

**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA EN PLANTAS DIESEL PARA  
GENERACIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE  
PARA LA HACIENDA PORCICOLA Y AGRÍCOLA EL RECREO**

**OSCAR DARÍO ORDOÑEZ JAIMES  
JAVIER MAURICIO JIMÉNEZ JÁCOME  
REMBERTO PÉREZ URREA**



Universidad Autónoma de Bucaramanga

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA UNAB  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA EN PLANTAS DIESEL PARA  
GENERACIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE  
PARA LA HACIENDA PORCICOLA Y AGRÍCOLA EL RECREO**

**OSCAR DARÍO ORDOÑEZ JAIMES  
JAVIER MAURICIO JIMÉNEZ JÁCOME  
REMBERTO PÉREZ URREA**

**Trabajo de grado para optar por el título Especialista en Gerencia de  
Recursos Energéticos**

**Asesor:  
M.Sc Carlos Alirio Díaz**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA (UNAB)  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi Dios que todo lo puede hacer realidad, a mi esposa Arelis Mateus quien ha estado conmigo en todas las etapas de mi vida y siempre a pesar de las circunstancias ha tenido FE en mí y yo siempre he tenido FE en ella.*

***Te amare por siempre***

*A las personas que han creído en mí y a las que no.*

*A Diego Jaimes QEPD.*

*A la vida, aun espero cumplir mis sueños.*

*A mis amigos de la especialización*

***El desafío de mi vida es descubrir que tan lejos puedo llegar***

***Gracias totales.***

*Oscar Darío Ordoñez Jaimes*

A mis padres por apoyarme siempre, por darme animo en los momentos difíciles  
por quererme tanto y hacer de mi lo que soy.

A mis hermana por acompañarme siempre y hacer reír y alegrarme cada día.

A mi hermano por apoyarme y mostrarme que los sueños se pueden realizar.

A Liseth por amarme tanto, escucharme y siempre estar a mi lado  
acompañándome y dándome fuerzas para salir adelante.

A Tita que desde el cielo nos cuida.

A nemitto por jugar conmigo y alegrarse siempre que nos vemos

A mis amigos de la especialización y todos aquellos que me acompañan cada día.

Javier Mauricio Jiménez Jácome

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA	14
2.1 ASPECTOS IMPORTANTES DEL BIOGÁS	14
2.2 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.	14
2.3 PROPIEDADES DEL BIOGAS	15
2.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA	16
2.5 QUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO	18
2.6 VARIABLES QUE AFECTAN AL PROCESO DE DIGESTIÓN	20
3. IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DE LAS EMISIONES DE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS.	26
4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE ANIMAL.	28
4.1 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS	29
4.1.1 Sistema de depuración de CO <sub>2</sub>	29
4.1.2 Sistemas de purificación del ácido sulfhídrico	30
4.2 CONSECUENCIAS DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO SOBRE LAS PIEZAS DE LOS EQUIPOS	30
4.3 PROCESOS DE ELIMINACIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO PRESENTE EN EL BIOGÁS.	32
4.4 SISTEMA DE REMOCIÓN DE AGUA.	34
5. GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN MOTORES DIESEL UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	35
5.1 ADECUACIÓN DEL MOTOR DIESEL A UN SISTEMA DE COMBUSTIBLE DUAL	35

5.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL CON COMBUSTIBLE DUAL.	37
5.3 DISPOSITIVOS MEZCLADORES PARA COMBUSTIBLE DUAL.	39
5.4 CÁMARAS DE MEZCLADO SIMPLE.	39
6. SITUACIÓN ACTUAL DEL PROBLEMA	41
6.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GENERADOR	42
6.2 CALCULO DE VOLÚMENES DE BIOGÁS, CANTIDAD DE MATERIA SECA Y UNIDADES PORCINAS REQUERIDAS PARA SATISFACER LA DEMANDA ENERGÉTICA	43
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA.	45
7.1 CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA.	45
8. ANÁLISIS DE VARIABLES CASO BÁSICO	49
8.1 FLUJO NETO ACUMULADOS DE CAJA DEL PROYECTO	51
9. SENSIBILIDADES PARA BIODIGESTOR TIPO BOLSA	59
10. SENSIBILIDADES PARA BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA	66
11. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	77

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Usos del biogás	16
Figura 2. Etapas digestión anaerobia.	19
Figura 3 Proceso digestión	23
Figura 4 Opciones de Tratamiento para el Gas Natural	34
Figura 5. Mezclador en unión T	40
Figura 6. Cámara de mezclado simple con válvula de control manual	40
Figura 7 Precio KW/H últimos 12 meses	47
Figura 8 Precios históricos del precio del Acpm desde 2003 hasta 2013.	48
Figura 9. VPN VS TIR	50
Figura 10. Biodigestor con geomembrana	51
Figura 11. Flujo de caja neto acumulado con préstamo	52
Figura 12. Flujo de caja neto acumulado sin préstamo.	52
Figura 13 Flujo de caja neto acumulado sistema de geomembrana con préstamo.	53
Figura 14 Flujo de caja neto acumulado sistema de geomembrana sin préstamo.	53
Figura 15. Máximo endeudamiento del sistema de biodigestor con bolsas.	54
Figura 16. Máximo endeudamiento del sistema de biodigestor con geomenbranas	55
Figura 17. Payout sistema de biodigestor en bolsa y con financiamiento.	56
Figura 18. Payout sistema de biodigestor con bolsa con sin préstamo.	56
Figura 19. Payout con crédito en sistema de geomembranas.	57
Figura 20 .Payout sin crédito en el sistema de geomembrana. IVAN	58
Figura 21 .Sensibilidad de la inversión.	59
Figura 22. Sensibilidad capital de trabajo.	61
Figura 23. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás.	62

Figura 24. Sensibilidad en el valor del ACPM	64
Figura 25. Sensibilidad de la inversión en biodigestor membrana.	67
Figura 26. Sensibilidad inversión capital de trabajo biodigestor geomembrana	68
Figura 27. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás en la combustión dual biodigestor de geomembrana	70
Figura 28 Sensibilidad de la inversión en el valor del acpm para biodigestor de geomembrana.	71

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Composición y propiedades del biogás bajo condiciones estándar (0°C, 101,325 KPa).	15
Tabla 2. Parámetros termodinámicos del CH <sub>4</sub> en condiciones normales.	16
Tabla 3. Características de digestión anaerobia en residuos de animal	29
Tabla 4 Porcentaje de metano obtenido por digestión anaerobia a partir de residuos de animal.	29
Tabla 5 Producción de biogás a partir de estiércol de varios animales.	29
Tabla 6 Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso .	31
Tabla 7. Especificaciones de la planta.	43
Tabla 8. Consumo planta	43
Tabla 9. Relación consumo.	44
Tabla 10. Consumo energético sin proyecto	49
Tabla 11. Consumo energético con proyecto	49
Tabla 12. Ahorro anual generado por la implementación del proyecto con Biodigestor	50
Tabla 13. Sensibilidad de la inversión.	60
Tabla 14. Sensibilidad de la inversión	61
Tabla 15. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás.	63
Tabla 16. Sensibilidad en el valor del ACPM	64
Tabla 17. Sensibilidad de la inversión en biodigestor membrana.	66
Tabla 18. Sensibilidad inversión capital de trabajo biodigestor geomembrana	68
Tabla 19. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás en la combustión dual biodigestor de geomembrana	69
Tabla 20. Sensibilidad de la inversión en el valor del acpm para biodigestor de geomembrana.	71

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Flujo de caja del proyecto con biodigestor en bolsa	78
ANEXO B. Pautas del proyecto biodigestor en bolsa	79
ANEXO C. Indicadores financieros biodigestor en bolsa	80
ANEXO D. Flujo de caja proyecto biodigestor con geomembranas	81
ANEXO E. Pautas del proyecto biodigestor con geomembranas	82
ANEXO F. Indicadores financieros biodigestor con geomembrana	83
ANEXO G. Cuadro de sensibilidades	84
ANEXO H. Flujo de caja sensibilidad en inversión de bienes de capital biodigestor de bolsa con financiación	85
ANEXO I. Flujo de caja sensibilidad en capital de trabajo biodigestor de bolsa con financiación	86
ANEXO J. Flujo de caja sensibilidad en porcentaje de biogas biodigestor de bolsa con financiación	87
ANEXO K. Flujo de caja sensibilidad en valor del acpm biodigestor de bolsa con financiación	88

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA UTILIZANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE PARA LA HACIENDA PORCICOLA Y AGRÍCOLA EL RECREO.

