., 2003.

2.3 Vigilancia tecnológica.

Previo a la selección de la tecnología, se establece una etapa de vigilancia tecnológica, teniendo en cuenta la actualidad y las modificaciones o innovaciones que han sido realizadas por otras instituciones e investigadores, para lo cual, en función de cada grupo de sustrato se debe realizar:

- Una búsqueda de informaciones técnicas y comerciales sobre las etapas tecnológicas analizadas en el capítulo I.
- Estudio de la tendencias tecnológicas más recientes.
- Selección de los aspectos más importantes de la información recopilada.

Búsqueda de informaciones técnicas y comerciales

Esta etapa se apoya en los aspectos descritos en la literatura de esta investigación, pero muchas veces esto no es suficiente por lo que Ley, N., 2006 recomienda la realización de un estudio de patentes como una vía idónea para la obtención de la información necesaria.

Este estudio de patentes puede realizarse en las oficinas especializadas, radicadas generalmente en el CITMA, para esto se presenta una planilla que se muestra en el [anexo 2](#). En ella se utilizan una serie de palabras claves relacionadas con las tecnologías bajo estudio que pueden ser traducidas a diferentes idiomas.

Tendencias tecnológicas.

De aquí se deben tomar las tendencias tecnológicas más recientes y adaptables al país según las descripciones de estas, vinculando la búsqueda de patente con los reportes bibliográficos y experiencias previas

Selección de los aspectos más importantes.

De esta manera se analizan y se tamizan las patentes encontradas y la bibliografía consultada, con el fin de realizar una buena selección de las tecnologías de producción de biogás con fines energéticos.

Una vez realizado este proceso se hace una revisión de la calidad de la información recopilada, en cuanto a costos de las tecnologías, Know How, diagramas de flujo y en muchas ocasiones hay que regresar al punto inicial cuando la misma no ha sido suficiente

2.4 Selección de la tecnología apropiada y competitiva.

La forma en que se realizó la selección de las tecnologías constituye un aporte del presente trabajo pues incluyó, además de aspectos propuestos por el autor de la estrategia original, el tipo de sustrato, seleccionado previamente, y el efecto ambiental de cada etapa tecnológica tal como se explica a continuación.

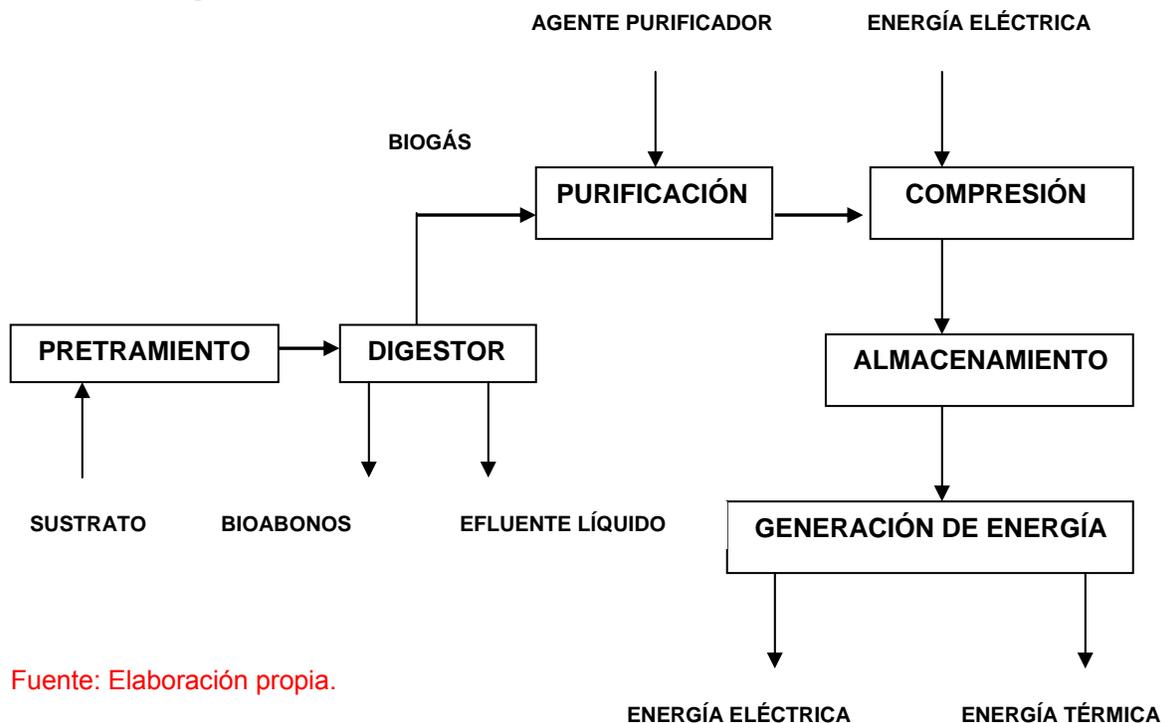
- *Tipo de sustrato:* Es de vital importancia pues estos determinan el tipo de pretratamiento y digestor a emplear. Constituye un aporte a la estrategia de **Ley, N., 2006.**
- *Recursos financieros:* Constituye una restricción de suma importancia por el difícil acceso a este recurso de la mayoría de los países subdesarrollados y su minimización puede contribuir al mejoramiento de los indicadores económicos de la planta en general.
- *Recursos naturales y materiales:* Se debe tener presente, la disponibilidad de las materias primas requeridas en cada una de las etapas tecnológicas, evitando el uso de materiales de importación.
- *Fondos del conocimiento y experiencias previas:* Analizar la eficiencia y el rendimiento de cada etapa tecnológica basados en experiencias previas de la

producción de biogás con fines energéticos tanto en Cuba como en el resto del mundo.

- *Efecto ambiental:* Constituye un aporte a la estrategia de [Ley, N., 2006](#). Se añade al proceso de selección la incidencia en el medio ambiente de su aplicación, teniendo en cuenta el efecto de las corrientes residuales que se originan en cada etapa tecnológica, como por ejemplo las emisiones de ruidos, gases contaminantes y movimientos de tierra.

La selección de la tecnología para los residuos del territorio espirituano se realizó por etapas tecnológicas, según fueron descritas en el capítulo I y mostradas en forma de diagrama de bloques en la [figura 2.2](#). La estrategia de este epígrafe fue analizar y seleccionar primeramente los tipos de pretratamientos y de digestores para los tres grupos de sustratos conformados y posteriormente las etapas de purificación, compresión – almacenamiento y generación de energía que son comunes para cualquier proceso de producción de biogás con fines energéticos, hasta lograr un esquema tecnológico para los grupos de sustratos 1, 2 y 3 que se les llamó propuestas tecnológicas 1, 2 y 3 respectivamente.

Figura 2.2. Diagrama de bloques de la etapas tecnológicas del proceso de producción de biogás con fines energéticos.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se explica el procedimiento utilizado en esta investigación para la selección de las etapas tecnológicas del proceso bajo estudio a partir de las tecnologías encontradas tanto en los reportes bibliográficos como en la búsqueda de patente, este procedimiento puede cambiar en función de los grupos de sustratos conformados en un territorio dado o por la incorporación de otros tipos de tecnologías al proceso de selección.

2.4.1 Selección de la etapa de pretratamiento para cada grupo de sustrato.

En esta etapa se debe seleccionar el pretratamiento a utilizar para cada uno de los grupos de sustratos conformados.

1er Grupo.

El primer pretratamiento tuvo en cuenta la patente No. US 2006/0102560, para su dimensionamiento se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Se tomó como masa de cachaza fresca ($M_{CACHAZA}$) 1000 kg/d, con $\rho_{cachaza} = 120$ kg/m³, 80 % de humedad, 20 % de sólidos totales y 16 % de Sólidos Volátiles (López, M. 2000).
- Se asumió que 1000 kg de cachaza producen 70 m³ de biogás en estas condiciones de pretratamiento. (Valdés, A. 2002)
- Se consideró que el volumen máximo de este tanque con agitador será cuando este residual se mezcla con vinazas por ser el que mayor carga orgánica y % de sólidos totales presenta respecto a los demás residuos líquidos de esta propuesta. (8%) (Valdés, A. 2002).
- Se calcularon mediante balances parciales y totales la masa de la mezcla de residuales cachaza – vinazas y los STV que la acompañaron.
- Se calculó el volumen que ocupó la masa de cachaza. ($V_{CACHAZA}$)

$$V_{CACHAZA} = \rho_{cachaza} * M_{CACHAZA} \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (1)$$

- El volumen del tanque se estimó sumando el resultado anterior con el gasto de vinazas calculado de los balances de masa y llevado a m³, considerando el almacenamiento de la producción de un día.

$$V_{\text{tanque}} = V_{CACHAZA} + V_{\text{LÍQUIDO}} \quad (\text{m}^3) \quad (2)$$

- Como $V_{\text{tanque}} = \pi * r^2 * h$ entonces se asume un radio (r) y se calcula la altura (h).
- El tipo de agitador se determinó por el [Rosabal, J., 1998](#)

El segundo pretratamiento encontrado, para este mismo grupo de sustratos, analizó la patente No. CU 22738 y su dimensionamiento se realizó por el procedimiento que se describe:

- Se consideraron las mismas condiciones que en el pretratamiento anterior en cuanto a los volúmenes de residual que se mezclaron, los % ST y % SV.
- Se utilizó un índice de adición de hidróxido de calcio al 80 % de 3,20 Kg /m³ de mezcla residual. ([López, M, 2000](#))
- Se analizó el efecto económico del gasto de hidróxido de calcio considerando un precio de 107 \$/t (Comercializadora MINAZ) y del incremento de la producción de biogás estimando la cantidad de energía eléctrica que representa el volumen de biogás incrementado por la adición del reactivo. Para esto se utilizó como índice la experiencia de la empresa Biokraftwerk Furstenwalde (Alemania), que genera a razón de 2.23 kWh eléctrico/m³ de biogás y 3.33 kWh térmico / m³ de biogás y utilizando un precio de venta de la energía eléctrica de 0.073 \$/kWh, determinado como precio promedio por el factor de inversión del combustible.

2do Grupo.

Para este grupo de sustratos se analizó únicamente como pretratamiento un molino de cuchillas seguido de tanque con agitador, tomados de los reportes bibliográficos. Por tal motivo no fue necesaria su selección pero si se analizaron las ventajas y desventajas de su aplicación.

3er Grupo.

En este grupo se analizó también una sola etapa de pretratamiento, consistente en un tanque con agitador para la dilución de los sustratos, tomado de experiencias previas de la planta anexa al central Heriberto Duquesne. Por lo que tampoco aquí fue necesaria la selección.

2.4.2 Selección de la etapa de digestión para cada grupo de sustrato.

1er y 2do Grupo.

Teniendo en cuenta la similitud en cuanto a los % de S.T reportados para los residuales de ambos grupos, se decidió que en la etapa de digestión se tendrían en cuenta los mismos tipos de digestores.

Los principales digestores que se recogieron en la literatura y la búsqueda de patentes (Acápate Información no patente) fueron:

1. Digestores de tipo chino.
2. Digestores de flujo pistón.
3. Digestores Híbridos.
4. Digestor de mezcla completa.

Se tuvieron en cuenta para la selección entre ellos, los parámetros de operación, obtenidos en la revisión bibliográfica de esta investigación y expuestos aquí en la [Tabla 2.1](#).

Tabla 2.1 Principales parámetros de los digestores para sustratos del 1er y 2do grupo.

Digestor	Vida útil (años)	Carga Orgánica (KgSV/m ³ * d)	Remoción (%)	Pv (m ³ /m ³ *d)	Costo (\$/m ³)	Agitación
Chino	20	2	50 máx	0.15-0.2	180	No
Pistón	10	1.7	50-70	0.12-0.3	140	No
Híbridos	20	4	80	1- 1.2	522	Si(biogás)
Mezcla Completa	-	-	60 %	1	-	Si (mecánico)

Pv... Productividad Volumétrica

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta etapa de digestión la selección de los equipos se llevó a cabo asumiendo la existencia de una planta ideal capaz de producir 2 m³/h de biogás equivalentes a 48 m³/d que es la media de producción de biogás de las plantas existentes en el territorio espirituano. Esta estandarización se realizó con el fin de

establecer comparaciones entre las tecnologías lo que fue válido también para el 3er grupo de sustratos.

Para el dimensionamiento de cada digestor:

- Se calculó el volumen de digestor (V_{DIGESTOR}) necesario para generar Q_{gDIA} ($48\text{m}^3/\text{d}$) por la siguiente expresión:

$$V_{\text{DIGESTOR}} = Q_{\text{gDIA}} / P_v \quad (\text{m}^3) \quad (3)$$

Donde:

P_v ... Productividad volumétrica reportada en el capítulo I para cada tipo de tecnología y que se resume en la [tabla 2.1](#) de este capítulo.

- La carga orgánica que puede asimilar cada digestor (CO) en kg SV/d se determinó con el volumen calculado (V_{DIGESTOR}) multiplicado por los datos de la columna III de la [tabla 2.1](#).
- El costo de los digestores se estimó multiplicando el costo en $\$/\text{m}^3$ de digestor reportado en la literatura por el volumen del mismo calculado en (3).

Finalmente se analizaron los restantes parámetros de la [tabla 2.1](#), seleccionando para esta etapa el digestor que mejores beneficios reportó desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Una vez analizadas las alternativas de digestión para los grupos de sustratos 1 y 2 se procedió de forma similar con el 3er grupo.

3er Grupo.

Para los sustratos con contenidos de sólidos en suspensión menores que 2 g/l, los principales digestores reportados en la literatura fueron:

1. Híbridos.
2. UASB
3. RALF
4. RALEF

Se tuvieron en cuenta para la selección entre ellos los parámetros recopilados en la búsqueda bibliográfica de esta investigación tal como muestra la [tabla 2.2](#).

Tabla 2.2 Principales parámetros de los digestores para el 3er grupo de sustrato.

Digestor	Carga Orgánica KgSV/m ³ *d	Remoción (%)	Energía kWh/m ³	Pv (m ³ /m ³ *d)	Costo (\$/m ³)	Agitación
Híbridos	4	80	-	1.2	522	Si(biogás)
UASB	15	80	60	3	1042	No
RALF	16	85	80	6	5000	No
RALEF	20	85	1000	6	-	No

Pv... Productividad Volumétrica

Fuente: Elaboración propia.

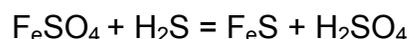
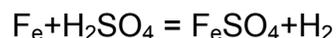
Para el dimensionamiento de estos digestores se siguió un procedimiento similar al anterior pero ahora con los datos de la [tabla 2.2](#), calculando primeramente el volumen de digestor según la ecuación (3) y a partir de este el costo de cada digestor.

Finalmente se establecieron comparaciones entre el resto de los parámetros de la [tabla 2.2](#) seleccionando la tecnología más adecuada en función de aspectos técnicos económicos y ambientales.

2.4.3 Selección de la etapa de purificación para todos los grupos de sustratos.

El primer método de purificación encontrado en los reportes bibliográficos fue la *purificación con compuestos del hierro*. Con el objetivo de conocer las cantidades de materias primas necesarias y las corrientes residuales que se originan al tratar en este equipo 48 m³/d de biogás se realizaron los siguientes cálculos.

- Se utilizó como flujo de entrada de biogás al purificador (Q_g), 2 m³/h ó (Q_{gDIA}) 48 m³/d.
- En el equipo tiene lugar la siguiente reacción química en presencia de limallas de hierro que reponen los iones hierro que se pierden como F_eS.



- Se asume un 3 % de H₂S en el biogás obtenido. (Es el valor máximo reportado en la literatura).

- Se determinó el volumen de H₂S en litros (l) a partir del total de biogás producido Qg_{DIA} tomando como base un día.

$$V(\text{H}_2\text{S}) = 0.03 * Qg_{\text{DIA}} * 1000 \text{ l/m}^3 \quad (4)$$

- Despejando la cantidad de sustancia n(H₂S) en la ecuación (5) se obtuvieron los moles de H₂S que se necesitan eliminar al día.

$$V(\text{H}_2\text{S}) = n(\text{H}_2\text{S}) * Vm \quad (5)$$

Donde:

Vm(H₂S)...volumen molar los gases tomada de tablas(22,4 l /mol)

- La masa de sulfuro de hidrógeno a eliminar en (kg) se determinó por la siguiente expresión:

$$m(\text{H}_2\text{S}) = n(\text{H}_2\text{S}) * M(\text{H}_2\text{S}) / 1000 \quad (6)$$

Donde:

M (H₂S)Masa molar del sulfuro de hidrógeno tomada de tablas (g/mol)

- Aplicando la ecuación (6), pero para el Fe, FeS y FeSO₄, se llegó a la masa de estos compuestos, necesarias para eliminar el 3 % de H₂S, tomando como cantidad de sustancia la calculada para el sulfuro de hidrógeno.
- El costo de este equipo se determinó por la regla del 0.6 tomando como referencia la planta anexa al central Heriberto Duquesne en Remedios, Villa Clara. Con el costo de inversión de la etapa de purificación tomada del Departamento de Presupuesto IPROYAZ, 1998 y con la ecuación (7).

$$\text{Costo} = \left(\frac{\text{Planta}}{\text{Heriberto}} \right)^{0.6} * \text{CostoHeriberto} \quad (7)$$

El segundo método de purificación analizado fue *el biológico* correspondiente a la patente No. CU 23003.

Para el cálculo del costo de esta unidad se utilizó la expresión (7) considerando los costos dados por la autora de la patente para una producción de biogás de 18 m³/d equivalente a \$ 1022.00.

Para la selección se analizó el costo de cada método, los requerimientos de materias prima, la producción de residuos y la eficiencia de remoción.

2.4.4 Selección de la etapa de compresión - almacenamiento para todos los grupos de sustratos.

Compresión - almacenamiento: El sistema de compresión y almacenamiento correspondió a la Patente US 2006/0213370, a experiencias previas y a reportes bibliográficos.

Para calcular el volumen de la bala, se asumió que se necesitaba almacenar un volumen equivalente a toda la producción diaria.

El volumen de dicha bala (V_B) se calculó por la siguiente expresión considerando el gas como ideal. (Hermida, F., 2006)

$$P_0 * Q_{g_{DIA}} = P_B * V_B$$
$$V_B = \frac{P_0 * Q_{g_{DIA}}}{P_B} \quad (m^3) \quad (8)$$

Donde:

P_0 Presión de entrada del biogás a la bala. (Muy cercana a 1 atm)

$Q_{g_{DIA}}$...Volumen de biogás que entra a la bala en un día. (m^3)

P_BPresión de trabajo de la bala. (atm)

El costo de los equipos se determinó por la expresión (7) mediante datos tomados de la proyección de una planta de 25 m^3 de capacidad reportada por Grupo Nacional de Biogás, MINBAS, 2007. (Anexo 3)

2.4.5 Selección de la etapa de generación de energía eléctrica para todos los grupos de sustratos.

Las tecnologías para la generación de energía eléctrica fueron tomadas de las referencias bibliográficas (tabla 1.2, Capítulo I). Para la selección de esta etapa se analizaron como tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir del biogás como combustible:

- Motores de combustión interna.
- Turbinas de vapor
- Turbinas de gas.