**AUTORES:** OSCAR DARÍO ORDOÑEZ JAIMES,  
JAVIER MAURICIO JIMENEZ JACOME,  
REMBERTO PÉREZ URREA

**PALABRAS CLAVES:** BIOGÁS, ENERGÍA, GENERACIÓN ELÉCTRICA, UNIDAD PORCINA.

La tendencia del desarrollo tecnológico y del cuidado del medio ambiente incentivan fuertemente a través de disposiciones políticas y de entidades privadas las fuentes de generación alternativas y limpias, entre ellas la generación de energía eléctrica empleando un sistema dual de ACPM y Biogás; Para aquellas regiones donde el suministro de energía de la red eléctrica es insuficiente como es el caso en estudio, contamos con la oportunidad de abastecer el consumo eléctrico empleando biogás de las excretas porcinas de una Finca llamada “El Recreo” ubicada en Cimitarra (Santander). El consumo eléctrico de la finca es determinado a partir de los requerimientos de iluminación y consumo de bombas empleadas para el riego de los cultivos de Guanábana para exportación. Para la generación de Biogás es necesario el montaje de un sistema de Biodigestor con todos los accesorios que se requieren para cumplir con un proceso seguro y confiable como son por ejemplo, válvulas de seguridad, filtros de H<sub>2</sub>S, secadores, mezcladores de aire-biogás, tubería flexible o mangueras de gas, válvulas de bloqueo; El biodigestor debe cumplir con los requerimientos de volúmenes de biogás y kilogramos de materia seca porcina en relación con el consumo de la planta generadora.

El proyecto realiza el estudio de prefactibilidad económica en la planta diesel para la generación eléctrica utilizando biogás de las excretas porcinas como combustible dual; El estudio se realiza empleando conceptos financieros y de análisis económicos para un caso básico determinando el VPN, TIR, PAYBACK, y otras variables para un análisis detallado; Además de ello se realiza un estudio de sensibilidades en las variables de más peso y más críticas del proyecto, como son: costos de inversión, porcentajes de biogás y valores de ACPM, con ello se determina el riesgo y la probabilidad de que ocurran los eventos para los valores de Switching value; como resultado de este estudio se determina la viabilidad del proyecto, los riesgos que puede asumir los inversionistas o el dueño de la finca, el dinero que espera obtener como utilidad, el tipo de biodigestor más rentable para el negocio y de esta manera tomar la decisión correcta y minimizar los riesgos en el proyecto.

## INTRODUCCIÓN

La hacienda el recreo es un latifundio agrícola y porcicola que está ubicado en el municipio de cimitarra, esta tiene 8 hectáreas de cultivos de guanábana que constantemente requieren mantener en riego o en constante hidratación, a su vez posee marraneras donde se acumulan cerca de 5500 cerdos entre machos hembras y lechones en etapa de crecimiento.

La hacienda posee nacimientos y suministros de reservas hídricas a 200 metros aproximados de los cultivos y 800 metros de las marraneras, actualmente se tiene 2 motobombas eléctricas que se encargan de suplir las necesidades de hidratación tanto de las 8 hectáreas de cultivo, como de las cerdos.

Desde siempre, la red ha presentado constantes interrupciones y picos que afectan tanto los aparatos eléctricos, como del consumo de las plantaciones y de las marraneras, ocasionando inconvenientes de limpieza de las mismas y generando focos de contaminación que atraen enfermedades y a su vez se presenta disminución en la producción del cultivo, debido a que estos requieren el suministro hídrico constantemente debido a las altas temperaturas que en esa región de se dá.

Con base en estos principios surge la necesidad de implementar sistemas de generación energética más eficientes, confiables y rentables, que sean atractivos para las personas que las utilicen en cuanto ahorro y maximización de los recursos y que sean más amigables con el medio ambiente.

En la siguiente monografía se hace un estudio de prefactibilidad económica en plantas diesel para generación eléctrica utilizando biogás como combustible, con esto se busca mostrar la rentabilidad o no del proyecto de inversión que se realizara en la hacienda el recreo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La hacienda el recreo se encuentra a 1 hora y media del municipio de cimitarra, departamento de Santander, cuenta con 8 hectáreas de cultivos de guanábana la cual requieren una constante hidratación por medio de riego y goteo, el líquido es suministrado por 2 bombas que extraen el líquido de un nacimiento a 200 metros aproximados de distancia, cada bomba de 20 HP trabaja por 12 horas constantes en los horarios de 5 Am a 5 Pm todos los días de la semana, los 365 días el año.

Debido a las altas temperaturas en la cual se ve el cultivo es necesario que se mantenga en constante hidratación para que no hallan perdidas en la productividad, a su vez para el consumo de la hacienda y las marraneras se requiere un consumo diario de 10 KW, esto sumado nos da un consumo máximo de 50 KVA teniendo en cuenta un  $FP=0,8$ , cabe resaltar que la necesidad de realizar este proyecto de generación, nace de los altos costos del ACPM y los constantes impedimentos geográficos que hacen más difícil el suministro a las electrobombas, sumándole constantes fallas a la red que dejan a la hacienda sin suministro eléctrico constantemente y con esto se ha perjudicado la productividad de los cultivos.

Debido a esto y a que en la hacienda el recreo se cuanta con un gran número de cerdos, nace la necesidad de estabilizar el sistema eléctrico que se requiere por medio de un sistema de biodigestor que generara biogás a una planta inicialmente que trabaja con ACPM pero se adaptara para que pueda trabajar dualmente con ACPM y biogás del biodigestor logrando con esto un suministro eléctrico más constante y mejorando la producción notablemente ya que en cultivos aledaños a la hacienda se ha implementado sistemas similares, logrando la hidratación constante del cultivo y por ende se han alcanzado aumentos hasta del 50% en la producción de los cultivos de guanábana.

## 2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

### 2.1 ASPECTOS IMPORTANTES DEL BIOGÁS

#### DEFINICIÓN DE BIOGÁS

El biogás se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias. El biogás se produce en un recipiente cerrado o tanque denominado biodigestor, este puede tener forma cilíndrica o esférica; posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal o humano, las aguas sucias de las ciudades, residuos de mataderos o industriales) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. El proceso de fermentación anaerobia que ocurre en el interior del biodigestor convierte la materia orgánica compleja en un gas combustible con alto contenido de metano (biogás) dejando como residuo sólido un fertilizante.

#### 2.2 COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS<sup>1</sup>.

Este gas está formado por:

- Metano (CH<sub>4</sub>): 40-70% vol. = De características combustibles
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30-60%
- Otros gases: Hidrógeno (H<sub>2</sub>): 0-1%; Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S): 0-3%

---

<sup>1</sup> Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor para obtener biogás a partir de desechos. Propiedades y composición del biogás. Recuperado el Marzo 06 de 2008 de: <http://proyectobiogas.blogspot.com/2008/03/propiedades-y-composicion-del-biogas.html>.

## 2.3 PROPIEDADES DEL BIOGAS<sup>2</sup>

Dependen de la presión, de la temperatura y la humedad.

Los factores para caracterizar el biogás son:

- Cambio de volúmen al variar la presión y la temperatura.
- Cambio del valor calorífico, al variar la temperatura, presión y/o contenido de agua.
- Cambio del contenido de vapor de agua cuando cambia la temperatura y presión.
- El valor calorífico del biogás es cerca de 6 Kwh por m<sup>3</sup>, este valor corresponde a cerca de un litro de Diesel.

**Tabla 1. Composición y propiedades del biogás bajo condiciones estándar (0°C, 101,325 KPa).**

Componente						
						65% CH <sub>4</sub>
						40%CO <sub>2</sub>
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	60%CH <sub>4</sub>	1% resto
Fracción en volumen [%]	55 - 70	27-44	0 - 1	0 - 3	100	100
Valor calorífico neto [Kw-h/m <sup>3</sup> ]	9,9	3	-	6,3	6	6,8
Inflamabilidad en aire [%"en aire]	5--15	-	4--80	4--45	6--12	7,7-2,3
Temperatura de ignición [°C]	650 - 750	-	585	-	650-750	650-750
Presión crítica [KPa]	4700	7500	1300	8900	7500-8900	7500-8900
Temperatura crítica [°C]	-82,5	31	-240	100	-82,5	-82,5
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2	1,15
Gravedad específica	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83	0,91
Capacidad calorífica, Cp [kJ/m <sup>3</sup> °C]						
Velocidad de la llama [m/s]	0,43	-	0,47	-	0,36	0,38

Fuente: Manual para la producción de biogás del IIR, pagina 37-38.

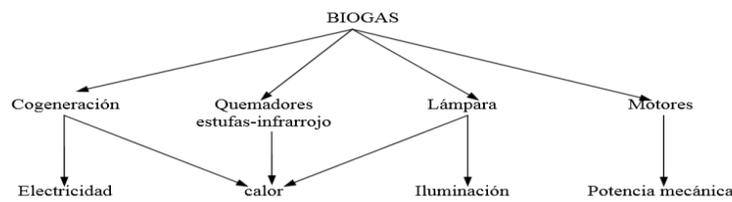
<sup>2</sup> Ibid.

**Tabla 2. Parámetros termodinámicos del CH<sub>4</sub> en condiciones normales.**

PROPIEDAD	VALORES
Masa molar M	16,04 [kg/kmol]
Densidad	0,72 [kg/m <sup>3</sup> ]
Capacidad Calorífica cp	2,165 [kJ/kg.K]
Valor calorífico Hu	50 [MJ/kg]
Viscosidad	0,012 centipois
Límite de inflamabilidad en aire	5,3-14 %volumen
Relación Cp/Cv	1,307

Fuente: Fuente: Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999

**Figura 1. Usos del biogás**



Fuente: Manual para la producción de biogás del IIR, pagina 38-39.

## 2.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA<sup>3</sup>

La fermentación es uno de los mecanismos de degradación de biomasa más frecuentes en la Naturaleza, por el que las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea por medio de microorganismos. Cuando la fermentación transcurre en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno (medio anaerobio) y se prolonga el tiempo necesario, da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como **biogás** y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (*lodo* o *fango*), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, el fósforo y los elementos minerales

<sup>3</sup> Digestión anaerobia. Disponible en: [http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04\\_42.htm](http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm)

inicialmente presentes en la biomasa. Este proceso es el que actualmente se suele denominar **digestión anaerobia**.

Después de más de setenta años de investigación y desarrollo, el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de la biomasa aún no se conoce en profundidad. Ello obliga a estudiar en conjunto cada equipo - materia prima individualmente, con objeto de realizar el mejor diseño posible en cada caso y así poder obtener los máximos rendimientos energético y económico. Cabe esperar que los nuevos conocimientos adquiridos en la microbiología y bioquímica de la digestión lleven a mejorar este proceso.

### **Las materias primas**

Puede servir como materia prima para la digestión anaerobia todo tipo de biomasa, especialmente la de alto contenido en humedad. Sin embargo, la viabilidad del tratamiento de cada tipo de materia orgánica depende de una serie de factores relacionados con su composición, principalmente el contenido en sólidos volátiles de la biomasa (que son los potencialmente transformables en biogás) y su contenido en nutrientes, dado que se trata de un proceso microbiológico.

Quizá la digestión anaerobia tenga a corto plazo muchas más aplicaciones en el campo de los residuos. Los resultados obtenidos hasta ahora con **residuos agrícolas** indican que la producción de metano es baja si no se realiza un pretratamiento debido, en muchos casos, al alto contenido en lignina de los residuos utilizados (paja, tallos, etc.). Todo indica que utilizando sustratos de menos contenido en lignina, el rendimiento aumenta considerablemente, pero estos estudios aún no están lo suficientemente desarrollados.

Los **residuos ganaderos** son particularmente interesantes como materias primas para la digestión anaerobia, ya que los rendimientos en metano son relativamente altos, debido al elevado contenido en nutrientes del sustrato. Además, el residuo digerido conserva el valor fertilizante original y está en mejores condiciones de ser almacenado y aplicado al terreno.

La digestión anaerobia se ha utilizado a menudo como tratamiento de **residuos industriales** de alta carga orgánica, fundamentalmente dentro del campo agroalimentario. Sin embargo, el planteamiento generalmente se limita a evitar contaminaciones, teniendo la obtención de energía un valor marginal no siempre suficientemente valorado.

Los **residuos urbanos**, tanto la fracción orgánica de los residuos sólidos como los lodos procedentes de la depuración del agua residual, son materias primas posibles para la digestión anaerobia.

## 2.5 QUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO

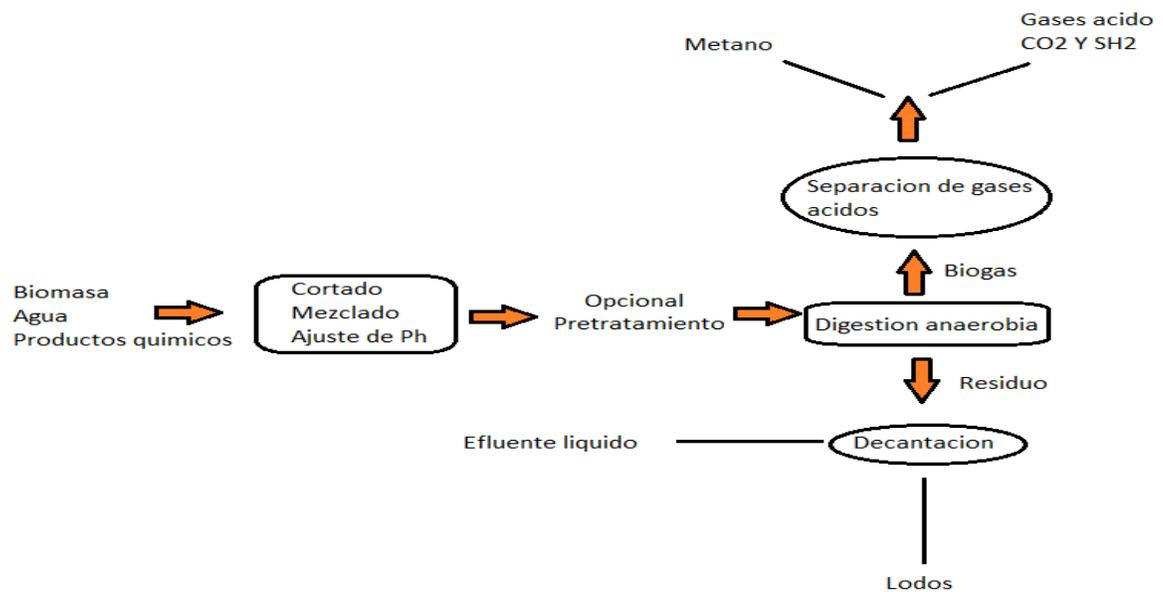
Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Esto es debido a que, por una parte, bajo el punto de vista químico, se desarrollan cientos de posibles reacciones, cada una de ellas catalizada por enzimas específicas para dar compuestos intermedios distintos. Por otro lado, en el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las relaciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas (polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina) se descompone en moléculas más pequeñas, proceso que se puede considerar que ocurre en tres etapas más o menos diferenciadas, para dar como productos finales metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Cada una de las

etapas es un conjunto de reacciones llevadas a cabo por la compleja población de microorganismos presentes en el digestor, cada una de las cuales cataliza sólo un cierto número de estas reacciones. La mayoría de los microorganismos oxidan determinados compuestos orgánicos para obtener energía para su crecimiento y utilizan compuestos carbonados específicos para sintetizar sus componentes celulares. Los productos finales de un grupo de microorganismos suelen ser el alimento del grupo siguiente, de forma que a lo largo del proceso existe un delicado balance que es necesario mantener para que la digestión se desarrolle correctamente.

Las tres etapas por las cuales transcurre la digestión anaerobia se muestran en el siguiente esquema:

**Figura 2. Etapas digestión anaerobia.**



Fuente: [http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04\\_07.htm](http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04_07.htm)

La **hidrólisis** o licuefacción es una primera etapa que consiste en la degradación de los polímeros orgánicos complejos constituyentes de la biomasa, dando lugar a moléculas más simples.