Procedimiento de cálculo del costo de estas tecnologías.

Como mencionamos anteriormente, se utilizó la [tabla 1.2](#) reportada por [A. Marcos, B. Anibal, P. Inocente, 2003](#), que quedó expuesta en el capítulo 1 de esta investigación

para completar las columnas de la [tabla 2.3](#) en la que se obtuvo el costo en \$ de cada unidad de generación.

Tabla 2.3. Parámetros necesarios para el cálculo del costo de las unidades de generación

Tecnologías	Qg (m ³ /h)	Pc (Kcal/m ³)	Ng (kw)	N _R (η * kw)	Costo (\$)
Turbina de vapor					
Motores diesel					
Turbina de gas					

Se calculó el flujo de biogás (Qg) en (m³/h) a alimentar a las unidades de cogeneración. Se asumió que los 48 m³ de biogás que se generan en 1 día tienen que ser consumido en las horas de duración del horario pico (t_{PICO} en h/d).

$$Qg = Qg_{DIA} / t_{PICO} \quad (9)$$

Se tomó como poder calórico (Pc) del biogás 5500 kcal/m³ que está dentro del rango dado por (Werner, J., 1989) y que se reporta en el capítulo I.

Se calculó la potencia que es capaz de entregar el combustible por la siguiente ecuación(16):

$$Ng = Qg * Pc * \frac{1,163W}{1kcal/h} * \frac{1kw}{1000W} \quad (10)$$

Se determinó la potencia eléctrica de cada unidad (N_R) en kw, a partir de Ng y la eficiencia eléctrica η (tomada de la del capítulo I como el valor medio de los valores dados para cada tipo de tecnología).

Con este valor de N_R se buscó en la [tabla 1.2](#) del capítulo I el costo en \$/kw que le correspondió, para determinar el costo neto de cada unidad en \$, multiplicando ambos valores.

Pero el hecho de que unas tengan mayor costo que otras no fue suficiente para la selección, por lo que se determinaron los ingresos que reportó cada una de ellas, por concepto de energía eléctrica generada, completando la [tabla 2.4](#).

Tabla 2.4 Ingresos de cada unidad de generación de energía eléctrica.

Tecnologías	Eg (Kwh./d)	Eg (Kwh/año)	Ingresos (\$/año)	PSRI
Turbina de vapor				
Motores diesel				
Turbina de gas				

Procedimiento de cálculo de los ingresos de cada unidad de generación.

Con la potencia eléctrica calculada anteriormente se determinó la energía generada (Eg) en un día en kwh/d en las cuatro horas del horario pico por la siguiente expresión:

$$Eg = Ne * t_{PICO} \quad (11)$$

A partir de esta Eg se buscó la Eg/a dada en kwh/a, asumiendo que se trabajan los 365 d/a. Los ingresos (I) fueron calculados considerando un precio de venta del kwh generado de 0.056 \$ con un factor de combustible de 1.8.

Se calculó el periodo simple de recuperación de la inversión (PSRI) en cada una de las unidades de generación de energía eléctrica. Este indicador no refleja con exactitud el tiempo de recuperación de la inversión del equipo porque en él no se considera el cambio del dinero en el tiempo, pero es útil para establecer comparaciones entre las distintas tecnologías y se define como la relación entre el costo del equipamiento y sus respectivos ingresos anuales (I) como muestra la ecuación (12).

$$PSRI = \text{Costo equipamiento} / I \quad (\text{años}) \quad (12)$$

2.5 Estimado preliminar del costo de inversión.

Con el objetivo de conocer la repercusión de cada etapa del proceso en el costo de inversión de la planta, se debe realizar un estimado preliminar del mismo reajustándolo para reducir el costo de adquisición del equipamiento de la planta en general.

2.6 Elaboración de las propuestas tecnológicas.

Finalmente se conforman las propuestas tecnológicas uniendo cada una las etapas seleccionadas previamente para cada grupo de sustrato.

2.7 Proceso de adaptación. (Figura 2.1. 2da parte)

Una vez confeccionadas las propuestas tecnológicas se debe proceder a la adaptación de las mismas a un escenario. En esta investigación se utilizó como estudio de caso la granja Remberto Abad Alemán, donde fue necesario estimar el potencial de residuos biodegradables de la granja (sustratos) y los posibles consumidores energéticos para establecer su correspondencia o no con una de las tres propuestas realizadas.

2.7.1 Determinación de los sustratos existentes y los principales consumidores energéticos de la granja.

Esta etapa constituye un aporte a la estrategia de [Ley, N., 2006](#) en ella se debe realizar un trabajo de campo para la estimación del potencial de sustratos y la demanda de energía existente, se recomienda la utilización de una planilla confeccionada para esta investigación de conjunto con especialistas en el tema de la producción de biogás ([Anexo 4](#)). Esta permitirá:

- Estimar el potencial de sustratos existente.
- Localizar los posibles consumidores energéticos.
- Estimar la demanda de energía de estos consumidores.
- Analizar los posibles usos del efluente líquido y del bioabono.
- Obtener un croquis del lugar.
- Proponer ubicación de la planta.

Estimación del potencial sustratos.

Esta etapa del proceso puede cambiar de un escenario a otro. Para los sustratos encontrados en la granja el procedimiento se describe a continuación.

Excreta porcina: (anexo 4)

- Se determinó el número de animales (No A) y el peso promedio (Pprom) por clases según su tamaño como sementales, ceba, preceba, reproductoras, crías y cochinitos.
- Se utilizó un índice (I) del 5 % del peso vivo por día (Savran, V., 2005 y Hermida, F., 2006) para cada clasificación y por la siguiente expresión se obtuvo la masa de excreta porcina por clase de animal (Mclase) en kg/d las que al sumarlas dio como resultado la masa total de excretas porcinas (Mt) también en kg/d.
- $M_{clase} = No A * 0.05 * P_{prom}$. (13)
- $M_t = \sum M_{clase}$ (14)
- A partir de aquí se aplicó el 20 % a la Mt para obtener los Kg de Sólidos volátiles (MSV) al día contenidos en la masa de excreta fresca (Savran, V., 2005 y Hermida, F., 2006).
- Para la estimación del gasto de agua se consideró una relación 3:1 agua-excreta (Savran, V., 2005 y Hermida, F., 2006), estimándose la masa de agua (Magua) en kg/d.
- Se sumó posteriormente la excreta total (Mt) y el agua gastada lo que proporcionó el flujo diario total de residuos porcinos. (M_{R1})

Excreta vacuna. (Anexo 4)

- Se utilizó un procedimiento diferente al de las excretas porcinas. Primeramente se utilizó el índice por clase de animal (Ic) de 5, 8 y 10 kg de excreta/animal*d para terneros, novillas y vacas respectivamente. (Índices, 2006).
- Se consideró además que el tiempo de estabulación fue de 12 h, es decir medio día, por lo que la expresión para el cálculo de la masa de cada clase (Mclase) en

kg/d se afectó por el factor 0.5 y al sumarlas dieron como resultado la masa total de excretas vacunas (Mt) también en kg/d de la siguiente forma:

- $M_{clase} = N_o A * I_c * 0.5$ (15)

- $M_t = \sum M_{clase}$ (16)

- Una vez obtenida la masa de excreta (Mt) se calculó la cantidad de agua considerando una relación 1: 3 Mt: Magua. (Índices, 2006),(Savran, V., 2005) y (Hermida, F., 2006).
- Estimándose finalmente la masa de residuales provenientes de las excretas vacunas (M_{R2}) como la suma de Mt y Magua.
- Los kg de sólidos volátiles por día que van en las excretas se estimaron por el mismo procedimiento y con los mismos índices que para las excretas porcinas.

Excretas ovino-caprino. (Anexo 4)

- Se utilizó el mismo procedimiento que para las excretas vacunas cambiando solamente el índice, que osciló entre 4-5 Kg. de excreta húmeda/animal*d según el peso de cada clase de animal, (sementales, reproductoras, crías y jóvenes) asumiendo un tiempo de estabulación de 12 h también y utilizando las expresiones (15 y 16) para el cálculo de M_{clase} y Mt. (Índices, 2006).
- Se asumió además, un 20 % de Kg. de SV (Savran, V., 2005 y Hermida, F., 2006). y una relación excreta agua de 1:3 Mt: Magua tal como para las excretas vacunas, obteniéndose finalmente la masa total de residuales provenientes de las excretas ovino-caprinas en kg/d. (M_{R3}) (Índices, 2006).

Residuos de cosecha. (Anexo 4)

- Se determinaron las producciones de cada uno de los cultivos (P_{cult}), asumiendo sus índices de desechos (Id) en % entre el 5-80 %. (Dpto agropecuario CUSS)
- Se cálculo la masa de cada residuo agrícola M(RA) en kg/a por la siguiente expresión:
- $M(RA) = (P_{cult}) * (I_d)$ (17)

- Y se estimó la cantidad de cada uno de ellos generada por mes teniendo en cuenta los planes de siembra y cosecha obteniéndose kg/mes y así de dividir por 30 los kg/día. (M_{R4})
- Se asumió un 20 % de sólidos totales en M_{R4}
- Los kg SV en los residuos de cosecha se asumieron como el 90 % de los ST de esta corriente.

Con estos resultados se pudo obtener el flujo de la mezcla de sustratos que alimentó al digester en kg/d (M_{MS}) según la siguiente expresión:

$$M_{MS} = M_{R1} + M_{R2} + M_{R3} + M_{R4} \quad (18)$$

Y en función de estos residuos se determinó adaptar al caso de estudio una de las tres propuestas realizadas previamente.

Posibles consumidores de energía.

Comedores:

Con el número de comensales (Ct) se puede determinar el volumen de gas necesario para la cocción de alimentos del almuerzo en cada uno de los comedores: (Hermida, F., 2006)

$$V = 7.08 + 0.073 Ct \quad (m^3/d) \quad (19)$$

Consumo de energía eléctrica.

Se estimó el consumo mensual promedio en el año 2006 en Mwh/mes. (Tomado del departamento comercial empresa eléctrica S.S) y teniendo en cuenta que 1 m³ produce 2.23 kWh se determinó la cantidad de biogás que consumiría un motor de combustión interna (MCI) para generar dicha energía.

2.7.2 Selección de la propuesta tecnológica correspondiente.

En esta etapa, se debe verificar si alguna de las propuestas tecnológicas realizadas para los grupos de sustratos del territorio se corresponde con el escenario del estudio de caso. De cumplirse esta condición se procederá al análisis de los elementos que hacen posible una mejor adaptación de la tecnología, sino habrá que regresar a la

etapa 1: Inicio del proceso, y comenzar con la aplicación de la estrategia con los nuevos sustratos encontrados o escoger un nuevo escenario.

2.7.3 Elementos que hacen posible una mejor adaptación tecnológica.

Entre los elementos a considerar para una mejor adaptación deben incluirse:

1. El cumplimiento de los factores de la transferencia tecnológica: Aptitudes del personal, accesibilidad y Fortaleza para construir fábricas, capacidad para hacerlas funcionar y el acceso al equipamiento necesario ya sea para construirlos como para adquirirlos.
2. El cumplimiento de las premisas de una buena **localización** analizándose: La localización del residual como aspecto determinante en la ubicación de la planta de biogás, la localización de los posibles consumidores energéticos, el aprovechamiento de las condiciones del terreno (Relieve) y la localización de fuentes de abasto de agua.
3. Requerimientos de energía e instalaciones y el cumplimiento de factores técnicos, económicos y ambientales: Se incluyeron dentro de la etapa de desarrollo del proceso pues estuvieron muy ligados a este.

2.8 Desarrollo del proceso.

Aquí se incluyen los aspectos de la ingeniería de procesos y diseño, en esta no se persigue investigar y buscar nuevos conocimientos, sino utilizar los ya establecidos en las propuestas tecnológicas realizadas e integrarlos en la búsqueda de la solución del problema en cuestión en la que se incluyeron los siguientes acápite.

2.8.1 Diagrama de flujo del esquema tecnológico.

Se utilizó el diagrama de flujo de la propuesta tecnológica correspondiente. Para el mismo se calcularan ahora mediante herramientas de la ingeniería y el análisis de procesos las corrientes de entrada y salida así como los requerimientos de energía y materiales en cada una de las etapas.

2.8.2 Diseño preliminar de la planta.

Para esto se procedió a la definición primaria de las especificaciones de los equipos y otros elementos del sistema que en el caso específico de la propuesta tecnológica 2 se realizó siguiendo los procedimientos siguientes.

Molino de cuchillas.

- Se asumió como tamaño de partícula requerido a la salida 3mm.
- La masa de residuos a procesar en el molino (Mmol.) en kg/s se determinó a partir de la cantidad máxima de estos generados en un mes (Anexo 4) y teniendo en cuenta un tiempo de operación de 2 h.

- Para esto se utilizó la siguiente expresión:

$$Mmol = M(RA) * 1d / 2h * 1h / 3600s \quad (\text{kg/s}) \quad (20)$$

- En función de estos dos valores se determinó según Peter, M. S., 2003 la potencia según ecuación (21): (Peter, M. S., 2003).

$$P = 300 * M_R \quad (\text{Kw}) \quad (21)$$

- El costo del equipo se determinó con la potencia calculada y la ecuación (22)

$$CostoDeseado = \frac{\text{ÍndiceActual}}{\text{Índice2003}} * \left(\frac{Q_{TRABAJO}}{Q_{CONOCIDO}} \right)^{0.6} * CostoConocido \quad (22)$$

Donde:

El índice actual fue de 517 para marzo del 2007 buscado en la revista Chemical Engeneer y el del 2003 proveniente de la misma fuente fue 402.

$Q_{CONOCIDO}$...Flujo de trabajo del equipo para el cual el costo de inversión es conocido.

$Q_{TRABAJO}$ Flujo de trabajo del equipo para el cual el costo de inversión se desea calcular.

Se trabajó como equipo conocido con un molino de cuchillas rotatorio de 1 kg/s de capacidad y su costo se determinó en la figura 12-74 del Peter. (\$10 000.00)

El consumo diario de energía (E_c) en kWh/d, considerando 2 h de operación, se determinó:

$$E_c = P * 2h \quad (23)$$

Tanque con agitador:

- Se asumió un proceso de mezclado continuo durante el tiempo de alimentación al digestor (2 h dos veces al día).
- El volumen del tanque se calculó teniendo en cuenta el almacenamiento del flujo de 1 hora de trabajo y sus dimensiones se determinaron por la siguiente expresión asumiendo una altura $h = 2$ m.
- $V = \pi * r^2 * h$ (m³) (24)
- El costo del tanque se determinó según la regla de 0.6 utilizando como referencia un tanque de fibra de 35 m³ y \$ 5 600.00 tomado de plan de inversiones 2008 “Refinería Sergio Soto”.
- Se propuso un agitador de hélice, que según Rosabal, J., 1998 proporcionan altas turbulencias, son de bajos consumos eléctricos y muy baratos con $n = 300$ rpm, que está dentro del rango de valores recomendados para este tipo de agitadores.
- La potencia del agitador también se determinó según Rosabal, J., 1998, calculándose primeramente el porcentaje de sólidos totales de la mezcla (% ST_{mezcla}) utilizando el siguiente procedimiento.

Cálculo del % de sólidos totales en la mezcla.

- Primeramente se determinó el porcentaje de sólidos totales (% ST) de cada corriente mediante la siguiente expresión:
- %ST= 100 - %Hdad (25)
- Esto se realizó para cada una de las excretas frescas considerando en ellas un 75 % de Hdad y al sumarlas se obtuvo la cantidad de sólidos totales de la mezcla de excretas en kg/d. (ST_{EXCRETAS}).
- Para los residuos de cosecha frescos se asumió un 80 % de Hdad y luego con este valor se determinó el % ST_{VEGETALES} por la ecuación (25) que al sumarlos con los anteriores se obtuvieron los ST_{mezcla}.
- Obteniéndose finalmente mediante (26) el % ST de la mezcla.

$$\% ST_{mezcla} = ST_{mezcla} / M_R \quad (26)$$

Donde:

M_R Masa de la mezcla de residuales calculada anteriormente.

- La densidad y viscosidad de la mezcla determinó según, (Peter, M. S, 2003)., (Rosabal, J., 1998) y (Pavlov, K., 1981) .

$$\rho_s = \frac{1 + \%ST}{\frac{\rho_p}{\rho} + \frac{1}{\rho}} \quad (27)$$

Donde:

ρ_s Densidad de la suspensión. (kg/m³)

ρ_p Densidad del sólido. (2200 kg/m³) (Sosa, R., 1999)

ρ Densidad del medio continuo. (agua) (1000 kg/m³)

- Se necesitó además del cálculo de la fracción volumen de sólidos (φ) y la viscosidad en la suspensión (μ_s) mediante (28) y (29).

$$\varphi = \frac{\%ST * \rho}{\rho_p - (\rho_p - \rho) * \%ST} \quad (28)$$

$$\mu_s = \mu(1 + 2.5 * \varphi) \quad (29)$$

μ Viscosidad del medio continuo en (0.8 * 10⁻³ Pa*s)

- Finalmente se calculó Re_m por la expresión (30) y K_N por la (31).

$$Re_m = \frac{d^2 * n * \rho_s}{\mu_s} \quad (30)$$

d.....diámetro del agitador (D/d=3)

$$K_N = \frac{c}{Re^m} \quad (31)$$

c y m... tomados de tabla XXI del Pávlov como 0.985 y 0.15 respectivamente para agitadores de hélice.