Durante la segunda etapa, **etapa acidogénica**, las bacterias producen varios compuestos simples, que son los productos finales de su metabolismo anaerobio. En la tercera etapa o **etapa metanogénica** los ácidos de bajo peso molecular producidos en las etapas anteriores son degradados a metano y dióxido de carbono por un grupo de bacterias altamente especializadas, denominadas metanogénicas.

## **2.6 VARIABLES QUE AFECTAN AL PROCESO DE DIGESTIÓN<sup>4</sup>**

Las condiciones óptimas y los rangos de oscilación de las variables que afectan a la digestión anaerobia han sido estudiadas por muchos investigadores que, desgraciadamente, no se ponen de acuerdo en todos los puntos. Una razón para ello puede ser que sus estudios se han desarrollado utilizando diferentes materias primas así como diversas metodologías y puntos de vista.

La naturaleza y composición del sustrato de partida dicta el régimen del proceso pero, así y todo, existe un grupo de variables que influye ostensiblemente sobre el sistema, por lo que es necesaria su medida y control, con objeto de intentar que se produzca la digestión en las mejores condiciones posibles. Estas variables son las siguientes:

- Temperatura.
- pH.
- Contenido en sólidos.
- Nutrientes.
- Tóxicos.

---

<sup>4</sup> Ibid

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en un amplio rango de **temperatura** (5 - 65 °C), dentro del cual aparecen dos zonas claramente definidas, correspondientes a dos grupos diferentes de bacterias: las bacterias mesofílicas, que se desarrollan entre los 5 y los 40 °C, y las bacterias termofílicas, que lo hacen en un rango de 40 a 65 °C.

En general, se opera en el rango mesofílico. Como sucede en la mayoría de los procesos biológicos, la velocidad de producción de metano se duplica aproximadamente cada 15 °C, encontrándose un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C. Esta temperatura combina las mejores condiciones de crecimiento de las bacterias con la mayor velocidad de producción de metano.

El mantenimiento de un **equilibrio ácido-base** (valor del pH) adecuado en el transcurso de una digestión, es uno de los principales problemas que tiene el proceso, debido a la acusada influencia que tiene la acidez del medio sobre la producción de gas, habiéndose encontrado que el rango óptimo de pH es de 6,6 a 7,6. El valor del pH no sólo determina la producción total de biogás sino, lo que es más importante, su composición en metano, ya que por debajo de un pH de 6,2, la acidez existente en el digestor inhibe fuertemente la actividad de las bacterias metanogénicas y por debajo de un pH de 4,5, la inhibición afecta también a las acidogénicas. Efectos similares se detectan a valores del pH por encima de 8,5.

El **contenido en sólidos** de la biomasa a digerir es un factor que influye de manera considerable en el proceso anaerobio. Si la alimentación está muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir. Por el contrario, una alimentación muy concentrada reduce la movilidad de las bacterias y, por tanto, la efectividad del proceso, al dificultar el acceso de aquéllas a su fuente de alimentación.

En líneas generales, el contenido en sólidos de la alimentación influye sobre el tamaño del digestor y el tiempo de duración del proceso, siendo también de importancia, aunque no bien establecida cuantitativamente, el tamaño (grado de desmenuzamiento) de los mismos.

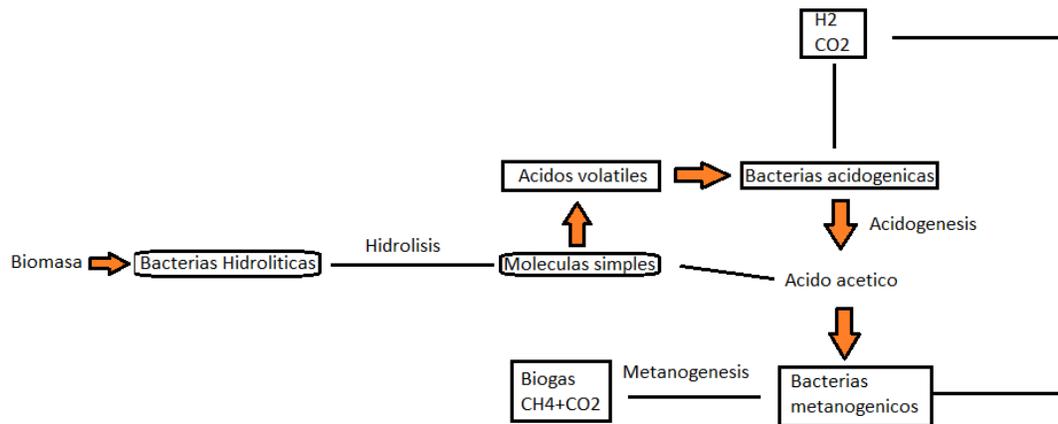
Una célula microbiana contiene una relación de **nutrientes** C:N:P:S de aproximadamente 100:10:1:1. Por ello, y para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, estos elementos han de estar presentes y disponibles en el medio y su ausencia o escasez pueden, de hecho, reducir la velocidad del proceso de digestión anaerobia.

En cuanto a los posibles **tóxicos**, dado que la digestión anaerobia tiene etapas llevadas a cabo por microorganismos estrictamente anaerobios, la primera sustancia tóxica a citar es el **oxígeno**. Concentraciones elevadas de **amoníaco**, producidas por un exceso de nitrógeno en la biomasa también inhiben la digestión. Aunque se ha citado la necesidad en el medio de **sales minerales**, excesos de sales pueden inhibir el proceso. También pueden ser tóxicas para los microorganismos diversas **sustancias orgánicas**. Se trata de algunos disolventes (alcoholes y ácidos de cadena larga en elevadas concentraciones), los pesticidas y los detergentes.

### **Los digestores**

Un digestor anaerobio es, básicamente, un recipiente diseñado para contener la biomasa a digerir y los microorganismos que llevan a cabo el proceso. Debe ser estanco, permitir la carga y descarga de materiales y poseer un dispositivo para recoger el gas producido. Los sistemas que permiten satisfacer todas estas necesidades van desde un bidón de petróleo usado, enterrado en el suelo, hasta sofisticados diseños con bombas, calentadores, aislamientos y equipos automáticos de carga y descarga. A continuación se muestra un esquema general de un proceso de digestión.

**Figura 3 Proceso digestión**



Fuente: Digestión anaerobia. Disponible en: [http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04\\_07.htm](http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04_07.htm)

Los factores principales a tener en cuenta en todo diseño de un digestor anaerobio son los siguientes:

- Respecto al tipo de materia a digerir:
  - Cantidad.
  - Contenido en sólidos.
  - Digestibilidad.
- Respecto al sistema de digestión:
  - Frecuencia de alimentación.
  - Sistemas auxiliares.
  - Medida y control.

**Factores que influyen en la digestión anaerobia.** El proceso de conversión anaerobia depende de diversos factores que afectan no sólo la calidad y cantidad del biogás generado, sino también en la velocidad de generación o en el rendimiento de los sistemas de recuperación del biogás.

Estos factores son principalmente:

- **pH** Las bacterias formadoras de ácidos (acetogénicas) pueden tolerar una velocidad baja de pH, pero las bacterias formadoras de metano son completamente destruidas con un pH inferior a 5,5, la producción de metano es lenta en un pH por debajo de 6,8 o por encima de 8,5. El rango óptimo es de 6,6 a 7,8.
- **Temperatura.** La temperatura influye en la actividad de las bacterias implicadas en el proceso, siendo un rango de temperatura óptima entre 20 y 45°C para bacterias mesófilas y entre 45 y 75°C para las termófilas. La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica. El contenido de metano depende de la temperatura de fermentación, con bajas temperaturas de fermentación se obtiene un alto porcentaje de gas metano pero las cantidades de gas son menores.
- **Nutrientes.** Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el período de producción de biogás es más prolongado.
- **Relación carbono-nitrógeno (C/N).** La máxima producción de gas se asegura con un rápido crecimiento de la producción bacteriana, para ello, la presencia de una buena relación carbono-nitrógeno (C/N) en el material de fermentación, es un índice significativo en lo que se refiere a la digestibilidad y al rendimiento potencial en un determinado material

orgánico. Tanto las bacterias formadoras de ácido y las de metano usan alrededor de 30 carbonos para la respiración y mantenimiento del cuerpo por cada átomo de nitrógeno. El valor óptimo de C/N está comprendido entre 25 y 30, el mínimo puede establecerse en 16<sup>5</sup>

Entre otros factores que influyen en la producción se encuentran la presión, un incremento de la presión puede aumentar la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) disuelto en la suspensión afectando el pH debido a la producción de ácido carbónico; la formación de natas y acumulación de materia, los cuales producen una alta concentración de ácidos inhibiendo la segunda etapa de la digestión anaerobia, para remover estas, es necesario agitar ya que destruye la espuma, permitiendo el paso regular del biogás.