Como K_N se pudo determinar también por:

$$K_N = \frac{N}{\rho * n^3 * d^5} \quad (32)$$

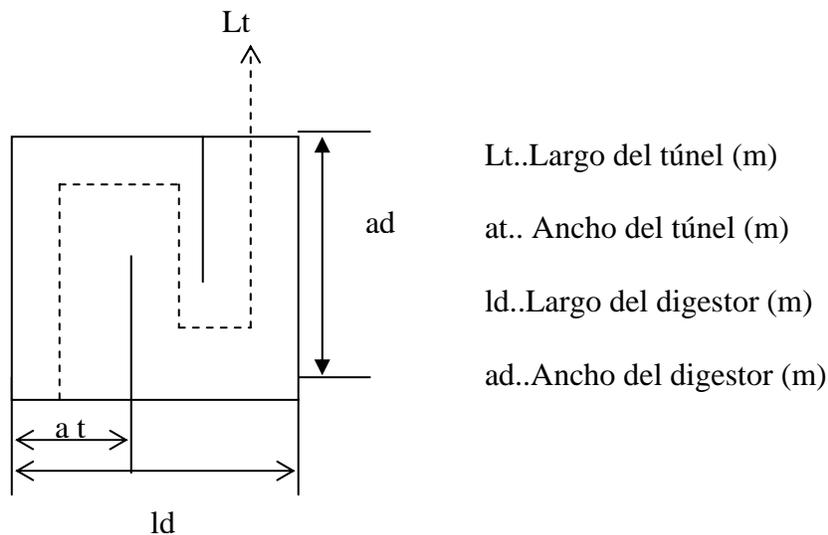
Entonces despejando en (32) se obtiene la potencia necesaria para la agitación. (N)

El costo del agitador para la potencia requerida se estimó según, [Peters, M. S., 2003](#) actualizándose con los índices de la Chemical Engineer.

Digestión.

Para el dimensionamiento de este equipo se escogió un procedimiento publicado ([Hermida, F., 2006](#)) para el diseño preliminar de los digestores híbridos, que es la etapa de digestión correspondiente a la propuesta tecnológica 2. ([Figura 2.3](#)).

Figura 2.3. Vista superior de un digestor Híbrido.



1. Se consideró la Intensidad de carga.(I)

$$I = 4KgSV / m^3 \text{ digestor} * d$$

2. Se consideró el tiempo de retención hidráulico $TRH \leq 30d$ para garantizar el 85% de remoción de los sólidos volátiles de la mezcla de sustratos.
3. Se determinó el volumen del digestor en m^3 (V_{digestor}) por la siguiente expresión afectando la masa de sólidos volátiles por 0.85 que es el porcentaje de estos que se remueven en este tipo de digestor.

$$V_{\text{digestor}} = \frac{MSV * 0.85}{I} \quad (33)$$

4. La altura máxima se consideró $h \leq 3.00$ m.

Condición (1)

5. Se consideró como velocidad límite del residual biodegradable en m/h (V_1) para garantizar un buen contacto entre los microorganismos y el sustrato.

$$V_1 \leq 10 \text{ m/h} \quad \text{Condición (2)}$$

Esta fue calculada para un tiempo efectivo de carga (4 h) según:

$$V_1 = \frac{Q_{MS}}{A_{FLUJO}} \quad (\text{m/h}) \quad \text{donde :} \quad (34)$$

$$A_{FLUJO} = at * h \quad (\text{m}^2)$$

$$Q_{MS} = \frac{M_{MS} * 1d/4h}{\rho_s} \quad \text{flujo en } \text{m}^3 / h \quad (35)$$

at recomendada 1.5 m.

6. El régimen de flujo (Re) se determinó según se muestra:

$$Re = \frac{\rho_s * V_1 * deq}{\mu_s} \lll 2300 \quad \text{Condición (3)}$$

Donde:

deqFue el diámetro equivalente de la sección rectangular del túnel calculada como:

$$deq = 4 * A_{FLUJO} / 2*(at+h)$$

7. La presión máxima recomendada en la cámara de gas del digester fue de $Pr < 200$ mm H₂O y el autor del procedimiento propuso un sello hidráulico en la parte superior de este para alcanzar ese fin.

8. El volumen del digester también se pudo determinar como:

$$V = AB * h = at * Lt * h$$

9. Donde despejando se obtuvo que:

$$Lt = V/at * h \quad (\text{m}) \quad (36)$$

10. Luego se comprobó la condición (4) la cual de no cumplirse se necesita la suposición de nuevos valores de at y h y reiniciar el procedimiento.

$$deq \leq \frac{Lt}{10} \quad \text{de donde: } deq = Lt/10 \quad \text{Condición (4)}$$

El costo del digester se calculó considerando 522 \$/ m³ de digester e incluyó los gastos totales de la inversión que dividido 4.1 brindó el costo de adquisición del equipamiento en esta etapa. (Ulrich, G. D., 1990)

Comprobándose finalmente el cumplimiento de las cuatro condiciones y tabulándose las dimensiones para este digester en correspondencia con la figura 2.3.

Como este tipo de plantas tienen una Pv que oscila entre 1-1.2 m³ de biogás/ m³ de digester*d se pudo determinar la cantidad de biogás producida como:

$$Q_{\text{BIOGÁS}} = P_v \cdot V_{\text{digester}} \quad (\text{m}^3/\text{d}) \quad (37)$$

La cantidad de bioabonos producidos en kg/d ($M_{\text{BIOABONOS}}$) de esta etapa se determinó como el 30 % de la materia fresca que entra al digester (excretas y residuos de cosecha) (Hermidas, F., 2006) y se asumió que 1 t reporta 270 \$ según datos de la agricultura urbana en Sancti Spíritus.

Etapa de purificación: (Método biológico)

1. Se calculó el flujo de aire necesario (Q_{AIRE}) como el 3 % del $Q_{\text{BIOGÁS}}$ calculado y con este se determinó el costo del soplador teniendo en cuenta la regla de 0.6. Tomando como referencia el costo de \$ 25.00 que el autor de la patente calcula para un soplador de 1 l/min con una potencia de 100 W y 110 V.
2. El costo del rotámetro se buscó también por los datos del inventor de la patente actualizándose con los índices de costos correspondientes.
3. Se tomó una eficiencia de remoción de H₂S del 92 % con un tiempo de contacto de 30 min.
4. El volumen del gasómetro o tanque purificador se determinó por la siguiente expresión:

$$V_{\text{gasómetro}} = Q_{\text{BIOGÁS}} \cdot (1\text{d}/24\text{h}) \cdot (1\text{h}/60\text{min}) \cdot 30\text{min} \quad (38)$$

5. El costo del gasómetro y del depósito para el residuo se estimó a partir de los datos que brinda el inventor de la patente y utilizando la regla del 0.6.

Compresión - Almacenamiento:

1. El compresor se dimensionó para el flujo de trabajo de la planta ($Q_{\text{BIOGÁS}}$) y con este valor se buscó el costo del equipo y la potencia requerida según Peters, M. S. 2003.

- Para el cálculo del volumen de la bala en m^3 (V_{BALA}) se tuvo en cuenta la necesidad de almacenar el biogás que se consume en los comedores más los m^3 que se generan en horario nocturno (tiempo en que no operan los grupos electrógenos). Este volumen se determinó en función de la presión en la descarga del compresor considerando al gas como ideal a temperatura constante.
- El costo se pudo determinar también por la regla del 0.6 utilizando el costo de una bala de $3 m^3$ de capacidad ([anexo 3](#)) (Grupo Nacional de Biogás, MINBAS, 2007).

Generación de energía eléctrica.

- Se asumió la operación de este motor de combustión interna durante 16 horas al día en dos turnos de operación y con este tiempo (t) se calculó el flujo de biogás que se alimenta al mismo en m^3/h (Q_{MCI}). Tomando como Q_{gDIA} la diferencia entre el gas producido por la etapa de digestión y el gas consumido en los comedores.

$$Q_{MCI} = Q_{gDIA} / t \quad (39)$$

- Con esto se determinó el costo del equipo y la potencia a instalar completando la [tabla 2.4](#) mediante el mismo procedimiento que se utilizó en la elaboración de las propuestas y que se expone en este capítulo considerando ahora únicamente a los MCI.

Tabla 2.4. Cálculo del costo de los MCI según la cantidad de biogás alimentado.

Tecnologías	Q_{MCI} (m^3/h)	P_c (Kcal/ m^3)	N_g (kw)	N_R ($\eta * kw$)	Costo (\$/kw)
Motores diesel					

- Se tomó como poder calórico (P_c) del biogás $5500 \text{ kcal}/m^3$ que está dentro del rango dado por ([Werner, J., 1989](#)) y que se reporta en el capítulo I.
- Se calculó la potencia que es capaz de entregar el combustible por la siguiente ecuación(40):

$$N_g = Q_{MCI} * P_c * \frac{1,163W}{1kcal/h} * \frac{1kw}{1000W} \quad (40)$$

- Se determinó a partir de N_g y con la eficiencia eléctrica η (tomada de la [tabla 1.2](#) del capítulo I como el valor medio de los valores dados para este tipo de tecnología) la potencia eléctrica de la unidad (N_R) en kw.
- Con este valor de N_R y los datos sobre el costo de la tecnología en \$/kw que se obtuvo interpolando para el valor de potencia deseado, también tomados en la [tabla 1.2](#) del capítulo I, se obtuvo el costo neto del equipo.
- Finalmente se calculó multiplicando la potencia calculada N_R por las horas de operación la energía eléctrica que pudiera producir y se determinó además con el Q_{MCI} y utilizando como índices 2.23 kwh eléctricos y 3.33 kwh térmicos por m^3 de biogás para comparar ambas fuentes bibliográficas.

De esta manera quedó dimensionada la planta en su totalidad pasando al análisis preliminar del efecto ambiental mediante un método de minimización de impactos basado en el estudio del proceso como caja negra.

2.8.3 Análisis preliminar del efecto ambiental. (DAOM, 2000).

Esta etapa constituye otro de los aportes del presente trabajo a la estrategia de Ley, N., 2006. La misma tiene como fin la minimización del impacto ambiental causado por las corrientes de entrada y salida del proceso para esto se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Flujos de cada una de las corrientes: Estableciendo un diagrama de cajas negras.
- Posibles interconexiones entre las corrientes de entrada y salida que se generan en el proceso.
- Efecto de cada corriente residual sobre el medio ambiente.
- Otros efectos al medio ambiente de la aplicación de la propuesta. (Ruido, movimientos de tierra, y generación de corrientes residuales.)
- Requerimientos de materias primas y energía.

2.8.4 Evaluación económica final y análisis de sensibilidad.

Determinación del Capital Total Invertido.

Finalmente, debe realizarse la evaluación económica del estudio de caso y el análisis de sensibilidad del mismo para lo que se recomienda primeramente calcular el capital total de invertido mediante los siguientes pasos:

- Cálculo del costo de adquisición de los equipos (CA) que se obtuvo como la suma de los costos de cada equipo determinado durante el dimensionamiento de cada etapa ([Anexo 5](#)).
- Se consideró una vida útil para la instalación de 10 años.
- Posteriormente determinar el capital total invertido. (CTI). Que pudo determinarse como la multiplicación de factor Lang (4.1 para plantas que manejan sólidos y líquidos) ([Ulrich, G. D., 1990](#)) por el costo de adquisición de los equipos.

Determinación del Costo Total de Producción.

La determinación del costo de operación se basó en la metodología descrita en [Peter, S., 2003](#). Se utilizaron hojas de cálculo de Microsoft Excel en ambiente de Windows XP que tuvieron en cuenta las siguientes expresiones.

$$CTP = C_{Fab} + GG$$

$$C_{Fab} = CD + CF + Sup$$

Donde:

CTP: Costo Total de producción.

CFab: Costo de fabricación.

CD: Costos directos.

CF: Cargos fijos.

Sup: Supervisión.

GG: Gastos generales.

Los índices y aspectos utilizados para el cálculo de cada uno de los elementos del CTP, se muestran en el [anexo 6, Tablas 1, 2, 3 y 4](#).

Los gastos de mano de obra fueron calculados con los datos que brindó la [tabla 1](#) de ese [anexo](#) y las utilidades incluyeron los consumos de energía de cada una de las etapas del proceso determinadas durante el dimensionamiento de las mimas. No se incluyeron los costos por concepto de materias primas suministradas debido a que ellas fueron únicamente los sustratos de la granja.

Determinación de los Ingresos y gastos evitados.

Mediante la suma de los ingresos y los gastos evitados se determinaron los ingresos netos de la planta, los primeros se calcularon tal como sigue:

Cálculo de los Ingresos.

Para el cálculo de los ingresos a obtener de la aplicación de la propuesta en el estudio de caso se tuvieron en cuenta.

- Las ventas de energía eléctrica al SEN a un costo promedio de 41.40 \$/ MWh y un factor de precio del combustible de 1.8. (Dpto Comercial empresa eléctrica S.S).
- La ventas de bioabonos a un precio de 270.00 \$/t. (Dpto economía de la agricultura urbana S.S).

Cálculo de los Gastos evitados.

Para su cálculo se tuvieron en cuenta la sumatoria de los siguientes aspectos.

- Se evita el consumo de cierta cantidad de fuel oil en grupos electrógenos que consumen a razón de 220 g/kwh, con un costo de 90.00 \$/barril.
- Se evita la producción de energía térmica mediante combustibles convencionales.
- Ahorros por sustitución de combustible para la cocción.
- Ahorros por reuso de agua para el riego con un costo de 0.10 \$/l. (Dpto Aprovechamiento del agua. Hidráulica S.S)
- Se eliminan vertimientos de residuales con impuestos de 0.02 \$/m³. (Dpto Aprovechamiento del agua. Hidráulica S.S)

Otros ingresos.

Estos no fueron tomados en consideración por la falta de elementos para su determinación.

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y de metano.
- La eliminación de carga orgánica contaminante.

Determinación de los indicadores dinámicos.

A partir de los cálculos del CTI, CTP e ingresos de la planta se determinaron los indicadores económicos para la evaluación de proyectos VAN, TIR y PRI. Para esto se utilizó como tasa de impuesto sobre las ganancias un 35 % y como tasa de descuento (D) un 15 %.

2.8.4-1 Análisis de sensibilidad.

Para su realización se realizó un diseño factorial de tres variables a dos niveles 2^3 , donde se asumieron como variables el precio de venta de la energía eléctrica, de los bioabonos y el CTI. Suponiendo valores un 10 % por encima y por debajo de los utilizados como valores máximos y mínimos, conformándose 8 condiciones experimentales. (Anexo 7).

Para estas condiciones se calcularon y graficaron los indicadores económicos de los casos pesimistas y los optimistas. Posteriormente se analizó la sensibilidad a los cambios de cada una de las variables definidas.

Concluyendo finalmente si la propuesta se adaptó o no al caso de estudio de la granja Remberto Abad Alemán.

Conclusiones parciales.

- Se propone un procedimiento de trabajo para la implementación de plantas de biogás con fines energéticos, que tomando como base la estrategia de Ley, N., 2006 para asimilar tecnologías de plantas químicas, lo modifica y amplía.
- Se le incorpora a la referida estrategia los aspectos referidos a la selección de los sustratos dentro de un territorio, como vía para identificar los potenciales de producción de biogás y las tecnologías que puedan implementarse.
- Se amplía además la estrategia con la inclusión del análisis del efecto ambiental y del tipo de sustrato en la selección de las etapas tecnológicas.

- Se propone además utilizar el análisis de escenarios para la selección de la propuesta tecnológica en función del tipo de sustrato, lo que posibilita el análisis de más de una solución para cada caso.
- Se propone también utilizar herramientas de diagnóstico ambiental para estudiar el efecto esperado de la planta en la etapa de desarrollo del proceso.

CAPÍTULO III. Análisis de los resultados.

En este capítulo se desarrollan los pasos de la estrategia descrita anteriormente y se da cumplimiento tanto al objetivo general como a los específicos trazados para esta investigación, elaborándose tres propuestas tecnológicas que incluyeron las etapas de pretratamiento de los sustratos, digestión anaerobia, purificación, compresión – almacenamiento y generación de energía que fueron definidas como necesarias en un proceso de producción de biogás con fines energéticos.

3.1 Desarrollo de la estrategia para la transferencia tecnológica de un proceso de producción de biogás con fines energéticos.

3.2 Inicio del proceso.

En esta etapa se asumió la existencia de la necesidad tecnológica a partir de los aspectos descritos en el capítulo II. Sin embargo, la realización de propuestas tecnológicas para la producción de biogás con fines energéticos debe partir del conocimiento de los sustratos.

3.2.1 Selección de los sustratos.

Un diagnóstico preliminar sobre el potencial de residuos biodegradables, realizado en el artículo “***La producción de biogás a partir de desechos pecuarios y agroindustriales: una alternativa energética***” de la autora **López, L., 2006**, reportó que a partir de estos se podrían producir cerca de 80 549 777.03 m³ de biogás /a equivalente a 36 900 tep/a, que podrían cubrir el 55% de la demanda eléctrica del territorio y generar además, 267.9 GWh de energía térmica para uso en procesos industriales o para cubrir otras como necesidades como el calentamiento de agua. En el mismo se plasmó que los residuos con mayor potencial para producir biogás son los pecuarios aunque los agrícolas y los industriales representaron cantidades apreciables también. (Tabla 3.1)

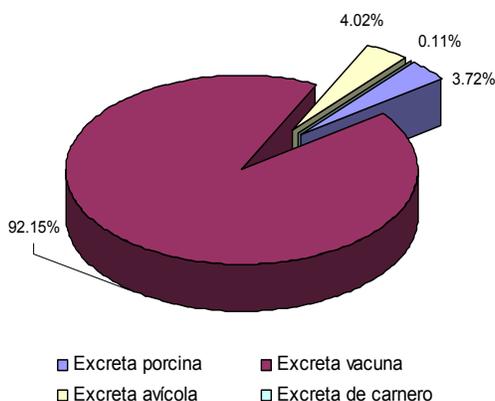
Tabla 3.1 Estimado del potencial de biomasa en Sancti Spíritus.

RECURSO	Biogás (m ³ /a)	%
PECUARIO	50 378 500.12	63%
AGRÍCOLA	7 096 434.91	9%
INDUSTRIAL	23 074 842	29%

Fuente: López, L., 2006.

Dentro del recurso pecuario las excretas vacunas generadas aportaron el 92.15 % (Figura. 3.1). Este reporte no tuvo en cuenta que este resultado pudo ser engañoso debido a las formas actuales de pastoreo intensivo, la estabulación solamente en el horario nocturno y las malas condiciones de los pisos en los centros de estabulación que no garantizan la recolección de la totalidad de la excreta quedando la mayor parte de estos residuos en los campos.

Figura 3.1. Fracción de excretas por animal.



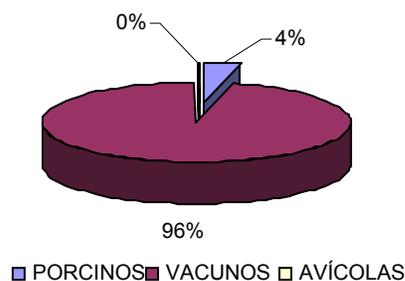
Fuente: (López, L. 2006)

El segundo lugar, estuvieron las excretas avícolas con un 4.02 %, estas excretas pudieran ser recolectadas pero los ruidos, la humedad que puede ocasionar la limpieza y la manipulación influyen sobre el rendimiento y la salud de las crías por lo que su aplicación estaría limitada solamente a granjas específicas. Le siguió a este recurso en este mismo reporte los residuales porcinos con un 3.72 % muy cercano al anterior, pero con mejores condiciones en cuanto a la recolección de la excreta pues este residual

altamente agresivo por disposiciones del CITMA, ha tenido como premisas la clausura de aquellos centros cuyos residuales no cuenten con lagunas facultativas, además la estabulación de este tipo de crías se realiza durante las 24 horas del día, lo que indicó que este cálculo fue mucho más certero que los demás. Ya en un cuarto puesto estarían los residuos de la cría del ganado ovino-caprino y que la autora reportó como carneros, los cuales representaron un 0.11 % que es un valor muy bajo respecto a las restantes y además sus condiciones de estabulación son muy similares a las del ganado vacuno.

Algo similar se pudo observar en el reporte **“Informe del potencial de biogás en Sancti Spiritus”** realizado por el **CITMA, 2006** quienes estimaron una producción total de biogás 3 veces superior a la del estudio anterior. En este estudio al igual que en el anterior las excretas vacunas reportaron la mayor parte del potencial, seguido de las porcinas con fracciones similares. (Figura 3.2). Por lo que en función de los volúmenes de gas que de ellos se pueden generar se decidió trabajar con las excretas vacunas y porcinas para la realización de este trabajo.

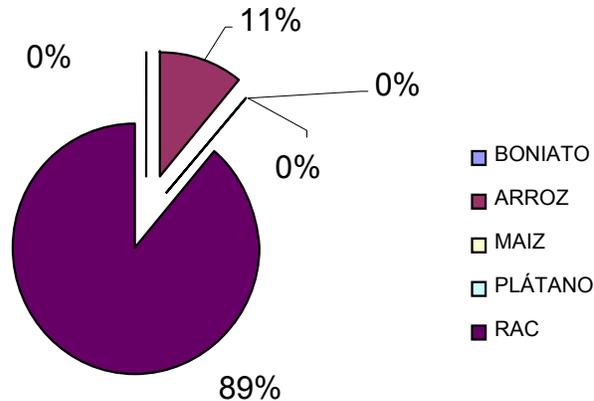
Figura 3.2. Fracción excretas por animal.



En cuanto a los residuos agrícolas estos solamente fueron reportados por **López, 2006**, en este reporte el potencial de biogás que se puede generar a partir de los residuos de la cosecha de la caña (RAC) fue superior al resto siendo 8 veces superior a los residuos del cultivo del arroz (residuos que no se utilizan como alimento animal) y para el resto de la producciones se evidenció que sus porcentajes respecto al total fueron

prácticamente nulos (Figura 3.3). Esta investigación tuvo en cuenta que la mezcla de estos residuos con los residuos de excretas generan cantidades de biogás superiores a cuando se biodegradan por separados tal como se plasmó en el capítulo I de esta investigación, por lo que, a pesar de representar el 9 % del potencial total, se decidió incluirlos también como uno de los posibles residuos a tratar.

Figura 3.3. Fracción residuos agrícolas



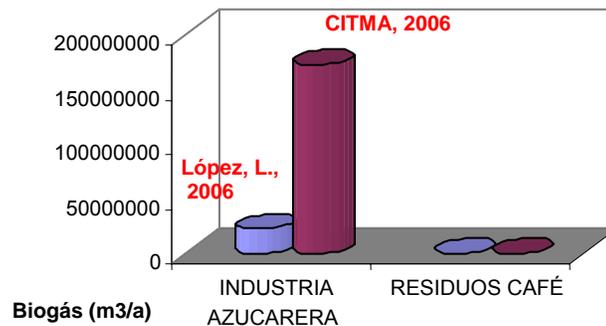
Fuente. López, L., 2006

Del análisis de los residuos industriales reportados por estos dos autores resultó que en ambos estudios los de la industria azucarera son los que mayor porcentaje representaron del total (más del 98.8 %), sin embargo, en correspondencia con que la cantidad de biogás reportada por el CITMA fue tres veces mayor que la de López, L., 2006, estos residuos tuvieron un potencial 7.5 veces superior en el primero que en el segundo, incluyéndose como residuos de la industria azucarera a la cachaza, los residuales líquidos de la fabricación de azúcar, las vinazas y los residuos de la producción de torula. El resto de los residuos industriales perteneció a los residuos de la industria del café (menos del 1.2 %), que por su bajo rendimiento de biogás reportado se desestimaron para este trabajo, aunque se pudieran tener presentes como casos puntuales en trabajos posteriores. (Figura 3.4)

Fue evidente que el mayor potencial de los residuos industriales reportado en la literatura está en la industria azucarera por lo que la realización de propuestas tecnológicas estuvo también dirigida hacia el uso de este tipo de residuos. La diferencia que resultó de este análisis en cuanto a las cantidades de biogás reportadas por ambos

autores pudo estar dada por los índices de rendimiento de biogás utilizados para cada sustrato y las fuentes de información utilizadas (Figura 3.4.).

Figura 3.4 Comparación del potencial residuos industriales.



Fuente: Elaboración propia.

Este análisis nos llevó a conformar tres grupos para realizar, a partir de estos, las propuestas tecnológicas de producción de biogás con fines energéticos en la provincia de Sancti Spiritus, quedando del siguiente modo:

1er Grupo: *Sustratos o mezclas con altos % ST. (8-10%) y de compleja biodegradación.*

Escenario 1: Centrales Azucareros sin diversificación
(CACHAZA + RESIDUAL LÍQUIDO)

Escenario 2: Centrales Azucareros con diversificación
(CACHAZA+ RESIDUALES LÍQUIDOS+ VINAZAS ó RESIDUOS DE LA TORULA)

Tratando en un mismo digestor combinaciones de cachaza con cualquiera de los restantes residuales diluidos.

2do Grupo: Sustratos con alto contenido de sólidos totales (8-10 %) de menor complejidad para su biodegradabilidad.

Escenario 1: Residuales de excreta porcina frescas.

Escenario 2: Residuales de excretas vacunas frescas.

Escenario 3: Mezclas de residuos de cosecha con excretas frescas. (Codigestión)

3er Grupo: Sustratos altamente diluidos % S.S < 2g/l.

Escenario 1: Residuales de destilerías, de la producción de torula y de azúcar.
(VINAZAS, RESIDUALES DE LA TORULA y RESIDUALES LÍQUIDOS.)

Escenario 2: Residuales porcinos y vacunos frescos altamente diluidos.

3.3 Vigilancia tecnológica..

En esta etapa, además de tenerse en cuenta los reportes bibliográficos del capítulo I, se realizó un *estudio de patente* bajo el título “Producción de Biogás”, las patentes y los temas que en ellas se trataron fueron adquiridos en un material impreso. En este material se reportaron un total de 64 patentes relacionadas con el tema, de ellas solamente fueron utilizadas el 6,25 %, por ser las más completas y aceptadas para los grupos de sustratos conformados, el resto de las patentes fueron una fuente de consulta importante pero requirieron para su conocimiento e interpretación de la elaboración de una nueva búsqueda que ha de concretarse en futuras investigaciones sobre el tema por la demora que esto representó. Esto constituyó una limitante del método empleado.

3.3.1 Aspectos seleccionados de la búsqueda de patentes.

Patente No. US 2006/0102560: Método y dispositivo para la producción de biogás.

Patente No. CU22738. Procedimiento para mejorar la producción de biogás en la digestión anaerobia de cachaza.

Patente No. CU 23003. Eliminación de sulfuro de hidrógeno por método biológico.

Patente No. US 2006/0213370. Compresión para el almacenamiento del biogás.

Esto se combinó con algunas especificaciones tecnológicas reportadas en la literatura donde se encontraron fundamentalmente elementos sobre las etapas de digestión anaerobia, purificación y generación de energía eléctrica y cuyos aspectos de importancia se mostraron en el capítulo I de la presente investigación. Hay que señalar que la patente para el mejoramiento del rendimiento en la producción de biogás para residuos complejos fue hallada por ambos métodos de búsqueda de información.

3.4 Selección de la tecnología apropiada y competitiva.

3.4.1 Selección de la etapa de pretratamiento para cada grupo de sustrato.

1er Grupo: Sustratos o mezclas con altos % ST. (8-10%) y de compleja biodegradación.

Escenario 1: Centrales Azucareros sin diversificación
(CACHAZA + RESIDUAL LÍQUIDO)

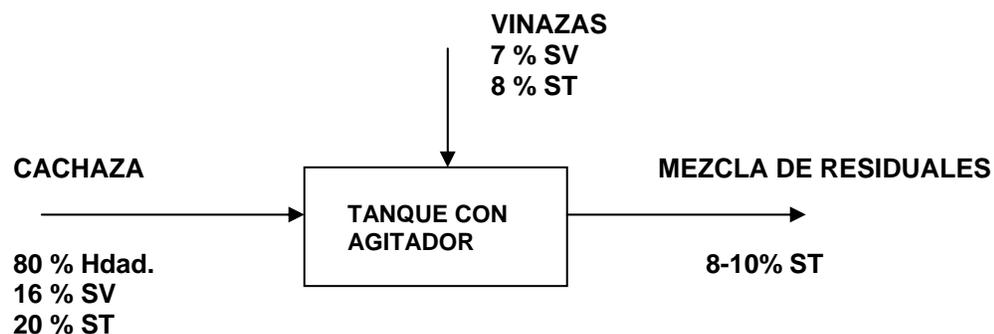
Escenario 2: Centrales Azucareros con diversificación
(CACHAZA+ RESIDUALES LÍQUIDOS+ VINAZAS ó RESIDUOS DE LA TORULA)
TRATANDO EN UN MISMO DIGESTOR TODOS LOS RESIDUALES.

Pretratamiento 1.

Patente No. US 2006/0102560: Método y dispositivo para la producción de biogás.
(Comprende un tanque con agitación para la dilución de sustratos con un 15 – 45 % ST)

Descripción:

Con este tipo de pretratamiento solamente se pretendió lograr la alimentación de una mezcla homogénea de cachaza fresca con vinazas como residual líquido con un % de sólidos totales entre el 8 – 10 %. Sus características son aplicadas en muchos otros procesos de la industria química y requiere como gastos de operación del suministro de energía para la agitación. Este proceso tiene lugar a TPEA y sin adición de reactivos químicos. (Figura 3.5)



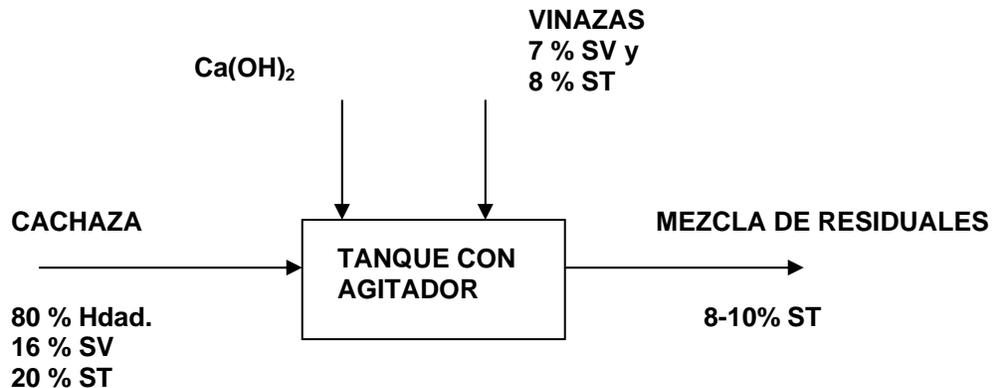
Pretratamiento 2.

Patente No. CU 22738. Procedimiento para aumentar la producción de biogás en la digestión anaerobia de cachaza.

Descripción:

Este tipo de pretratamiento consistió en añadir hidróxido de calcio a los residuales complejos, específicamente para lograr la solubilización de la cachaza, en él, al igual que en el anterior se mezclan los sustratos en un tanque con agitador con la consecuente adición del reactivo químico. Se recomendó por parte del autor la utilización de un tanque herméticamente cerrado, y un agitador de hélice con 500 rpm y un tiempo de agitación entre 4 y 6h. Como resultado de este proceso se produce un incremento de un 20 % en los SV de la corriente que alimenta al digestor y tres veces más biogás que cuando se utiliza el pretratamiento anterior, reduciendo los tiempos de retención en la etapa de digestión a la tercera parte y por ende el volumen del digestor.(Figura 3.6)

Figura 3.6 Diagrama de bloques del pretratamiento 2



Selección.

De la [tabla 3.2](#) se pudo concluir que desde el punto de vista económico el pretratamiento 2 ofrece ventajas respecto al 1 pues a pesar de que los costos de inversión del equipamiento a instalar se pueden considerar iguales por manejarse los mismos volúmenes, se logran recuperar 5 pesos por cada peso que se invierte en la adición del reactivo cuando se utiliza el pretratamiento 2.

Tabla 3.2 Comparación de los tipos de pretratamientos par los sustitos del 1er grupo.

Parámetros	Pretratamiento 1	Pretratamiento 2
V_{TANQUE} (m ³)	14	14
Tipo de agitador(500 rpm)	Hélice	Hélice
Masa de reactivo (kg /d)	-	42.56
Costo del reactivo (\$/d)	-	4.55
Producción de biogás (m ³)	70	210
Masa de sólidos volátiles. (kg/d)	510	638
Energía eléctrica (kWh/d)	156	468
Venta de la energía(\$/d)	11.3	34.2

Además fue evidente que según los parámetros reportados se mejora la eficiencia del proceso en el 2do elevando el contenido de sólidos volátiles y la producción de biogás.

Desde el punto de vista ambiental el hidróxido de calcio adicionado en el pretratamiento 2 posee una capacidad adicional, producto de la incorporación de álcalis lo que podría ayudar a la neutralización de ácidos orgánicos durante la etapa de digestión atenuando el efecto inhibitor de estos últimos y mejorando el pH del los bioabonos obtenidos. Este calcio arrastrado en los bioabonos si es adicionado a los suelos en proporciones adecuadas puede mejorar la calidad de los mismos.

Por todo esto se decide utilizar como etapa de pretratamiento para el 1er grupo de sustratos la *patente No. CU 22738* con el título *“Procedimiento para aumentar la producción de biogás en la digestión anaerobia de cachaza”*.

2do Grupo: Sustratos con alto contenido de sólidos totales (8-10 %) de menor complejidad para su biodegradabilidad.

Escenario 1: Residuales de excreta porcina frescas.

Escenario 2: Residuales de excretas vacunas frescas.

Escenario 3: Mezclas de residuos de cosecha con excretas frescas. (Codigestión)

Para los dos primeros escenarios no fue necesario proponer una etapa de pretratamiento pues siempre que estos se recolecten como resultado de la limpieza de

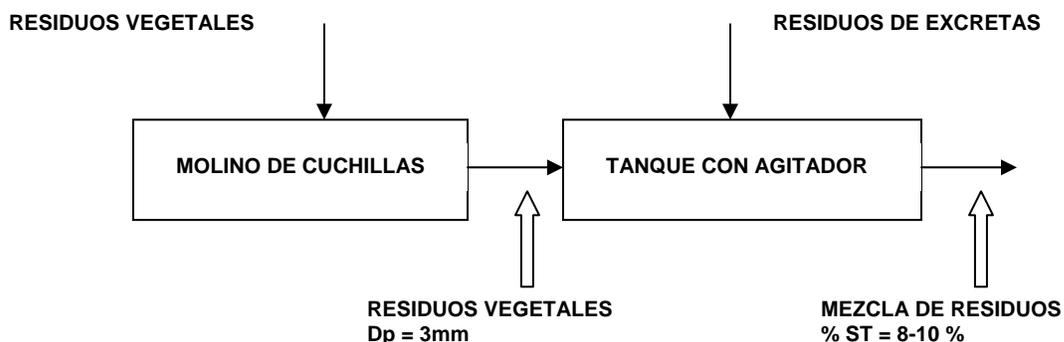
cochiqueras y vaquerías se asume un mezclado suficientemente homogéneo. Por tal motivo el pretratamiento analizado fue solamente para el caso en que se presente el escenario 3.

Reporte bibliográfico: Reducción de tamaño para el incremento de la superficie de contacto de los residuos vegetales con los microorganismos en la digestión anaerobia con etapa de mezclado posterior. (Braun, R. 2002)(Edelman, W., Engeli, H. and Gradenecker, M, 2000)(Ley, N., 2006)(Jerger E., et al. 1983).

Descripción:

Los residuos vegetales son cortados en pequeños tamaños en un molino de cuchillas rotatorias hasta reducir el diámetro de partículas D_p a 3 mm, luego son adicionados en hasta un 30 % del flujo de residuos de excretas con los que posteriormente son mezclados en un tanque con agitación para lograr la alimentación de una mezcla homogénea a la etapa de digestión reduciéndose el porcentaje de los sólidos totales a un 8 %. El proceso tiene una duración equivalente al tiempo de limpieza que oscila entre las 2-4 horas 2 veces al día. (Figura 3.7)

Figura 3.7 Diagrama de bloques de la etapa de pretratamiento.



Selección.

Este pretratamiento tiene la ventaja de lograr una mezcla homogénea y mejorar el contacto entre los microorganismos y los sustratos ajustando la relación carbono/nitrógeno. Es aplicado en países europeos como tecnologías para la codigestión de sustratos. (Linke, B., Schelle, H., Mumme, J., 2000).

Desde el punto de vista de la eficiencia energética del proceso en general este tipo de pretratamiento tiene como desventajas fundamentales el consumo de energía en las dos etapas.

Su utilización genera emisiones de ruidos por lo que se recomienda su localización en zonas apartadas y donde no afecte la estabilidad de otros procesos.

Sin embargo, no se encontraron las descripciones tecnológicas de otros tipos de pretratamiento para sustratos de esta naturaleza, por lo que se hizo inevitable su utilización.

3er Grupo: Sustratos altamente diluidos % S.S < 2g/l.

Escenario 1: Residuales de destilerías, de la producción de torula y de azúcar.
(VINAZAS, RESIDUALES DE LA TORULA y RESIDUALES LÍQUIDOS.)

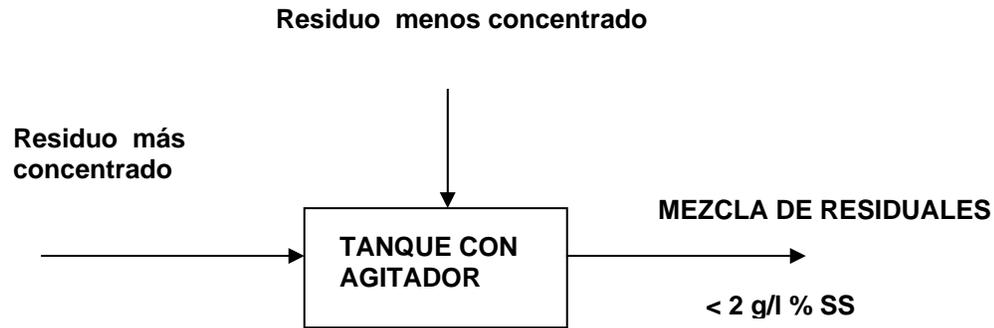
Escenario 2: Residuales porcinos y vacunos frescos altamente diluidos.