---

<sup>5</sup> WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p.18

### **3. IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DE LAS EMISIONES DE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS.**

Entre los principales gases de efecto de invernadero están el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>), principales componentes del biogás; estos gases tienen diferentes contribuciones al efecto de invernadero dependiendo de sus características de absorción de la radiación infrarroja, de su concentración y de su vida media en la atmósfera y de sus interacciones con otros gases y vapor de agua.

En la ciudad de Kyoto Japón en 1997, fue firmado el protocolo de Kyoto; tratado para hacer frente al cambio climático en el mundo. En este se estipula la reducción de un 5,2 % de gases de efecto de invernadero por parte de los países desarrollados en el periodo 2008-2012 respecto de la base de conteo de 1990.

Para que entre en vigor, tiene que ser ratificado por 55 países que emiten un total de 55% de emisiones de dióxido de carbono, compuesto responsable del calentamiento del planeta.

Los sistemas de biogás ofrecen grandes beneficios a la sociedad, medio ambiente y la economía de quien los utiliza: producción de energía (calor, luz, electricidad), con esto se logra el mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de patógenos, huevos de gusanos, moscas así como ventajas ambientales a través de la protección del suelo, agua, aire y vegetación leñosa.

Se ha calculado que 1 m<sup>3</sup> de biogás utilizado evita la deforestación de 0,335 hectáreas de bosques con un promedio de 10 años de vida de los árboles<sup>6</sup>, así como los beneficios microeconómicos a través de sustitución de energía, del

---

<sup>6</sup> Biodigestores. Disponible en: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Biodigestores.pdf>

aumento de los ingresos y del aumento en la producción agrícola –ganadera; beneficios macroeconómicos a través de la generación descentralizado de energía, reducción en los costos de importación y protección ambiental.

#### **4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE ANIMAL.**

Como se señaló anteriormente, el biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica. Los residuos de los procesos agroindustriales pueden usarse como sustrato para las plantas de biogás consistentes principalmente de: estiércol, orina y residuo de alimento.

Hoy en día, en este sector existen muchas plantas simples de biogás tipo balón alimentadas con estiércol (estiércol y orina); originando producciones de biogás con altos porcentajes de metano.

El estiércol de rumiantes, particularmente el de ganado, es muy útil para empezar el proceso de fermentación, porque este posee las bacterias metanogénicas necesarias. Por otro lado, la producción de gas del estiércol de ganado es más bajo que el obtenido de pollos o cerdos, ya que el ganado produce un alto porcentaje de nutrientes de forraje y los complejos de lignina sobrantes del forraje de alta fibra son muy resistentes a la fermentación anaerobio. La orina, con su volumen orgánico bajo, contribuye poco a la producción de gas pero substancialmente mejora el efecto fertilizante de los lodos digeridos y contribuye a la dilución del sustrato.

La proporción C/N (carbono/nitrógeno) de las excretas de animal es normalmente favorable para los propósitos de fermentación anaerobio (9 - 22).

Mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno, por ejemplo, estiércol de cerdo; con materiales de fermentación con alto contenido de carbono, por ejemplo, tamo de arroz (C/N=70), generan una producción de

gas elevada<sup>7</sup>.

**Tabla 3. Características de digestión anaerobia en residuos de animal**

		Tiempo de Retención Recomendada (días)	Producción de Gas Comparada al estiércol de ganado
Ninguna	Muy estable	60-80	100%
Fuerte o ligero	Acidificación en el inicio	40-60	200%
Fuerte	Acidificación en el inicio	80	200%

Fuente: Fuente: WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p.18

**Tabla 4 Porcentaje de metano obtenido por digestión anaerobia a partir de residuos de animal.**

Estiércol de ganado	65%
Estiércol de cerdo	67%
Estiércol de gallina	60%

Fuente: SASSE, L. La planta de biogás. GATE-GTZ, 1984, p.56.

**Tabla 5 Producción de biogás a partir de estiércol de varios animales.**

Ganado	10	0,06
Cerdo	2,25	0,078
Gallina	0,18	0,062

Fuente: Disponible en: [www.geocities.com/institutoingefor/cursos/curso01/biogas.html](http://www.geocities.com/institutoingefor/cursos/curso01/biogas.html)

## 4.1 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS<sup>8</sup>

**4.1.1 Sistema de depuración de CO<sub>2</sub>.** La composición del biogás depende fuertemente del alimento, pero principalmente consiste en metano y dióxido de carbono, con cantidades menores (ppm) de ácido sulfhídrico y amoníaco. El dióxido de Carbono es el segundo componente del biogás, este es un gas incoloro, e inerte en la combustión, no tóxico y de olor ligeramente picante.

<sup>7</sup> WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p.18

<sup>8</sup> Ibid. p.33

Aunque se considera que no es venenoso, las áreas en las cuales se almacena o usan deben estar ventilados, pues exposiciones prolongadas a concentraciones tan bajas como 3,5% en volumen, pueden afectar adversamente el proceso de respiración en los seres humanos.

La eliminación del CO<sub>2</sub> de cualquier corriente de gas ha sido estudio de muchos investigadores, diferentes métodos han sido usados: absorción por contacto de diferentes soluciones (aminas, agua), columnas empacadas, tamices moleculares (zeolita), cultivos de microalgas, entre otros.

**4.1.2 Sistemas de purificación del ácido sulfhídrico.** La dificultad de utilizar el biogás como combustible, es su contenido de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), gas que por su alto poder corrosivo deteriora las instalaciones, por tanto es necesario removerlo antes de darle uso al biogás. Sus reacciones químicas y su producto de combustión, el anhídrido sulfuroso y el óxido de azufre, producen graves daños por corrosión y desgaste en los motores.

Hoy en día se conocen procesos para la eliminación de este ácido en gas natural, a grandes volúmenes y en instalaciones de gran escala, que pueden afrontar costos elevados, prácticamente, son poco los proceso aplicables a plantas de pequeña o mediana escala, como las instalaciones depuradoras de aguas residuales, y tratamientos de materia orgánica donde se produce el biogás en los digestores anaerobios.

## **4.2 CONSECUENCIAS DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO SOBRE LAS PIEZAS DE LOS EQUIPOS**

El Biogás puede usarse en todas las aplicaciones diseñadas para gas natural, asumiendo purificación suficiente. A continuación se relacionan algunos requisitos en términos de cantidad de H<sub>2</sub>S, permitidos para la utilización de

biogás como combustible.

**Tabla 6 Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso <sup>91011</sup>.**

Tecnología	Requisitos recomendados para el uso del biogás
Calentamiento de cardera	H <sub>2</sub> S < 1000 ppm, 0,8-2,5 kPa de presión, remoción de condensado (estufas de cocinas H <sub>2</sub> S < 10 ppm)
Motores de combustión interna	H <sub>2</sub> S < 100 ppm, 0,8-2,5 kPa de presión, (Los motores ciclo Otto son más susceptible a H <sub>2</sub> S que los motores diesel)
Micro turbinas	Toleran hasta 70,000 ppm H <sub>2</sub> S > 350 BTU/scf, 520 kPa de presión, remoción de condensados y siloxanos
Modificaciones de aparatos de gas natural	H <sub>2</sub> S < 4 ppm, CH <sub>4</sub> > 95%, CO <sub>2</sub> < 2% volumen, H <sub>2</sub> O < (1*10 <sup>-4</sup> ) kg/MMscf, remover siloxanos y partículas, presiones > 3000 kPa

Algunos efectos del ácido sulfhídrico sobre la producción de biogás, y sobre su utilización como combustible se citan a continuación:

Impedimento de la descomposición: el H<sub>2</sub>S disuelto puede en altas concentraciones tener un efecto tóxico sobre las bacterias existentes en el material. Como consecuencia se inhibe la formación del biogás y cambia la composición del gas.