Experiencias previas: Tanque de acero inoxidable con agitador para la estabilización del pH de ser necesario y para la dilución de residuales de baja carga orgánica hasta lograr en ellos contenidos de sólidos en suspensión asimilables por la etapa posterior, lleva implícito el bombeo del residual a la salida del tanque según carga orgánica necesaria en el digestor.

Descripción:

Consiste en la reducción del contenido de sólidos en suspensión mediante la adición de otros residuos más diluidos o agua, hasta alcanzar valores cercanos a 2 g/l y considerarlos como altamente diluidos, evitando así, fallas tecnológicas como el arrastre de lodo en la etapa posterior. Esta etapa contará con un tanque con agitador para garantizar el mezclado y de ser necesario se añade hidróxido de calcio para neutralizar el pH hasta 6.8 – 7.6. La alimentación de la carga orgánica que pueden asimilar los digestores que tratan residuos de este tipo se garantiza mediante el bombeo. (Figura 3.8)

Figura 3.8 Diagrama de bloques de la etapa de pretratamiento.



Selección.

No se reportaron por ninguna de las vías utilizadas otros tipos de pretratamiento para estos residuos, por lo que se decidió utilizar este teniendo en cuenta que su utilización en plantas como Heriberto Duquesne ha reportado resultados satisfactorios.

3.4.2 Selección de la etapa de digestión para cada grupo de sustrato.

Esta etapa ha sido más estudiada por los autores desde los inicios de la producción de biogás, en ella ocurre precisamente la fermentación anaerobia del sustrato fue por esto que los diferentes tipos de tecnologías y sus características fueron encontrados en los reportes bibliográficos.

1er y 2do Grupo

Reportes bibliográficos: Digestores de tipo chino, de flujo pistón, híbridos y de mezcla completa.

Descripción:

Estos reactores son utilizados para el tratamiento de residuos con elevados contenidos de sólidos totales y en suspensión, en ellos los residuales son alimentados para ponerlos en contacto con bacterias acidogénicas y metanogénicas capaces de degradar la materia orgánica presente en estos residuos para producir biogás en ausencia de

oxígeno, los dos primeros que se mencionan son utilizados mayormente a pequeña y mediana escala, mientras los dos restantes son utilizados además a escala industrial presentando como característica fundamental la presencia de agitación para la remoción de los sólidos en el interior de estos. De esta etapa se obtienen como productos el biogás, el bioabono y un efluente líquido.

Dimensionamiento:

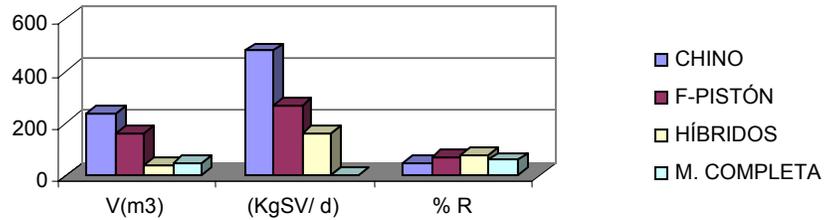
De los valores del volumen de cada digestor, costo y la carga orgánica capaz de asimilar obtenidos de la aplicación del procedimiento explicado en el capítulo II se realizó el siguiente análisis para la selección de uno de estos digestores como segunda etapa del proceso tecnológico.

Selección.

Se decidió trabajar con los digestores híbridos por ser los que menor volumen requirieron para generar igual cantidad de biogás siendo 6 y 4 veces menor que los chinos y los flujos pistón respectivamente y ligeramente inferior al los de mezcla completa, necesitando así menores movimientos de tierra para su construcción. También fue evidente que ellos requirieron tres veces menos KgSV/d para generar igual cantidad de biogás respecto a los de tipo chino y casi dos veces menos que los de flujo pistón lo que los hace más eficientes. (Figura 3.9) En este aspecto no fueron analizados los de mezcla completa por falta de referencias (tabla 2.1, capítulo II).

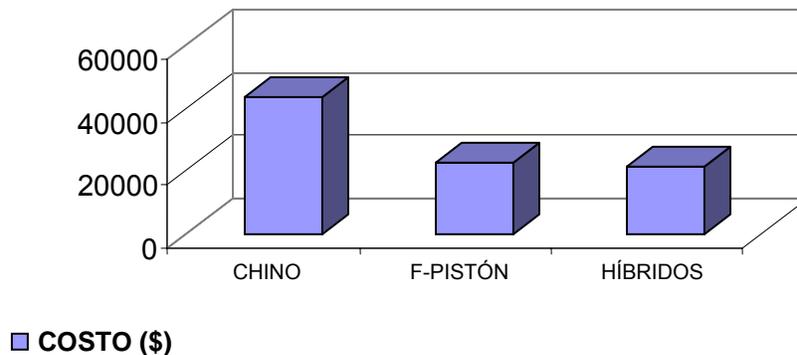
Desde el punto de vista de la eficiencia de remoción (%R) a pesar de que estuvo muy cercana a los de flujo pistón fue superior en los híbridos proporcionando una mayor eliminación de DQO que repercute directamente en el efecto ambiental del efluente de esta etapa. (Figura 3.9)

Figura 3.9. Comparación los digestores para los sustratos de 1er y 2do Grupo



Otro de los aspectos analizados en esta selección fue el costo de cada digestor para generar igual cantidad de biogás donde se observó en la [figura 3.10](#) que de igual modo los costos de los digestores híbridos fueron menores con respecto a los demás digestores reportados, siendo la mitad de los de tipo chino y muy cercanos a los de flujo pistón aunque los híbridos superan a los últimos en más de diez años la vida útil.

Figura 3.10. Comparación del costo de los digestores para los sustratos de 1er y 2do Grupo



Finalmente se analizó que estos digestores híbridos, a pesar de necesitar agitación para su funcionamiento no requieren de gastos adicionales de energía por concepto de agitación mecánica a diferencia de los de mezcla completa. Para estos últimos digestores, como ya se había dicho, no se obtuvieron todos sus parámetros, por lo que a pesar de que no compitieron con los híbridos en los aspectos analizados se debe profundizar en ellos para trabajos posteriores con el fin de incrementar aun más el rigor de esta selección.

3er Grupo.

Esta etapa, al igual que las tecnologías de digestión de los sustratos de los grupos 1 y 2, ha sido estudiada por diferentes autores aunque su inserción industrial es más reciente. Estos tipos de digestores son conocidos como de segunda generación por su capacidad para tratar grandes volúmenes de residuales y por sus bajos tiempos de residencia hidráulica. Sus características y parámetros técnicos fueron encontrados en los *reportes bibliográficos*.

Reportes bibliográficos: Digestores híbridos, digestores con mando de lodo y flujo ascendente (UASB), digestores de lecho fijo (RALF) y digestores con lecho expandido (RALEF).

Descripción:

Estos reactores son utilizados para el tratamiento de residuos con bajos contenidos de sólidos totales y en suspensión, preferentemente altamente diluidos hasta valores inferiores a los 2 g/l. En ellos los residuales son alimentados para ponerlos en contacto con bacterias acidogénicas y metanogénicas capaces de degradar la materia orgánica presente para producir biogás en ausencia de oxígeno, tal como en los digestores del 1er y 2do grupo de sustratos. Los híbridos se tuvieron en cuenta por su capacidad para tratar ambos tipos de sustratos. Todos estos digestores han sido utilizados a escala industrial presentando como característica fundamental la existencia de un tiempo de retención de lodo (generalmente elevado de 100 d) diferente al tiempo de retención de líquido (menor de 3 días), lo cual los identifica como digestores de 2da generación (Montalvo, S., 2003). Estos reactores no requieren la utilización de agitación y en ellos se obtienen como productos el biogás, el bioabono y un efluente líquido.

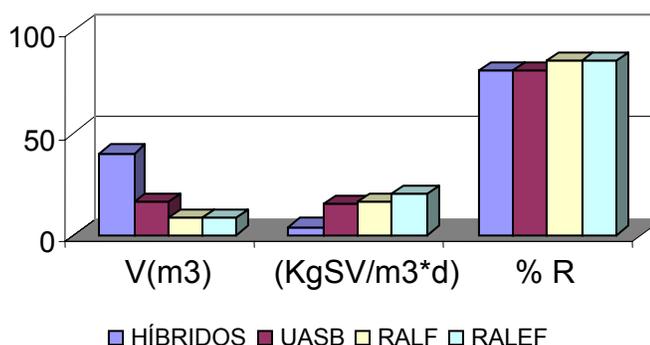
Dimensionamiento:

Al igual que para los digestores de los grupos de sustratos 1 y 2, los valores del volumen, el costo y la carga orgánica capaz de asimilar fueron obtenidos de la aplicación del procedimiento explicado en el capítulo II. A partir del mismo se realizó el siguiente análisis para la selección de uno de estos digestores como segunda etapa del proceso tecnológico de este 3er grupo de sustratos.

Selección.

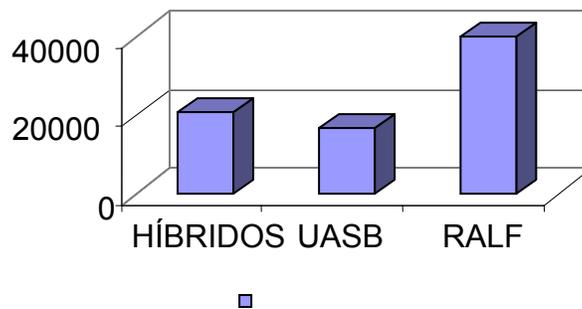
Desde el punto de vista ambiental los mejores resultados se obtuvieron para los RALF y los RALEF necesitándose en ellos la mitad del volumen de digestión que los UASB y la sexta parte que en los híbridos para generar igual cantidad de biogás (Figura 3.11), lo que genera menores movimientos de tierra en la fase constructiva para los dos primeros. Además los valores de eficiencias de remoción reportados oscilaron entre el 80 y el 85 % alcanzándose el 85 % solamente en los RALF y los RALEF lo que repercute directamente en la eliminación de la carga contaminante en el efluente de esta etapa. Otro factor que influye directamente en el medioambiente es la capacidad para asimilar grandes cargas orgánicas parámetro que resultó superior en los RALEF seguido de los RALF (figura 3.11). Visto de este modo los reactores de lecho fijo y lecho expandido superaron a los dos restantes que fueron analizados en todos los aspectos excepto en el consumo de energía debido al bombeo (tabla 2.2). Sin embargo, estos dos tipos de digestores representaron solamente el 4 % de los digestores en funcionamiento a escala industrial en el mundo (tabla 1.1, capítulo I), y no han sido aplicados en Cuba a gran escala, por lo que resultó más conveniente proponer a los UASB como alternativa de digestión de esta propuesta ya que representaron el 65 % del total (tabla 1.1) y fueron superiores a los híbridos necesitándose volúmenes 2.5 veces menores para generar igual cantidad de biogás, asimilando cargas orgánicas 4 veces superiores y con iguales eficiencia de remoción. (Figura 3.11)

Figura 3.11 Comparación de los digestores para los sustratos del grupo 3.



En cuanto a los costos de inversión no se encontraron reportes sobre los de lecho expandido (RALEF), mientras que entre los restantes los UASB fueron los menos costosos (Figura 3.12). Recomendándose la implementación y estudio detallado a escala de planta piloto de los RALF y los RALEF con vistas a su inclusión posterior a escala industrial.

Figura 3.11 Costo de digestores de la propuesta No 3.



Por todo lo expuesto hasta aquí se decidió utilizar en para la digestión de los sustratos del 3er Grupo a los digestores con manto de lodo y flujo ascendente (UASB).

3.4.3 Selección de la etapa de purificación para todos los grupos de sustratos.

El objetivo de esta fue eliminar el contenido de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, cuyos valores pueden llegar hasta el 3 %, para evitar de esta forma la corrosión en el interior de los equipos de compresión y generación de energía eléctrica.

Purificación 1.

Reportes bibliográficos. Purificación con compuestos del hierro. (Montalvo, S., 2003) (Hermidas, F., 2006)

Descripción:

Su utilización consistió en poner en contacto una solución de sulfato de hierro II con el biogás, convirtiendo el sulfuro de hidrógeno presente en sulfuro de hierro, precipitado de color pardo rojizo, con la consecuente formación de ácido sulfúrico en presencia de limallas de hierro que son atacadas por el ácido para formar nuevamente el sulfato de hierro, mediante las reacciones que se describen en el capítulo II de este trabajo. El

proceso ocurre en un scrubber cerrado a temperatura ambiente y a la presión del biogás en la salida del digestor.

Dimensionamiento.

Con el flujo de biogás que sale del digestor se determinó el volumen de sulfuro de hidrógeno presente por la ecuación (4).

$V(\text{H}_2\text{S}) = 1\,440 \text{ l}$ Que representaron $2\,185.7 \text{ g}$.

La cantidad de sustancia de sulfuro de hidrógeno que se alimenta al scrubber fue de 64.3 mol y como en la reacción por cada mol de H_2S que se elimina se necesitan 1 mol de Fe , 1 mol de FeSO_4 y se produce 1 mol de FeS , entonces la cantidad de sustancia calculada para el H_2S es igual a la de estos otros reactivos y por la ecuación (6) se determinaron sus masas.

$m(\text{Fe}) = 3.6 \text{ kg}$

$m(\text{FeSO}_4) = 9.77 \text{ kg}$

$m(\text{FeS}) = 5.6 \text{ kg}$

Que es la cantidad de reactivos necesaria al día para eliminar el sulfuro de hidrógeno presente en un 3% en los $48 \text{ m}^3/\text{d}$ de biogás. Siendo necesaria la reposición diaria de las limallas y no la del sulfato de hierro II que se repone constantemente en este proceso y produciéndose el sulfuro de hierro como corriente residual a razón de $0.12 \text{ kg} / \text{m}^3$ de biogás tratado.

El costo de esta unidad se determinó por la ecuación (7) tomando como referencia los \$ $430\,000.00$ que cuesta el montaje de una similar en Heriberto Duquesne, resultando un monto total de \$ $13\,695.00$.

Desde el punto de vista ambiental esta tecnología produce un precipitado oscuro que puede ser utilizado en laboratorios de análisis, investigación, química fina y como colorantes, según ([Ficha de Datos de Seguridad. Directiva 2001](#)). Pero habría que investigar si cumple los parámetros de calidad requeridos.

Otro aspecto que se consideró en esta etapa fue la utilización de limallas de hierro como materia prima, con un índice de consumo de $75 \text{ g}/\text{m}^3$ de biogás a purificar. Estas no son un material disponible hoy en el mercado y se produce generalmente como residuos de los talleres de maquinado en pequeñas cantidades y mezclado con otros

restos de metales. Además se plantea que este método reduce el contenido del sulfuro de hidrógeno en el biogás de un 3 % hasta el 0.7 % valor que se encontró por encima de 0.01% recomendado para uso en motores de combustión interna. Este resultado ha sido diferente cuando se utilizan residuos de excretas con composiciones de hasta el 1 % de H₂S. Para este tipo de purificación se reportaron eficiencias de remoción del 76 %. (Fernández, E., 1999).

Purificación 2.

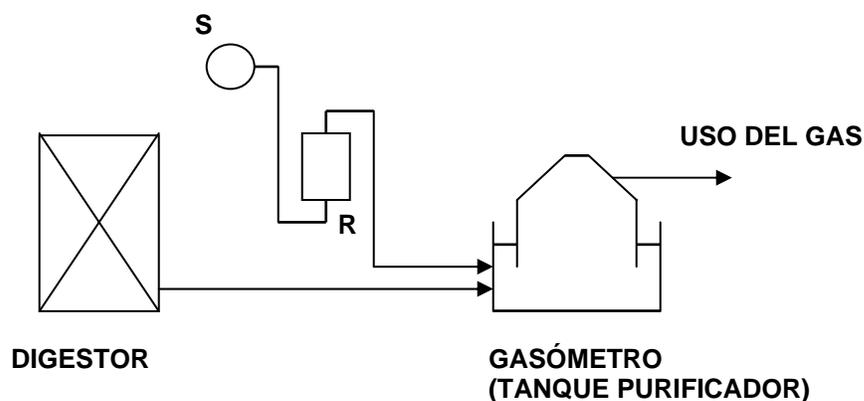
Patente No. CU 23003: Procedimiento para la purificación del biogás.

Descripción:

El esquema para su aplicación a gran escala incluyó un tanque purificador con un gasómetro incluido, además de un rotámetro (R) y un soplador (S) de aire según se muestra en la [Figura 3.12](#).

Este método clasificado como biológico, se basó en poner en contacto el biogás con ciertas bacterias azufradas presentes en la superficie líquida de residuales en presencia de pequeñas cantidades de oxígeno del aire entre el 1.5 y el 6 % de la cantidad de biogás a tratar, durante un tiempo de 30 min alcanzándose eficiencias de remoción entre el 84 y el 99 % y reduciendo la cantidad de H₂S desde un 3 % hasta un 0.007 – 0.01 %.

Figura 3.12 Diagrama de bloques de la purificación por método biológico.



El costo de este conjunto de equipos se determinó también por la ecuación (7), resultando un monto total de \$ 1 408.00.

El suministro de aire para los 48 m³/d debe estar entre 0.624 y 2.88 m³/d, utilizando un soplador de 100 W de potencia como el recomendado por la patente para flujos similares. Esto representó un 2.4 kWh /d equivalentes a 1.07 m³ de biogás que es el 2 % del biogás producido y puede ser considerado suficientemente pequeño.

Selección.

Se decidió utilizar como etapa de purificación el método biológico, pues solo necesita, como requerimiento de materia prima, aire en pequeñas proporciones y aguas residuales que contengan las bacterias azufradas. Sus costos de inversión son casi diez veces menores que el método de purificación 1, alcanzando eficiencias de remoción de hasta el 99 % y lográndose la eliminación del contenido de sulfuro de hidrógeno hasta valores de 0.01 % en la corriente de biogás que sale de esta etapa. Además en este tipo de tecnologías no se producen residuos como el sulfuro de hierro que a pesar de tener aplicaciones, tendríamos que estudiar sus características previamente.