Corrosión por H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>: el H<sub>2</sub>S tiene una acción corrosiva sobre las partes metálicas, el H<sub>2</sub>S ataca superficialmente el hierro. Los materiales galvanizados, metales no ferrosos, aparatos con componentes de metales no ferrosos, tales como reguladores de presión, medidores de gas, válvulas y grifería, también

<sup>9</sup> WELLINGER, A y LINBERG, A. Biogas upgrading utilization. International Energy Association, Paris, France; 2000, p.20.

<sup>10</sup> Capstone turbine corp. (2002). [www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf](http://www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf)

<sup>11</sup> KOHL, A y NEILSEN, R. Gas purification. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1997, p.1395.

son atacados. Los gases de escapes de los quemadores a gas, lámparas a gas y motores producen  $\text{SO}_2$ , el cual en presencia con el vapor de agua, causa daños graves por corrosión.

La desulfuración del biogás es imprescindible cuando se utiliza como combustible; en motores de combustión interna, el motor sufre daños, al formarse ácidos en la cámara de combustión, en el sistema de escape y en los diferentes cojinetes. Estos efectos negativos previenen de frecuentes encendidos del motor, periodos breves de funcionamiento y temperaturas relativamente bajas durante la fase de arranque y después de parar el motor, como así mismo a causa del enfriamiento por agua.

El tiempo de servicio de los motores que utilizan biogás como combustible, puede ser reducido hasta la primera revisión general cerca de un 10 a un 16 % del tiempo de servicio normal.

Los intervalos entre el cambio de aceite se acortan regularmente, reduciéndose de 250 a 200 horas de servicio. El  $\text{SO}_2$  de los gases de escape forma una solución con el vapor de agua en el aceite lubricante, volviéndolo ácido y modificando por tanto sus propiedades.

#### **4.3 PROCESOS DE ELIMINACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO PRESENTE EN EL BIOGÁS.**

Puesto que el biogás es similar en composición al gas natural crudo, las técnicas de purificación desarrolladas y usadas en la industria del gas natural pueden evaluarse para su conveniencia en los sistemas de biogás. El proceso escogido depende del uso del gas, composición, características físicas, energía y recursos disponibles, subproductos generados, y el volumen de gas a ser tratado.

Los procesos de purificación de gas generalmente entran en una de estas siguientes cinco categorías:

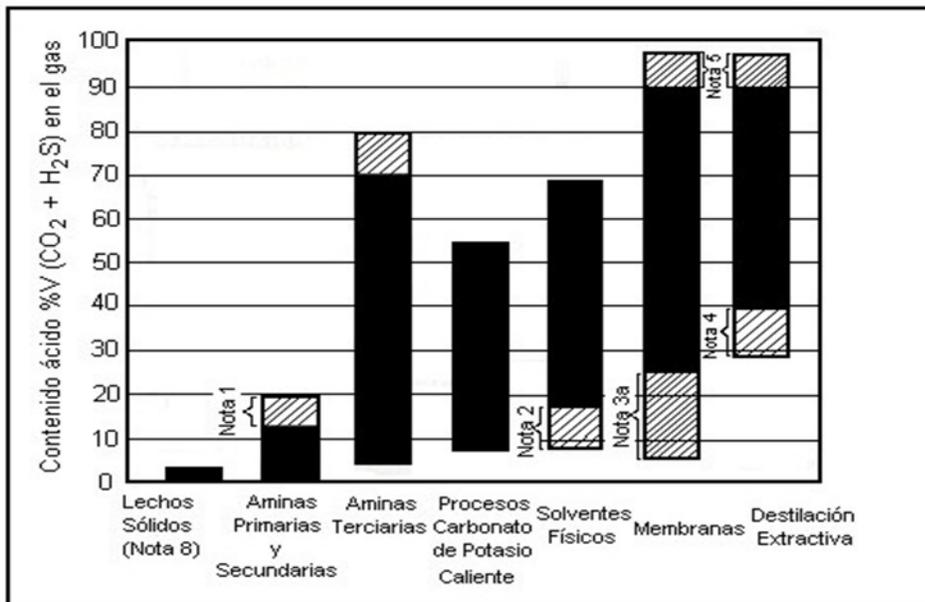
- 1) Absorción en un líquido
- 2) adsorción en un sólido
- 3) infiltración a través de una membrana
- 4) conversión química en otro compuesto
- 5) Condensación (Kohl y Neilsen 1997).

Es recomendable para su eliminación, un proceso de absorción en seco, el cual utiliza masas ferrosas para su remoción, cuando se trata de sistemas de baja concentración.

**Notas:**

1. Aminas primarias y secundarias, puede ser económico para flujos de gas con un contenido de gas ácido mayor al 20% ( $H_2S + CO_2$ ).
2. Solventes físicos, puede ser económico por debajo del 5-10% gas ácido (presión parcial 50 psi)
3. Las membranas pueden ser económicas por debajo del 8-12% de gas ácido o aún pueden bajar fuertemente dependiendo de los costos de poder (para la compresión) y capacidad de planta.
4. Todavía no existe límite económico para Destilación Extractiva.
5. La recuperación de  $CO_2$  es económico cerca al 90% del  $CO_2$  en el alimento.
6. Aminas terciario: MDEA (TEA y DMEA).
7. Los lechos sólidos (óxido férrico, óxido de cinc, Sulfatreat, etc.), normalmente son económicos para concentración menores al 1% gas ácido.

Figura 4 Opciones de Tratamiento para el Gas Natural<sup>12</sup>



#### 4.4 SISTEMA DE REMOCIÓN DE AGUA.

El vapor de agua puede removerse del Biogás de tres maneras: presurizándolo, enfriándolo o utilizando una sustancia o un químico higroscópico. El uso de adsorbentes sólidos es una práctica común, para lo cual se requiere que el gas húmedo saturado se ponga en contacto con una sustancia sólida que tiene gran afinidad por el agua, como la sílica gel, la alúmina y los tamices moleculares. Eventualmente cada uno de estos materiales alcanza su capacidad de adsorción y tiene que ser regenerado.

<sup>12</sup> KOHL, A and NEILSEN, R. Gas Purification. Golf Publishing company. Houston. Texas, 1997.

## **5. GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN MOTORES DIESEL UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA<sup>13</sup>**

El biogás puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna Diesel y a gasolina, a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica por medio de un generador, debido a su alto poder calorífico el cual depende del porcentaje de metano presente en el Biogás. En el caso de los motores diesel, el biogás puede reemplazar hasta el 80% del Acpm (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). Aunque en los motores a gasolina el biogás puede reemplazar la totalidad de la misma, en general en los proyectos a nivel agropecuario se le ha dado preferencia a los motores diesel considerando que se trata de un motor más resistente y que se encuentra con mayor frecuencia en el medio rural.

### **5.1 ADECUACIÓN DEL MOTOR DIESEL A UN SISTEMA DE COMBUSTIBLE DUAL**

En los motores diesel el combustible es mezclado con el aire hacia el final del tiempo de compresión del motor, este es rociado en la cámara de combustión con una presión alta. El combustible se enciende inmediatamente cuando entra en contacto con el aire caliente comprimido.

En el funcionamiento del motor en el sistema combustible dual, el dispositivo de inyección del combustible proporciona una cierta cantidad de combustible diesel. El motor succiona y comprime una mezcla de aire y gas que ha sido preparada en un dispositivo mezclador externo. La mezcla se enciende junto con el combustible diesel rociado. Todos los otros parámetros

---

<sup>13</sup> Utilización del Biogás para generación de electricidad. Disponible en: [www.cipav.gov.co](http://www.cipav.gov.co)

y elementos del motor diesel como la relación de compresión punto o ángulo del cigüeñal de inyección, permanecen inalterados.

La cantidad de combustible diesel necesaria para la ignición está entre 10% y 20% de la cantidad necesaria en el funcionamiento con combustible diesel solamente. Esto dependerá del funcionamiento y parámetros de diseño del motor.