3.4.4 Selección de la etapa de compresión- almacenamiento para todos los grupos de sustratos.

Esta etapa puede ser utilizada o no en función del tipo de consumidor (continuo o semicontinuo) y de la necesidad de almacenamientos prolongados del biogás. (Montalvo, S., 2003). Para la misma se encontró solamente una patente que no propone netamente un sistema de compresión y almacenamiento pero si utiliza para otros fines la compresión del biogás antes de su destino final, además el uso de esta etapa se reportó en experiencias previas del país (plantas Antonio Guiteras, MININT Camaguey, MININT Sancti Spíritus y otros 50 proyectos de grupo nacional de biogás), así como en la literatura especializada.

Patente US 2006/0213370: MOBILE BIOGAS PROCESSING SYSTEM AND METHOD.

Descripción.

Se propuso un compresor de aire operando de manera discontinua con una relación 2:1 tiempo de funcionamiento – parada, un caudal de operación de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ equivalentes a los $48 \text{ m}^3/\text{d}$ que se asumen como flujo de trabajo con una presión de trabajo de 10 atm, enviando el biogás comprimido a una bala de almacenamiento capaz de resistir la presión de trabajo del compresor.

Dimensionamiento

El volumen de la bala necesario para almacenar la producción de un día se determinó según la ecuación (8) y fue de $V_B = 4.8 \text{ m}^3$.

El costo de la bala determinado por la expresión (7) resultó ser de \$ 3561.00 y el de la unidad de compresión por la misma expresión de \$ 2228.00, para un monto total de la unidad de compresión-almacenamiento \$ 5789.00.

3.4.5 Selección de la etapa de generación de energía eléctrica para todos los grupos de sustratos.

Mediante las expresiones 9, 10 y 11 se completaron las [tablas 1 y 2](#) que se muestran en el [anexo 8](#). En ellas se evidenció que el costo de los motores de combustión interna es 1.3 veces menor que el de las turbinas de gas y casi 3 veces mayor que para las turbinas de vapor sólo que en estas últimas solo podrán instalarse en aquellos lugares que exista un generador de vapor. De igual forma el PSRI fue menor en las turbinas de vapor que en las tecnologías restantes. ([Tabla 2 y Figura 1, anexo 8](#)).

Sin embargo, fue notorio que al incrementar la potencia instalada hasta 250 kW (valor mínimo de potencia instalada que aparece en [tabla 1.2 capítulo I](#) para turbina de gas y de vapor) el PSRI de los MCI fue inferior al del resto de las tecnologías ([Figura 2, anexo 8](#)) lo que se debió a que el costo de estos últimos fue poco sensible al incremento de potencia y a su capacidad para entregar mayor cantidad de energía eléctrica por kW de potencia instalado, aspecto que se debió a la existencia de una mayor eficiencia en los MCI.

Por tanto desde el punto de vista económico podemos decir que los más idóneos fueron los MCI por presentar los mejores PSRI cuando se incrementa la potencia instalada.

Por otra parte, desde el punto de vista técnico fueron los MCI los que mejores eficiencias reportaron y los únicos cuyos valores de potencia instalada estuvieron por

debajo de los 250 kW, lo cual permite su aplicación en plantas de pequeño, mediana y gran escala que produzcan hasta 2 000 m³/d de biogás.

Posteriormente se analizaron los requerimientos y las posibles corrientes residuales completándose la [tabla 1, anexo 9](#), donde los residuos de cada una de estas tecnologías fueron gases y ruidos de menor efecto ambiental que cuando se genera a partir de combustibles fósiles pues se utiliza como fuente de energía la biomasa que puede absorber en su ciclo natural todo el CO₂ que se produce en la combustión del biogás.

En cuanto a los requerimientos los MCI necesitan de un sistema de enfriamiento, que puede ser realizado por aire o agua, valorándose que este proceso puede entregar una energía térmica equivalente a 3.33 kWh por cada m³ de biogás alimentado según la experiencia de la empresa Alemana citada en el capítulo II.

Por otra parte las turbinas de vapor requirieron de la existencia de un generador y de un sistema de tratamiento de agua para la eliminación de sales de calcio y magnesio lo cual encarece aun más la inversión de estas tecnologías y limita sus usos a escenarios específicos.

De esta forma se decidió seleccionar a los motores de combustión interna como etapa de generación de energía eléctrica pues ofrecen ventajas económicas en la medida en que se incrementa la potencia, técnicas porque producen mayor cantidad de energía eléctrica por kW de potencia instalado, lo que se traduce en eficiencia y no afecta en mayor escala que los demás al medio ambiente.

3.5 Estimado preliminar de los costos de inversión.

Al realizar el estimado preliminar de los costos de inversión se notó ([tabla 1 anexo 10](#)) que la etapa de generación de energía eléctrica del 1er y 2do grupo de sustrato representaba el 41 %, esto se debió a la consideración inicial realizada sobre la generación en horario pico para el apoyo a SEN y el incremento de los ingresos. Sin embargo, esto provocó la necesidad de una mayor potencia instalada, que a su vez repercutió en un incremento del costo de inversión en la generación de energía eléctrica y en la bala de almacenamiento de gas, pues esta se concibió para el almacenamiento las 24 h del día.

Debido a esto, se redujo la potencia instalada, para los tres grupos de sustratos, considerando ahora la operación en 16 horas al día (dos turnos de 8 h c/u) con un promedio de 0.073 \$/kWh generado y se recalcularon los costos de inversión preliminar, resultando una disminución de más de \$ 11 000 y un PSRI de un año menor por lo que se reconsideró un aumento en el tiempo de operación de los MCI en cada uno de los grupos de sustratos.

Finalmente la etapa de digestión promedió para un 50 % del costo de adquisición de los equipos y las restantes representaron entre el 8 y el 14 %, reafirmando la primera como la etapa esencial en un proceso de producción de biogás con fines energéticos. Y mostrándose PSRI entre 3 y 4 años.

En este análisis no se tuvieron en cuenta los ingresos que reportan las ventas de bioabonos y sobre las cuales muchos autores plantean que garantizan la rentabilidad de estas plantas. (Referencias de capítulo I). Estos bioabonos se producen en mayor escala en aquellas plantas que tratan residuos con altos contenidos de sólidos totales, como los del 1er y 2do grupo de sustratos, por tal motivo se espera que los PSRI sean mejores en estos que en el 3ero lo que se podrá comprobar o no en la fase de adaptación.

3.6 Elaboración de las propuestas.

De cada uno de los pasos analizados anteriormente quedaron conformadas las propuestas tecnológicas 1, 2 y 3 ([anexos 11, 12 y 13](#)) que dieron respuesta a los grupos de sustratos 1, 2 y 3 respectivamente, mediante la unión de cada una de las etapas tecnológicas seleccionadas.

3.7 Adaptación de las propuestas tecnológicas.

La granja Remberto Abad Alemán, forma parte de un proyecto que pretende convertir dicha entidad en una empresa consultora para la producción de biogás en la región central del país, ella ha sido víctima del proceso de desactivación de la industria azucarera cubana y dedica hoy sus esfuerzos a la diversificación de sus producciones, buscando alternativas generadoras de empleo y de ingresos monetarios. La misma cuenta en la actualidad con una fábrica de bloque, un taller de maquinado, una bomba de alto consumo eléctrico para el bombeo del agua que abastece el 100% de sus

producciones, una cochiguera, ganado vacuno, ganado ovino-caprino, dos comedores y una producción agrícola donde se destacan los cultivos de arroz, plátano, maíz, tubérculos y hortalizas, además de un conjunto de oficinas centrales situadas alrededor del antiguo ingenio desde donde se dirige el trabajo de la empresa.

Estas producciones generan un potencial de residuos biodegradables por lo que la granja pudiera ser un escenario propicio para la aplicación de las propuestas tecnológicas, además la energía producida tendría podría tener como fin la cocción de los alimentos o la generación de energía eléctrica mientras los bioabonos ricos en N₂, P₄ y K pudieran sustituir a los agroquímicos causantes del deterioro de los suelos.

Para esto fue necesario, determinar los tipos de sustratos existentes y los principales consumidores de energía de la granja con el fin de seleccionar una de las propuestas tecnológicas realizadas.

3.7.1 Determinación de los sustratos existentes y los principales consumidores energéticos de la granja.

Estos datos fueron obtenidos en reunión con los directivos de cada una de las áreas de la empresa y utilizando los controles de las producciones agrícolas y pecuarias para estimar, a través de porcentos e índices establecidos, los desechos biodegradables que se producen.

Desarrollando los pasos que se dan en el capítulo II y con los datos recolectados en la planilla para la estimación de potenciales que se muestra en el [anexo 4](#) de esta investigación se completó la [tabla 3.3](#), que resume los potenciales de residuos de cada uno de los desechos generados en la granja así como los sólidos volátiles presentes en estos y las cantidades de agua requeridas para cada uno de estos.

De esta forma se evidenció que existe un potencial de biodegradables en la granja cercano a los 13 500 kg/d de sustratos con un contenido de sólidos volátiles de más de 700 kg/d, lo que justificó la intención de adaptar una propuesta a este escenario.

Tabla 3.3. Potencial de residuos en la granja

Tipo de residuo	Mt (kg/d)	Magua (kg/d)	MSV (kg/d)	M_{Ri} (kg/d)
Porcino	1 834.5	5503.5	366.9	7 337.5
Vacuno	454.0	1 364.0	90.8	1 816.0
Ovino - Caprino	994.0	2 982.0	198.8	3 976.0
Cosecha	327.0	-	58.86	327.0
Total (M_{MS})	3 609.5	9 849.0	715.36	13 456.5

Principales consumidores energéticos de la granja.

A partir de la ecuación 19 y con los datos del [anexo 4](#), se estimó la cantidad de biogás necesaria en cada uno de los consumidores tal como se muestra en la [tabla 3.4](#). Donde los comedores representaron solamente el 7,4 % del total necesario, siendo obligatorio el suministro de biogás a los mismos como aspecto social para el mejoramiento de las condiciones de vida de los trabajadores de la granja y opcional, la producción de energía eléctrica en los MCI que estará dada por la disponibilidad de biogás existente.

Tabla 3.4. Consumo de biogás.

Consumidores	V_{BIOGÁS} (m³)
Comedor 1.	8.2
Comedor 2.	12.2
MCI	265
TOTAL	275

3.7.2 Selección de la propuesta tecnológica correspondiente.

Por tanto, como los principales potenciales de sustratos estuvieron agrupados como residuos de excretas y de cosechas entonces se demostró que los mismos se corresponden con el 2do Grupo de sustratos específicamente el escenario 3: **Mezclas**

de residuos de cosecha con excretas frescas (8-10 % ST) (Codigestión) para el cual fue elaborada la propuesta tecnológica 2.

3.7.3 Elementos que hacen posible una mejor adaptación tecnológica.

En cuanto al cumplimiento de los factores de la transferencia tecnológica se determinó en reunión con el personal y mediante la aplicación de la planilla para la estimación de potenciales que eran favorables analizándose lo siguiente:

Aptitud del personal: Se pudo comprobar que en dicha granja existe experiencia industrial, personal calificado e interés por parte de los directivos para construir y operar la planta de conjunto con el grupo provincial de biogás encargado de la capacitación del personal y la proyección de la obra.

Accesibilidad y Fortaleza para construir fábricas: El lugar seleccionado tiene un buen camino de acceso y firmeza para la construcción de la planta.

Acceso al equipamiento necesario ya sea para construirlos como para adquirirlos: La granja dispone de materiales de construcción, mano de obra calificada para la construcción y presupuesto del MINAZ para el 2008 para la adquisición del equipamiento.

Localización: Teniendo en cuenta las premisas de una buena localización que brinda la metodología de asimilación de tecnologías modificada a la producción de biogás con fines energéticos, se decidió que la disponibilidad y localización de los sustratos determinarían la ubicación de la planta, pues su traslado encarece el proceso y no es recomendable por las elevadas cargas orgánicas que suelen tener. Por tanto, se decidió proponer la ubicación de dicha planta en las cercanías del sistema de lagunas donde se vierten hoy los residuales de las crías de ganados, aprovechando las facilidades que brindó el terreno, la escasa distancia de las redes eléctricas y de las fuentes de abasto de agua. [\(Anexo 14\)](#).

El resto de los aspectos fueron tomados en consideración pero en la medida en que se fueron dimensionando cada una de las etapas.

3.8 Desarrollo del proceso.

En vistas de que los principales residuos encontrados en la granja fueron las mezclas de excretas frescas con los residuos de cosechas se decidió utilizar la propuesta tecnológica 2, comenzando la etapa de *desarrollo del proceso* para la misma.

3.8.1 Diagrama de flujo del esquema tecnológico.

El esquema tecnológico fue mostrado en el [anexo 12](#), según el mismo se dimensionaron cada una de las etapas, calculándose las corrientes de entrada y salida en el acápite 3.8.2, según los procedimientos que se detallan en el capítulo II.

3.8.2 Diseño preliminar de la planta.

Pretratamiento:

Molino de cuchillas.

- El flujo de trabajo determinado por la expresión (20) resultó 0.045 kg /s.
- El costo del equipo aplicando la (22) estuvo en el orden de los \$ 1 854.00.
- El consumo de potencia de 13 kW y la energía consumida de 27 kWh/d.

Tanque con agitador.

- El volumen del tanque necesario para almacenar el residual de una hora de operación fue de 7 m³. (h= 2m y r = 1.05 m)
- El costo del tanque de fibra resultó ser de \$ 2132,00.
- Los sólidos totales en la mezcla fueron de 886 kg/d lo que representó un 6.6 % de los sólidos totales en la mezcla que se origina en el interior del tanque y que se alimenta al digester lo que corrobora el uso de la propuesta tecnológica 2.
- $\rho_s = 1\ 070\ \text{kg/m}^3$
- $\mu_s = 0.86 * 10^{-3}\ \text{Pa*s}$

- $Re = 3.05 * 10^6$
- $K_N = 0.10$
- $N = 2.36$ Kw que en 4 h de operación representaron 9.44 kWh/d.
- El costo de este agitador de hélice de acero inoxidable fue de \$ 3 000.00 para el año 2003 que actualizado reportó \$ 3 840.00.
- Por lo que el costo de la unidad tanque con agitador fue de \$ 5972.00 para un total de la etapa de pretratamiento de \$ 7 826.00.

Digestión.

- El flujo volumétrico para el tiempo efectivo de carga resultó de aplicar la ecuación (35), dando un valor de 2,5 m³/h y mediante (34) se llegó a la velocidad límite de 0.55 m/h con $Re = 472$ que cumple la condición 2 y 3 recomendada por el autor para garantizar un flujo estrictamente laminar.
- Las dimensiones del digestor se muestran en la [tabla 3.5](#), estas cumplieron además las condiciones 1 y 4 que se mostraron en el Capítulo II.

$h = 3.0$ m Condición (1)

$Lt/10 = 3.4$ m > $d_{eq} = 2$ m Condición (4)

Tabla 3.5. Dimensiones del digestor.

Dimensiones del digestor.	Valores
Ancho de túnel en m (at)	1.5
Largo de túnel en m (Lt)	34.0
Altura en m (h)	3.0
Ancho en m(ad)	8.5
Largo en m(ld)	6.0
Número de pasos(n)	4.0
Volumen (m ³)	152.0
Costo inversión total (\$)	79 344.00
Costo equipo (\$)	19 836.00

- Por la ecuación (37) se pudo determinar que la cantidad de biogás que puede producir la planta es de 182 m³/d.
- Siendo la cantidad de bioabonos generados de 1083 kg/d que es un producto de alto valor agregado y reporta ingresos en el orden de los \$ 292.00 / d.
- El costo calculado para la etapa de digestión fue de \$ 79 344.00 que incluyó todos los gastos de inversión adicionales a los gastos del equipamiento. Por lo que el costo del equipamiento fue de \$ 19 836.00.

Etapa de purificación

6. El flujo de aire necesario fue de 5.46 m³/d que representan 3.8 l/min similar al propuesto en la variante tecnológica I, que da la autora de la patente.
7. El costo del soplador resultó ser de \$ 72.00 con un consumo de potencia de 2.4 kWh/d y el del rotámetro fue de \$ 647.80.
8. El volumen calculado para el gasómetro por (38) fue de 3.8 m³.
9. La cantidad de sulfuro de hidrógeno en el biogás a la salida fue inferior al 0.01 % recomendado para usos en motores de combustión interna.
10. El costo del gasómetro y del depósito para el residuo calculado a partir (27) arrojó un valor de \$ 2 580.00.
11. Para un costo total de equipamiento en esta etapa de \$ 3 300.00.

Compresión y Almacenamiento:

4. Se seleccionó un compresor de aire de 10 atm de presión en la descarga y se asumió un flujo de trabajo de 15.2 m³/h que garantizó la compresión de los 182 m³ de biogás que se producirán en el día con una relación arranque parada de 2:2. Con este flujo se determinó el costo del equipo en el Peters, M. S. 2003. tabla 12.30 resultando un monto total de \$ 2968.00 actualizado con los índices de costo correspondientes. La potencia tomada del mismo texto fue de 2.13 kW, que operando las 12 horas necesarias significó un consumo de 25.6 kWh/d.
5. El volumen de la bala necesario fue de 8 m³ por lo que su costo fue de \$2996.00, alcanzándose un monto total de \$ 5964.00.

Generación de energía eléctrica.

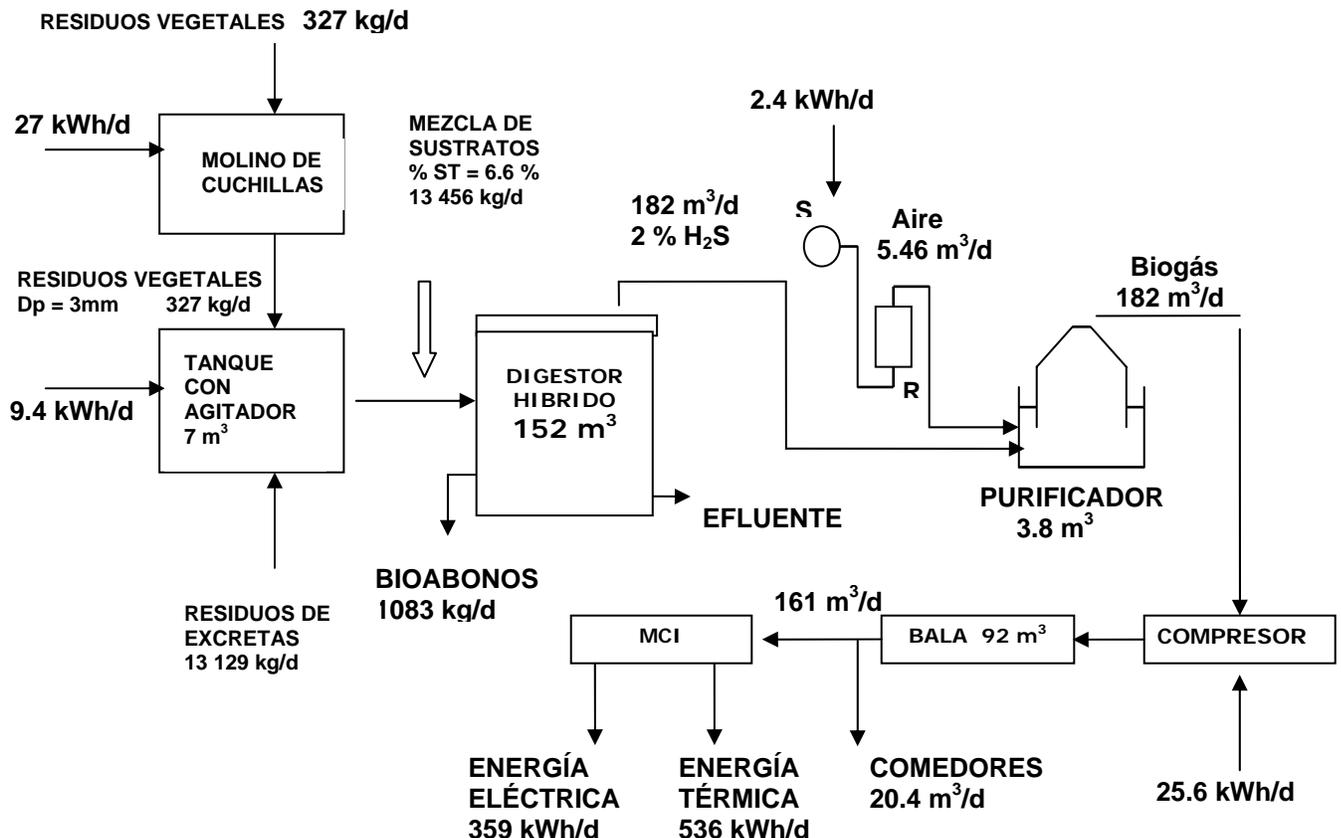
La [tabla 3.6](#) mostró la potencia y el costo del motor de combustión interna calculados para los 161.6 m³/d que se alimentan a este y que representaron 10 m³/h. A partir de este tipo de tecnologías se pueden generar unos 359 kWh/d eléctricos según la potencia calculada. Esto concuerda con los índices de producción de biogás de una experiencia alemana con una diferencia de 2 kWh eléctricos/d y según esta última se pudieran entregar además unos 536 kWh/d de energía térmica para usos en otros procesos con el biogás suministrado al MCI.

Tabla 3.6. Costo y potencia a instalar para generar 16 horas al día.

Tecnologías	Q _{MCI} (m ³ /h)	P _c (Kcal/m ³)	N _g (kw)	N _R ($\eta * kw$)	Costo (\$/kW)	Costo (\$)
Motores diesel	10	5500	64	22.4	300.00	6716.30

De esta forma quedaron dimensionados los equipos de la planta, las corrientes de entrada y salida de cada una de las etapas, los costos de inversión del equipamiento y los requerimientos de energía del proceso en general. ([Diagrama de flujo, figura 3.14](#))

Figura 3.14. Diagrama de flujo dimensionado para la granja Remberto Abad Alemán.

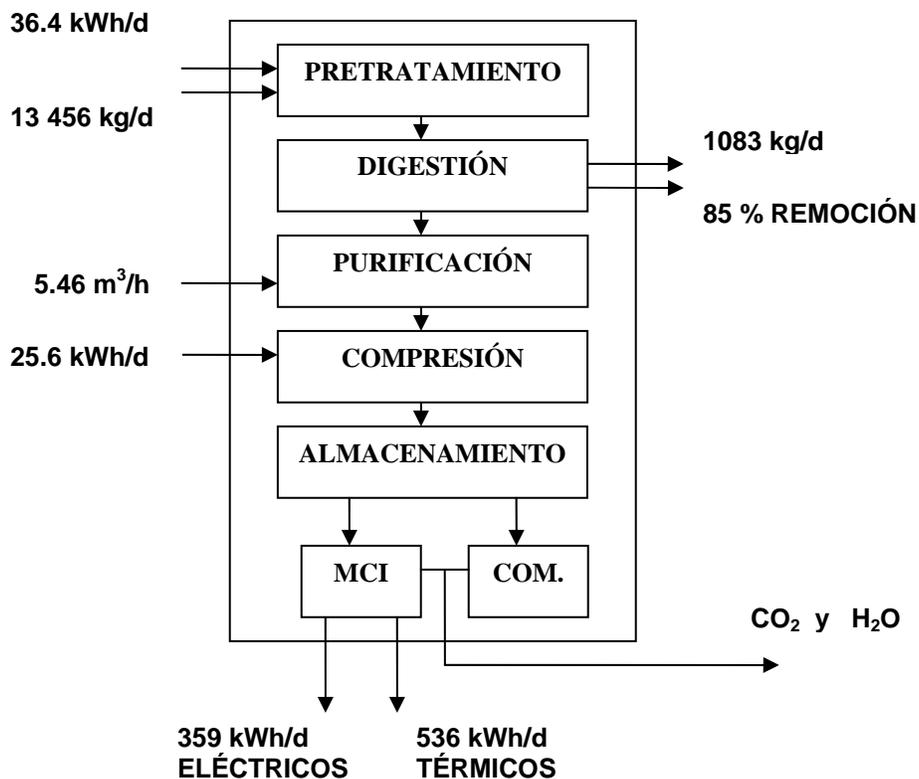


Del dimensionamiento de la planta para el estudio de caso se comprobó que la mezcla de residuos alimentada a la etapa de digestión alcanzó el 6.6 % de ST por lo que se justificó el uso de la propuesta tecnológica 2. La energía eléctrica consumida en el proceso en general representó el 17.9 % de la producida y el 7.2 % del total de la energía que se genera en el proceso. Además se pudo cubrir el 100 % de la demanda de biogás en los comedores lo que mejoraría considerablemente las condiciones de vida del personal que labora en la granja. Se propuso la entrega de 536 kWh/d de energía térmica producida a otros procesos de la granja, entre los que se incluyeron el calentamiento de agua para viviendas aledañas de trabajadores y operarios y el sacrificio de cerdos. Mientras, con los 359 kWh/d eléctricos que representan unos 10.8 MWh/mes se podría cubrir el 60.8 % de la demanda total promedio de la granja.

3.8.3 Análisis preliminar del efecto ambiental

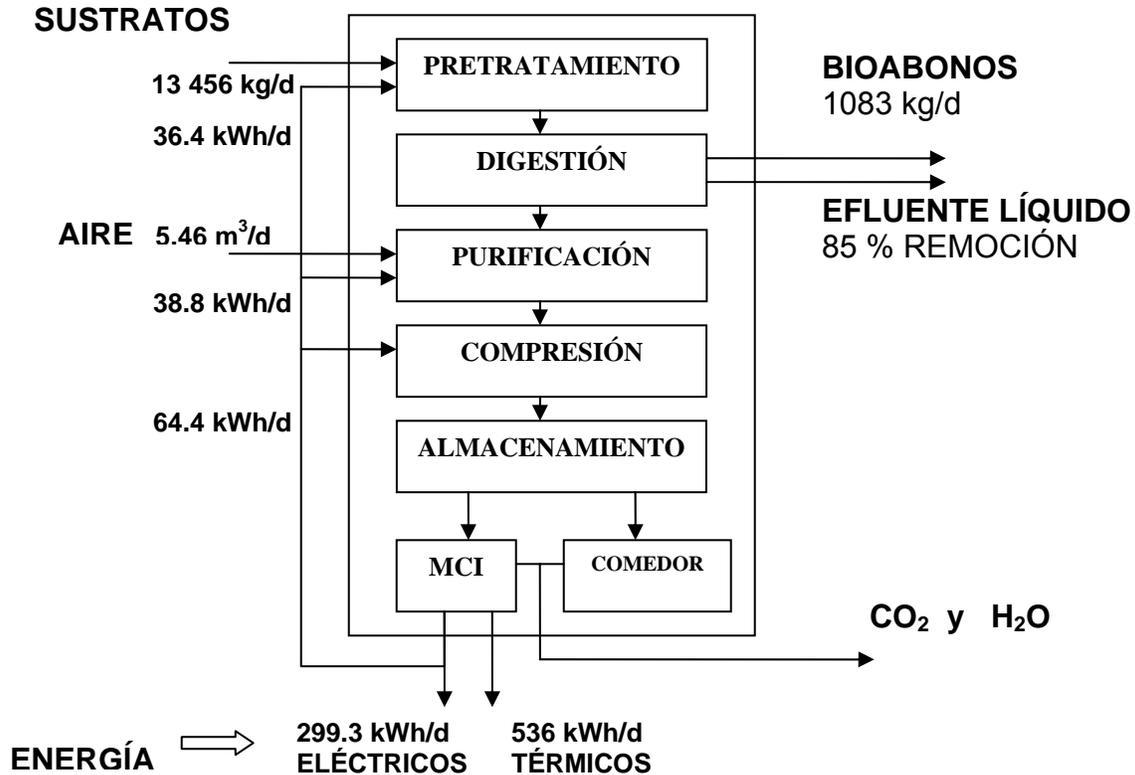
Con el fin de lograr una correcta adaptación de la propuesta se realizó un análisis del efecto ambiental provocado por las corrientes de entrada y salida del proceso y utilizando el método de minimización de impactos que estudia el proceso como una caja negra confeccionándose el esquema de la [figura 3.15](#).

Figura 3.15. Diagrama de cajas negras para el estudio del efecto ambiental de las corrientes de entrada y salida del proceso.



Del análisis de las posibles interconexiones del esquema anterior se confeccionó el siguiente, que trata de minimizar el efecto sobre el medio ambiente de cada una de las corrientes.

Figura 3.16. Diagrama de cajas negras para el estudio del efecto ambiental de las corrientes de entrada y salida del proceso.



Quedando como corrientes de entrada al proceso los sustratos con altos contenidos DQO (materia prima) y aire como requerimiento de la etapa de purificación y como salidas los gases de la combustión que como provienen de una fuente renovable de energía se considera que ese dióxido de carbono pertenece a su ciclo natural, otras de las salidas es el efluente líquido con una reducción de la carga contaminante de un 85 %, que son enviados al sistema de lagunas en que son dispuestos hoy para su uso posterior en el fertirriego. El resto son los productos finales del proceso entre los que se incluyen las dos formas de energía que se muestran en la [figura 3.16](#) y los bioabonos capaces de mejorar los suelos en sustitución de agroquímicos usualmente utilizados. Uno de los efectos ambientales negativos que se originan en la operación de la planta es el ruido, para lo cual se recomienda la compra de equipos que reduzcan este efecto

y el estudio de una matriz de impactos para valorar el impacto de la producción de biogás con fines energéticos en este caso de específico.

Efectos ambientales positivos en un año de operación de la planta:

- ◆ Dejar de emitir 39 312 m³ de metano.
- ◆ Permite el reuso del agua para el riego, posibilitando recuperar más de 3.5 millones de litros.
- ◆ Permite obtener 377 t de bioabonos.
- ◆ Se evita la tala de árboles por la eliminación del uso de 7300 m³ de leña en la cocción de alimentos.
- ◆ Se reduce la carga orgánica de contaminantes que se vierten al río Cayajaca.
- ◆ Se produce una energía que parte de una fuente renovable equivalente a 28.8 tep.
- ◆ Y se dejan de emitir gases causantes de efecto invernadero por la sustitución del combustible fósil para generar 93 276 kWh/a de energía eléctrica cuyas cantidades se mostraron en la siguiente [tabla 3.7](#).

Tabla 3.7 Cantidades de gases de efecto invernadero que se dejan de emitir.

Impactos ambientales	Gases	Factor emisión (g/ kWh)	Masa de gases(kg)
Lluvias ácidas	NOX	3.41	318.1
Gases dañinos	CO2	799	745 275
Efecto invernadero	CO	0.23	21.5
hidrocarburos	HC	0.083	7.7
Lluvias ácidas	SO2	0.0984	9.2

Donde se evidenció que los gases que en mayores volúmenes se emiten al medio son el CO₂ y los NO_x. Según factores de emisiones tomados dados por [Herminia, J. 2006](#) para la combustión de combustibles fósiles.

3.8.4 Evaluación económica final y análisis de sensibilidad.

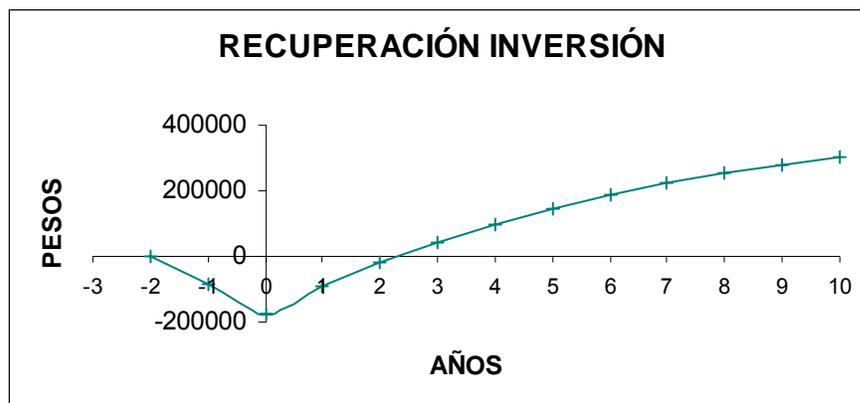
Para la evaluación económica de la propuesta primeramente se determinó el costo de adquisición de los equipos, capital total invertido, los costos totales de operación y los ingresos de la planta tal como se muestra en la tabla 3. 8.

Tabla 3.8. Valores del CA, CTI, CTP e Ingresos del estudio de caso.

Aspectos	Monto total	U/M
CA	43 642.00	\$
CTI	174 568.00	\$
CTP	27847.00	\$/a
Ingresos	156 493.00	\$/a

A partir de aquí se calcularon los indicadores dinámicos resultando una TIR de 29 % muy superior a la tasa de descuento utilizada para su cálculo lo que reduce al margen de riesgo por el incremento de la última, con un PRI de 2.2 años y un VAN de \$303666.00 tal como se mostró en la figura 3.12. Este resultado es superior al alcanzado por [Obaya, M. et al, 2004](#), para una planta de producción de biogás a partir de vinazas, quién reportó un PRI de 6 años, resultado que se debe a que estas plantas producen una menor cantidad de bioabonos debido a los altos tiempos de retención de sólidos y las altas diluciones de los sustratos tratados en ellas.

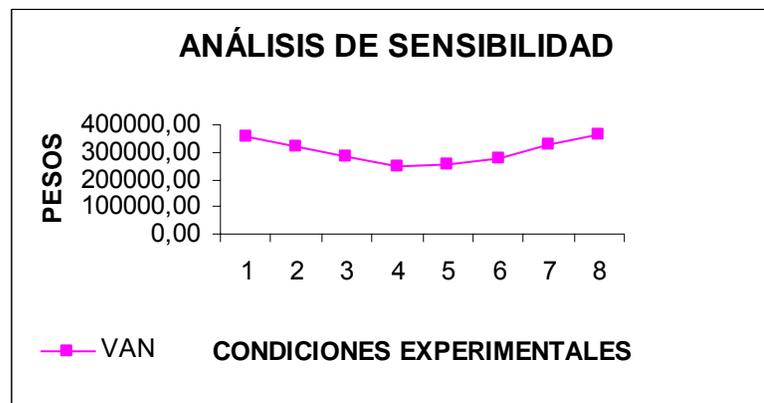
Figura 3.12. VAN contra años de explotación de la planta.



3.8.4-1 Análisis de sensibilidad.

De la evaluación de cada una de las condiciones experimentales resultó que los valores máximos del VAN se obtienen para los casos 1 y 8, cuando los costos de los bioabonos son máximos y la inversión es mínima (casos optimistas), sin embargo en las condiciones 4 y 5 (casos pesimistas) se evidenció que la pendiente de la curva fue imperceptible siendo la única variación entre ambas el costo de la energía eléctrica demostrándose la poca sensibilidad de esta inversión ante cambios en esta variable. Se observó además, que de 2 a 3 a pesar de que la inversión se hiciera mínima el VAN se redujo producto a una disminución en el costo de los bioabonos lo que indicó una mayor sensibilidad a los cambios de esta última variable que a los cambios en el capital total invertido (Figura 3.17). Esto se correspondió con lo planteado por Barreto, S., 2006, Obaya, C., 1999 y Miranda, et al., 1986 quienes aseguran que los bioabonos garantizan la rentabilidad de estas plantas.

Figura 3.17. VAN contra condiciones experimentales.



Se graficaron entonces los casos pesimistas y al determinar los indicadores económicos se concluyó que reportan valores de la TIR del 18 y 19 % aun superiores a la tasa de descuento y periodos de recuperación de la inversión inferiores a los tres años de operación de la planta con lo que se demostró la fortaleza económica de la propuesta tecnológica.(Figuras 3.18 y 3.19)

Figura 3.18. VAN contra años de explotación de la planta.

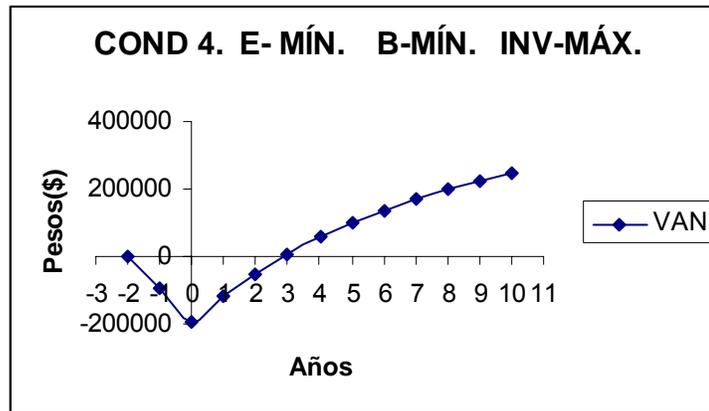
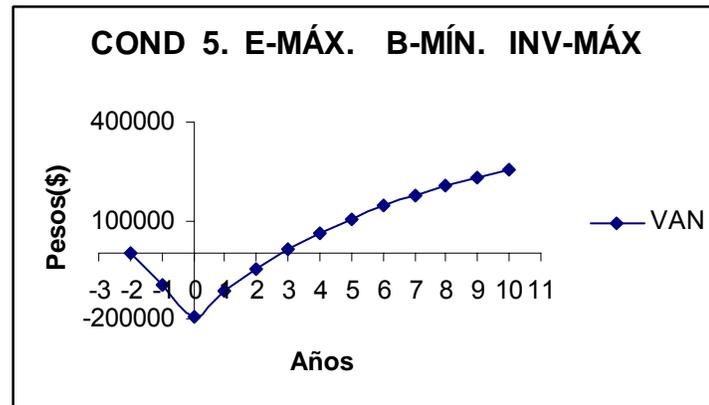


Figura 3.19. VAN contra años de explotación de la planta.