La modificación de un motor diesel para un proceso de combustible dual tiene las siguientes ventajas:

- Cualquier contribución de biogás 0 hasta 85% puede sustituir una parte correspondiente de combustible diesel.
- Debido a la existencia de un gobernador, el mando automático de velocidad y potencia del motor diesel puede hacerse cambiando la cantidad de inyección de combustible de diesel mientras el flujo de combustible gas permanece constante; las substituciones de combustible diesel por biogás son sin embargo menos sustanciales en este caso.
- Con respecto a otros aparatos, el uso de esta máquina para este propósito es conveniente ya que presenta varias ventajas tales como alta eficiencia térmica, vida útil mayor, sencillo manejo, extensa adquisición especialmente en áreas rurales, bajo costo de adaptación y una gran versatilidad (la planta eléctrica puede pasar en unos pocos minutos del funcionamiento dual a funcionamiento normal con Acpm).

### **Limitaciones.**

- El motor de combustible dual no puede operar sin el suministro de combustible diesel para la ignición.
- El combustible inyectado puede calentarse cuando el flujo de combustible diesel se reduce en un rango de 10 a 15% de su flujo normal. Los

motores de combustible duales más grandes circulan el combustible diesel extra a través del inyector para refrigerar.

- Los motores diesel modificados operan a menudo con proporciones de combustible diesel más altas que las necesarias para la ignición esto con el fin de facilitar suficiente enfriamiento del inyector<sup>14</sup>.
- En el funcionamiento con biogás limpio, es decir 95 - 98% de CH<sub>4</sub>, las temperaturas de combustión son más altas que las alcanzadas cuando el biogás no es tratado, por lo tanto la sustitución de combustible diesel está aproximadamente limitada a un 60% como máximo; es decir, una cantidad de 40% combustible del diesel es necesaria para la ignición y para refrescar la boquilla del inyector. Se recomienda el chequeo de la boquilla del inyector después de 500 horas de funcionamiento del motor con combustible dual<sup>15</sup>.

## **5.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL CON COMBUSTIBLE DUAL.**

Los motores diesel a gas han sido utilizados para una variedad de propósitos usando gases como gas natural, biogás, gas de vertederos junto con el monóxido de carbono.

El funcionamiento de motores diesel en el modo combustible dual, es decir usando dos combustibles, tiende a ser casi igual al funcionamiento usando combustible diesel exclusivamente; esto se cumplirá siempre y cuando el valor calorífico del gas no sea demasiado bajo, es decir su porcentaje en volumen de metano no sea menor del 50%. Como resultado de esta reducción en el combustible y el aire, la potencia máxima de salida a una velocidad alta en el modo de combustible dual puede ser menor que en la operación con

---

<sup>14</sup> Tomás, J.; León, R. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/224381771/Curso-Diccionario-Automovil-Mantenimiento-Reparacion>

<sup>15</sup> WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p. 33

combustible diesel.

Esta disminución es sin embargo menos significativa que en motores de gasolina modificados.

Para una operación a velocidades bajas o medias, sin embargo, la entrada de aire debe succionar una cantidad mayor de mezcla aire/combustible, haciendo que la potencia de salida no se reduzca significativamente con respecto a la operación con acpm. Más aún, en algunos casos puede obtenerse la misma potencia si la dimensión de la entrada permite obtener mayor mezcla aire/combustible que la requerida para la potencia original. El funcionamiento a una potencia de salida mayor que la diseñada originalmente puede ser sin embargo dañino al motor y debe evitarse en cualquier caso.

Para predecir la potencia de salida de un motor diesel convertido en un motor diesel-gas, debe observarse lo siguiente:

**Velocidad de operación:** Puede asumirse que el motor funcionará en el modo combustible dual a una velocidad menor que la velocidad máxima especificada por el motor, aproximadamente el 80% de la velocidad de diseño. La sustitución de aproximadamente el 80% de combustible del diesel por el biogás es posible sin afectar la potencia de salida.

**Sustitución de combustible diesel:** la relación de sustitución puede estar por debajo al máximo posible, es decir menor al 80% (debido a la baja disponibilidad de biogás o para anticipar problemas de calentamiento del inyector); la disminución en el funcionamiento es insignificante.

**Potencia operacional:** para motores que operan en servicio continuo, la potencia operacional normal debe estar aproximadamente entre el 80 - 90% de la potencia máxima.

**Temperatura de los gases de escape:** La temperatura de estos gases es más alta en el modo combustible dual que en el modo combustible diesel debido a que la velocidad de combustión es más baja es decir, el proceso de combustión no puede completarse cuando el tiempo de descarga empieza. Esto es más relevante a velocidades altas del motor y relaciones de sustitución por biogás mayores. Para prevenir que las válvulas de la descarga no se recalienten, la temperatura medida en la cabeza de salida del cilindro no debe exceder 550 °C. La reducción de temperatura se logra por una reducción de velocidad y/o relación de biogás.

### **5.3 DISPOSITIVOS MEZCLADORES PARA COMBUSTIBLE DUAL.**

Para el funcionamiento del motor diesel modificado a un sistema de combustible dual, es necesario un dispositivo mezclador de aire/biogás, el cual debe reunir los siguientes requisitos:

- Que proporcione una mezcla homogénea de aire y biogás.
- Que permita variar el flujo de biogás según el rendimiento requerido.
- Que sea capaz de proporcionar suficiente aire y biogás para operar a carga y velocidad máxima bajo condiciones reales de presión del gas y aire, manteniendo una relación de aire en exceso mayor de  $\lambda = 1,5$ , porque se necesita suficiente aire en exceso para la combustión del combustible.
- Si es requerido se debe habilitar un control de operación automático a carga parcial por medio de un gobernador o mecanismos de control electrónico.

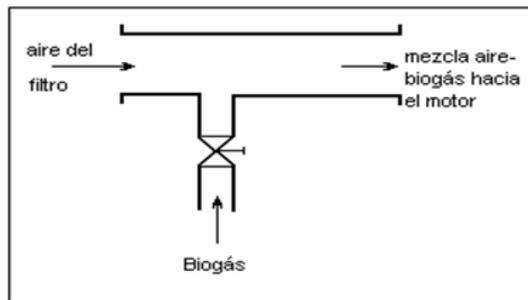
### **5.4 CÁMARAS DE MEZCLADO SIMPLE.**

Una cámara de mezclado simple consiste en un recipiente o un tubo en unión T con una entrada para el aire, otra para el gas y una salida para la mezcla de ambos (figura 5). La salida se conduce al conducto o colector del motor.

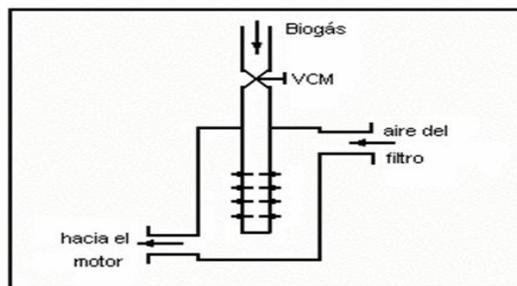
Para el control de la potencia del motor (carga parcial) el suministro de gas combustible se controla por una válvula. La válvula puede operarse manualmente o puede conectarse a un control automático.

El diámetro mínimo para la tubería de suministro de gas al motor debe ser aproximadamente 0,5 veces el diámetro de la entrada de aire a la succión<sup>16</sup>. El flujo de biogás debe ser controlado por una válvula a la entrada de la cámara de mezclado para evitar la sobreoferta de este.

**Figura 5. Mezclador en unión T**



**Figura 6. Cámara de mezclado simple con válvula de control manual**



WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p. 35

## 6. SITUACIÓN ACTUAL DEL PROBLEMA

La hacienda El Recreo para suplir la demanda de energía eléctrica se encuentra conectada a la red de eléctrica de la ESSA, sin embargo esta red presenta problemas técnicos los cuales traen como consecuencia continuos cortes o interrupciones del suministro de energía que a su vez afectan de manera directa el normal funcionamiento de la hacienda poniendo en riesgo los cultivo y dificultando el desarrollo porcicola. Es por esto que la hacienda cuenta con un sistema de respaldo que consta de generador DIESEL de KVA el cuan entra en funcionamiento en caso de falla de la red. La hacienda cuenta con la instalación eléctrica adecuada para el buen funcionamiento de la planta generadora.