Leyenda:

E-energía. B-bioabonos
INV- inversión.
MÁX.-valor máximo.
MÍN.- valor mínimo.

Para la condición experimental 5 (figura 3.19) se observó un ligero mejoramiento de los indicadores calculados, que fueron debidos al incremento del precio de venta de la energía eléctrica, pero su repercusión como ya se evidenció en la figura 3.13 no fue determinante en la rentabilidad de la planta. Los gráficos para los casos optimistas fueron expuestos en el [anexo 15](#). En los mismos se alcanzaron valores de la TIR superiores al 40 % y PRI por debajo de los 2 años de operación de la planta.

Conclusiones parciales.

- Se realizó un estudio de los potenciales de biomasa del territorio espinoso que permitió conformar tres grupos de sustratos que incluyeron los sustratos complejos y menos complejos con % ST entre 8-10 % y los sustratos altamente diluidos con % Sólidos en suspensión < 2g/l.
- A partir de cada grupo de sustrato y de la aplicación de la estrategia se lograron conformar tres propuestas tecnológicas para la producción de biogás con fines energéticos que se diferenciaron solamente en las etapas de pretratamiento y digestión.
- Se realizó un estudio de caso para la selección de la tecnología de producción de biogás en la granja Remberto Abad Alemán, que permitió validar la efectividad de la estrategia modificada para este fin.
- El análisis realizado para la granja Remberto Abad Alemán permitió demostrar que es posible cubrir el 60 % de la demanda de electricidad y el 100 % de las necesidades de cocción de alimentos con biogás.
- La propuesta tecnológica 2 se adaptó al estudio de caso incluyéndose en ella un molino de cuchillas, un digestor híbrido, un purificador por método biológico, un compresor de aire con bala de almacenamiento y un motor de combustión interna, todo lo cual reportó una TIR del 29 %, un PRI de 2.2 años y beneficios ambientales considerables.
- El análisis de sensibilidad para la propuesta tecnológica 2, arrojó que aún para los casos pesimistas se obtienen valores de la TIR mayores que la tasa de descuento real y PRI inferiores a los tres años.

CONCLUSIONES.

1. Se realizó un estudio bibliográfico que permitió demostrar la pertinencia de hacer investigaciones, como la que se presenta en esta tesis, para la producción de biogás con fines energéticos en Cuba, debido a la necesidad de disminuir el impacto ambiental de la generación de energía y a las posibilidades que ofrece a esta tecnología la descentralización del sistema energético con grupos electrógenos.
2. Se demostró teóricamente, que la mayoría de los autores refieren la tecnología del biogás solamente como la etapa de digestión, pero que es necesario además, considerar como etapas de interés para la selección tecnológica en un proceso de producción de biogás con fines energéticos, el pretratamiento de los sustratos, la purificación del biogás, su compresión - almacenamiento y la generación de energía eléctrica.
3. Se demostró también, que los sustratos reportados para el territorio espirituario que mayores volúmenes de biogás podrían generar se agrupan en 7 escenarios que incluyeron los residuales de la industria azucarera, los residuos de cosechas y las excretas vacunas y porcinas.
4. Se obtuvieron tres propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos que pueden aplicarse a los 7 escenarios formados mediante el uso de la segunda parte de la estrategia de asimilación de tecnologías.
5. Se logró identificar a la propuesta tecnológica 2 como la que mejor se adapta a las condiciones de la granja, demostrándose su factibilidad técnica, económica y ambiental.
6. Se brindó un procedimiento específico para la transferencia tecnológica de un proceso de producción de biogás con fines energéticos que puede ser aplicable a otros grupos de sustratos, a partir de modificaciones a la estrategia propuesta por Ley, N., 2006 para la asimilación de tecnologías de plantas químicas.

RECOMENDACIONES.

1. Profundizar en el estudio de las tecnologías de producción de biogás para enriquecer las propuestas tecnológicas.
2. Realizar estudios que permitan definir indicadores cualitativos y/o cuantitativos para la selección de tecnologías de biogás.
3. Comprobar la adaptación de las propuestas tecnológicas 1 y 3 aplicándolas a escenarios que se incluyan dentro del 1er y 3er grupo de sustratos.
4. Discutir la propuesta tecnológica 2 con la dirección de la granja Remberto Abad Alemán para proceder a su implementación y evaluación.
5. Aplicar la estrategia modificada de asimilación de tecnologías de biogás, siempre que se desee incrementar el uso energético de la misma, en cualquier lugar del país.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anónimo III "Technology Transfer: An Overview" FutureScope 2000.
2. Arriola J. "Los nuevos países industrializados. Transferencias Tecnológicas y subdesarrollo". Editora IEPALA (Madrid). 1988.
3. Ávalos I G. "Transferencia de tecnología en Ciencia, Tecnología y Desarrollo. Interrelaciones teóricas y metodológicas". Ed. Nueva Sociedad.1994.
4. Barreto, S. Estrategia para la inserción Industrial de la digestión anaerobia en el desarrollo regional. Tesis presentada en opción al grado de DrC. 2006
5. Bart, K. "Technology transfer: Ensuring marketable Inventions. Part 3". Chemical Engineerinf. 106(2):96.1999.
6. Behrman D. "Ciencia, tecnología y desarrollo. La aportación de la UNESCO". Editora UNESCO. 1979.
7. Borroto Bermúdez, A y Col. Energización de comunidades rurales ambientalmente sostenible. [Universidad](#) de Cienfuegos. Ediciones LTDA [Colombia](#). 108 p. 1999.
8. Braun, R. Potential of Co-digestion. Limits and Merits. Vol 4. p7. 2002
9. Cálculo de los costos de los equipos disponible en:
<http://www.maches.com>, costos de equipos \ Matches provides.
10. Castro F. "Crisis económica y social en el mundo". La Habana.1983.
11. CEDATOS. 2007. disponible en <http://www.cedatos.com>
12. CIPAV. Búsqueda de patentes. Proyecto para la utilización del biogás como reemplazo de combustible diesel en motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica. 1997
13. CITMA. Informe sobre el potencial de biogás en la provincia de Sancti Spíritus. 2006.
14. Claire Sink Dr. Clyde W. Frank, EM's Fundamentals of Technology Transfer EM'sFundamentals of Technology Transfer.1998. disponible en:
<http://www.nttc.edu/maps/navbar.map>.
15. Cruz. R. Fundamentos de marketing p 36. 1996.
16. DAOM. Diagnóstico ambiental de oportunidades de minimización. 2000

17. Díaz, M., Introducción de digestores de biogás en la provincia de las Tunas. Un intercambio con el Instituto de Energía de Hanoi. 2006.
18. Doria, A. Energías Alternativas. Programa Con/Ciencia. CIC. Ed. Doria, A. Grafica. 2001.
19. Dueñas Henry. Transferencia Tecnológica. Análisis Sectorial. Sociedad de la Información. CINTEL. 2002.
20. Edelman, W. , Engeli, H. and Gradenecker, M., Co-digestion of organic solid waste and sludge from sewage treatment. Water Science and technology. Vol 41, No 3. pp 213 – 221. 2000.
21. Energy center Winconsin. Tinedale Farms anerobic digestion. A biomass energy project, 2002. Disponible en : [http:// www. Manurenet. Anaerobic digestion](http://www.Manurenet.Anaerobicdigestion).
22. Fernández, E., Procedimiento para la purificación del biogás. Tesis presentada para optar por grado científico de DrC. 1999.
23. Ficha de Datos de Seguridad Según Directiva 2001/58/CE. Hierro (II) Sulfuro cilindros PRS, 2007. Disponible en:
file:///D:/referencias%20Sulfuro%20cilindros%20PRS%20Ficha%20de%20datos%20de%20seguridad%20Panreac%20Qu%EDmica,%20S_A.htm
24. Fidel Castro Díaz Balart. Ciencia, Tecnología y Sociedad. Ed Científico -Técnico, La Habana- 2003
25. Florencio, L. J. A. Field and G, 1997. Lettinga. high-rate anaerobic treatment of alcoholic wastewaters. Braz. J. Chem. Eng. vol. 14 no. 4 São Paulo Dec. 1997.
26. Gopinath, S. Cogeneration Expanding in the Indian Sugar Industry. Newsletter of the International Cane Energy Network "International Cane Energy News", July 1997, 8 p
27. Guerrero L., Alkalay D., Suárez M. Adherencia microbiana para un sistema anaerobio de lecho fluidizado. 1998.
28. Guerrero L., Alkalay D., Suárez M. Adherencia microbiana para un sistema anaerobio de lecho fluidizado. 1998.
29. Hamoda M. F., Kennedy K. J., Anaerobic treatment of beet waste in a stationary fixed- film reactor. 1986.

30. Haug, R. T., Lebrun, J. T. y Tortorici, L. D. Thermal pretreatment of sludge. A field demonstration. Journal Water Pollution Control Federation. 55, 1, 23 - 34. 1983.
31. Hermidas, O. F. Diseño y evaluación de un biodigestor para obtener gas metano y biofertilizante a partir de la fermentación de cachaza y residuos agropecuarios. 2006.
32. Herminia, J. et al. Tabloide universidad para todos. Protección ambiental y producciones más limpias. 2006.
33. Hernández, C. A. Segundo Forum Nacional de Energía. Biogás, Comisión Nacional de Energía (CNE). 1990.
34. Herrera A. O. "Ciencia y Política en América Latina". Editores del siglo XXI. México 1971.
35. Hidalgo A. "Organización y gestión de la Innovación tecnológica". Universidad Politécnica de Madrid. 1994.
36. Hwang, K., Shin, E. y Choi, H. A mechanical pretreatment of waste activated sludge for improvement of anaerobic digestion system. Water Science and Technology. 36, 12, 111 - 116. 1997.
37. ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. Manual de los derivados de la caña de azúcar. 2da edición. Colección GEPLACEA. Serie Diversificación. 1990.
38. Índices, X Taller Nacional de Biogás con participación extranjera, Sancti Spíritus, 2006.
39. Jerger, D. E. Dolenc, D.A. y Chynoweth, D. P. Biogasification of woody biomass following physical and chemical pretreatment. Proceeding of 7th Symposium on Energy Biomass and wasters. 1983.
40. Jewel J., Anaerobic sewage treatment. 1987.
41. Katz J.M. "Importación de Tecnología, aprendizaje e Industrialización dependiente" México. 1986.
42. Kotelnikov V. "APCTT TECHNOLOGY TRANSFER. Ten3 Technology Transfer". 2001.

43. Ladine R. C., Wat. Poll J. Anaerobic fermentation / filtration of potato processing wastewater. 1982.
44. León Mursuli; A., Barreras Cardoso, E. y Romero Romero, O. Recopilación bibliográfica de tecnologías existentes en Cuba y el Mundo para producir biogás. 2006.
45. León, G. S. Y. CONTRUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE BIODIGESTORES EN COMUNIDADES RURALES DE NICARAGUA. (CIPRES). 2003.
46. Levis, A. X Taller Nacional de Biogás con participación extranjera. Diseño y Construcción del Sistema Biogás Nord en el Central Enrique José Varona. 2005.
47. Ley G, N. Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles. Tesis para optar por el título de doctor en ciencias. 2006.
48. Ley N, González E. y Col "Un modelo para la asimilación de tecnologías a partir de patentes de productos derivados de la Industria Azucarera". Revista Centro Azúcar. ISSN 0253 5757. Número 1. 2006.
49. López G. L. La producción de biogás a partir de desechos pecuarios y agroindustriales: una alternativa energética. 2006.
50. López T, M. "Procedimiento de pretratamiento para mejorar la digestión anaerobia de residuos sólidos". Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. 2000.
51. López Varela, A., Cisnero Reyna, Y., y Macías Socarrás, I. Consideraciones sobre la utilización del biogás. Metodología para la construcción de una pequeña planta de Biogás. 1999.
52. Lugones L, B. Análisis de biodigestores. Revista Energía y Tú, No 22; abril- junio 2003; P 12-15.
53. Mähner P and Bernd Linke. Biogas production from energy crops in Germany. X Taller Nacional CON PARTICIPACION EXTRANJERA: "ACTUALIZACION Y PERSPECTIVA PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS EN CUBA". SANCTI SPIRITUS 2006.

54. Marcos, A., Aníbal. B. y Inocente P. Nexos entre la generación descentralizada y las fuentes renovables de energía. 2003.
55. Meneses, R. E., Pérez, M. D. "Establecimiento y evaluación de indicadores de desarrollo sostenible en la electroenergética cubana" .Conferencia Internacional "Etica y Cultura del Desarrollo: Construyendo una economía Sostenible". 1998.
56. MINAGRI., Datos buscados en la Dirección Provincial de suelos y fertilizantes del MINAGRI de la provincia de Sancti Spíritus. Departamento de suelos, Abril 2007.
57. MINAZ., Datos buscados en la Delegación Provincial del MINAZ en Sancti Spíritus, Abril 2007.
58. Miranda, A. et al 2007. XII Taller Nacional de Biogás. La producción de biogás a partir de RSU en el vertedero de calle 100. 2007.
59. Miranda, R et al. Factibilidad económica de la producción de biogás a partir de residuales, economía y desarrollo. 1986
60. Moletta R. Water Science and technology. Vol 51. No 1. p 137-144, 2005.
61. Montalvo. S., Guerrero. L., Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. 2003.
62. National Academy of Sciences (NAS), Methane generation from human, animals and agricultural wastes.report of an Ad Hoc panel of the advisory Comitee on technology innovation. Board on Science and technology for internacional development Commission on Internacional. Relations national rescarch. Council. Waschintong DC, 2005. Disponible en: <http://res2.agr.ca/initiatives/manurenet/download/methane-generation-1997.p>
63. Obaya, M .C. et al. Tratamiento combinado de las vinazas de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. Revista Tecnología del agua. Nro. 249, junio 2004. Pág. 78-85.
64. Obaya, M.C. Biogás de residuos ICIDCA. Manual de derivados de la caña de azúcar: ABIPTI, 1999.
65. Pavlov, K.F. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. 1981.
66. Peter s M. S., Timmerhaus K. D. "Plant Design and Economics for Chemical Engineering". 2003.

67. Pinnekamp, J. Effects of thermal pretreatment of sewage sludge on anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 21, 97-108. 1989.
68. Rebutisch Eric "New Insights Into the International Technology Transfer" Process. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139. Technology and Innovation Management Division. 2002.
69. Red Solar. Programa Desarrollo de las fuentes nacionales de energía. 2004.
Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/bibliotecaprogramabiogas.htm>
70. Rodríguez-Vázquez, R., Villanueva-Ventura, G. y Rios-Leal, E. Sugarcane Bagasse pith dry pretreatment for single cell protein production. *Bioresource Technology*, 39, 17-22. 1992.
71. Romero Romero, O. Evaluación técnico económica de diferentes variantes para cogenerar en un central con destilería anexa/Osvaldo Romero Romero: Héctor Pérez de Alejo Victoria.—Tesis para optar por el grado científico de Master of Science en eficiencia energética y Diseño térmico. UCF. 1997.
72. Romero Romero, O. Metodología para incrementar el aporte de electricidad con bagazo y alternativa de combustible para generar fuera de zafra/ Osvaldo Romero Romero; Rolando Alfredo Hernández León; Héctor Pérez de Alejo Victoria. 1995
73. Ropars, M., Marchal, R., Pourquié, J. y Vandecasteele, J. P. Large-Scale enzymatic hydrolysis of agricultural lignocellulosic biomass. Part 1: Pretreatment Procedures. *Bioresource Technology* 42, 197 – 204. 1992.
74. Rosaball J., Valle M. "Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas" Tomo II. Editora ENPES. La Habana. 1989.
75. Safley L. M. and Westerman P. M. Producción de biogás en lagunas anaerobias. 1988.
76. Savran V. Una solución energético – ambiental para reducción de contaminantes agropecuarios, como contribución al manejo integrado de la cuenca Zaza. Tesis presentada en opción al título académico de Master en Gestión Ambiental y Protección de los Recursos Naturales. Universidad Camilo Cienfuegos. Matanzas. 2005.

77. Sosa, R., *Construcción y evaluación de un biodigestor tubular de polietileno. Tesis para optar por el título de Máster en Ciencias. 1999.*
78. Source reduction as an option for municipal waste management. H. M. Freeman. En: *Integrated Solid Waste Management: Options for legislative action.* F. Kreith (ed.). GENIUM Publishing Corporation, New York, 1990.
- 79. Technology Selection. The appropriate mix of measurement technologies for a Triad project depends on several factors. Disponible en: <http://www.triadcentral.org/mgmt/meas/select/index.cfm>**
80. Toldr F., Fluidized bed anaerobic biodegradation of food industry wastewaters. 1987.
- 81. Turrini, Enrico. El camino del Sol. Editorial CUBASOLAR. 2006.**
82. Turzo, E., J. Gutiérrez., Ana More., M. Ortega y Ana Sanz. Estudio del tiempo de retención (T.R.) y de sinergia de deyecciones de ganado, en el proceso de fermentación anaerobia. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1984. pp. 6-47.
83. ULRICH, G. D. *Procesos de Ingeniería Química.* 1990.
84. Use of GDSS in technology selection: Experiences and findings. Disponible en: <http://csdl2.computer.org/comp/proceedings/hicss/2001/0981/01/09811059.pdf>
85. Valdés D, A. Tratamiento de anaeróbico de productos Residuales para la producción de biogás. *Revista ATAC.* Vol 2. 2002.p 9-12. 2002.
86. Werner, J. *Symposiun on Anaerobic Digestion.* Wales. 1989. Disponible en: www.medioambiente.cu/download/2003/indicadores%20socioecon%F3micos.pdf
87. Ying-Chih, Ch., Cheng-Nam, Ch., Jih-Gaw, L. y Shwu-Juan, H. Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Water Science and Technology,* 36, 11, 155 - 162. 1997.
88. Young J. C., *Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters.* 1991.
89. Young J. C., McCarty, Wat. Poll J., *Filtro anaerobio de tratamiento de residuales.* 1968.

90. Young J. C., Poll J. Two- stage cyclic operation of anaerobic filters. D. E. Howerton. 1987.
91. Zamora, E. Metodología para el diseño de un biodigestor. 2001.
92. Zelkowitz M. V. "Assessing Software Engineering. Technology Transfer within NASA". 1994. Industry association/government partnerships: a model for meeting industry-wide technology need.