La hacienda presenta su mayor consumo en 2 motobombas las cuales extraen el agua necesaria para el riego de los cultivos en desarrollo, además el consumo interno de la finca esta dimensionado en 10 KVA.

### **Características técnicas de las Motobombas**

Corriente (Trifásico) 220 / 380 V

- Tipo de Líquido Agua Limpia
- Origen: Italia
- Conexión (mm) 65 x 40
- Potencia 20 HP / 15 kW
- Altura Máxima (m.c.a.) 92
- Caudal Máximo (l/min) 900

### **NORMALIZADA REGGIO SN 40-250 A**



Estas dos motobombas tienen como finalidad el riego de los cultivos de la hacienda y cuenta con toda la instalación eléctrica adecuada para su buen funcionamiento.

#### **6.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GENERADOR**

Se utilizó una Planta Eléctrica Diesel de cuatro tiempos marca HFW IVECO serie HFW-60 T5 la cual tiene las siguientes especificaciones:

**Tabla 7. Especificaciones de la planta.**

Características	Valor
Potencia	60 KW
Tensión de salida	220/127 Voltios
Velocidad	1800 rpm
Fases	Trifásico



El consumo de combustible dado en sus especificaciones técnicas para diferente carga es:

**Tabla 8. Consumo planta**

Carga total KW	% Carga	Consumo ACPM en g/hora	Consumo ACPM g/KW-hora
60	100%	4,57	0,0762
	70%	3,42	0,081
	50%	2,28	0,076

## **6.2 CALCULO DE VOLÚMENES DE BIOGÁS, CANTIDAD DE MATERIA SECA Y UNIDADES PORCINAS REQUERIDAS PARA SATISFACER LA DEMANDA ENERGÉTICA**

Las relaciones para determinar las cantidades de Volumen de biogás, Materia Seca y Unidades porcinas se tomaron de los documentos creados en el “Convenio de concertación para una producción más limpia entre el sector porcícola y

ambiental del departamento de Antioquia” en los cuales participaron La Asociación Nacional de Porcicultores, CORNARE y CORANTIOQUIA y el Ministerio de Medio Ambiente en Diciembre 19 de 1996.<sup>17</sup>

- Producción de Materia Seca (MS)=0,75kg por cada 100kg de peso vivo(kpv)
- Tasa de Producción de biogás= Valores oscilan entre 0,69 y 1,02 (m3/kg de MS). Se toma el promedio= 0,86m3/kg de MS.

La relación entre el consumo de la Finca (50kw/h) y el requerimiento de biogás se tomó de las relaciones adoptadas en los documentos de **Werner Kossmann, Uta Pönitz “Biogas plants in animal husbandry”000<sup>18</sup>**

Los datos obtenidos son los siguientes.

**Tabla 9. Relación consumo.**

CONSUMO ENERGÉTICO DE LA FINCA	REQUERIMIENTO DE BIOGÁS (m3/h)	MATERIA SECA REQUERIDA (kgMS)	UNIDADES PORCINAS REQUERIDAS (UP=50Kg)
50KW	59,52	1661,02	4429

<sup>17</sup> Asociación Colombiana de Porcicultores - ACP. Corporación Autónoma Regional Rionegro – Nare. - CORNARE. Corporación Autónoma Regional Del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA. Ministerio del Medio Ambiente. Manejo de elementos de la producción porcina que pueden causar efecto ambiental. Disponible en: [www.corantioquia.gov.co/docs/ventanilla/CARTPORCI.pdf](http://www.corantioquia.gov.co/docs/ventanilla/CARTPORCI.pdf)

<sup>18</sup> Biogas plants in animal husbandry. Disponible en: [http://journeytoforever.org/biofuel\\_library/biogasanimals.pdf](http://journeytoforever.org/biofuel_library/biogasanimals.pdf), Biogas Digest. Volume I Biogas Basics.. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol1.pdf>, Biogas Digest. Volume II. Biogas - Application and Product Development. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol2.pdf>, Biogas Digest. Volume III. Biogas - Costs and Benefits. And Biogas – Programme Implementation Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol3.pdf>. Biogas Digest. Volume IV. Biogas – Country Reports. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol4.pdf>. Biogas Plants. by Ludwig Sasse. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g34bie.pdf>. Biogas plants in animal husbandry. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g32bie.pdf>. Engines for biogás. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g36ene.pdf>

## **7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

A partir del estudio técnico y teniendo en cuenta los requerimientos de la empresa en este proyecto se realizará la evaluación económica la cual permitirá decidir si se acepta o se rechaza el proyecto ya sea en función de la rentabilidad que ofrece o de los beneficios que representa para la población aledaña en este caso para el sector porcícola de la región de cimitarra Santander. El flujo de fondos realizado para los 2 tipos de biodigestores aplicados se encuentra en los respectivos anexos.

### **7.1 CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA.**

**Análisis económico.** Para realizar el análisis económico es necesario calcular el flujo de ingresos y egresos con el objeto de determinar el flujo financiero neto del proyecto durante un tiempo determinado. Esto permitirá determinar la rentabilidad de la utilización de biogás como combustible en planta diesel para generación de electricidad desde el punto de vista de la economía.

El flujo financiero neto del proyecto es el fundamento del análisis económico ya que reúne los resultados que se espera, arroje el proyecto en el transcurso del periodo en que se esté evaluando; en este caso, cinco años. Este flujo se determinara con y sin financiamiento esto para poder generar un estudio mucho más exacto y beneficioso para los inversionistas.

El flujo neto del proyecto es el resultado del flujo neto de inversión y el flujo neto de operación. Estos cálculos se realizaron para una proyección de cinco años en los cuales el año cero (0) corresponde al momento cero en el cual se realiza el desembolso para la adquisición de los activos fijos sin corresponder a un periodo de 365 días.

### **Flujo neto de inversión.**

La inversión inicial está constituida por el conjunto de aportes que se deben hacer para adquirir todos los bienes y servicios necesarios para la puesta en marcha del sistema de generación eléctrica a partir de biogás. Para el cálculo del monto total de la inversión requerida se tuvo en cuenta el valor comercial para el año 2014 de todos los activos fijos y depreciables requeridos para el desarrollo del proyecto.

### **Inversión Fija del Proyecto.**

El año cero (0) corresponde al periodo de implementación del proyecto y en él se efectúa la inversión inicial. A partir del año uno (1) se realizará la operación de producción y utilización de electricidad y no se efectuarán reinversiones en los próximos cinco años.

### **Flujo neto de operación.**

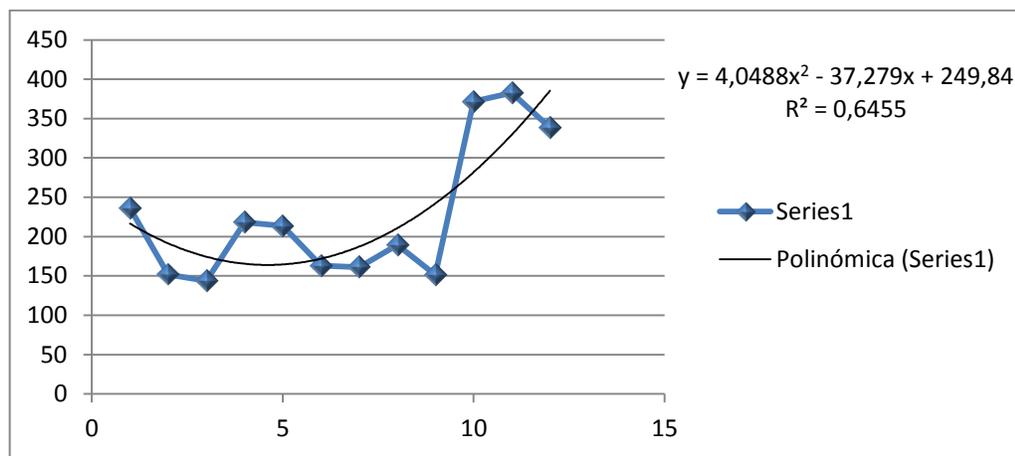
El flujo neto de operación se obtiene a partir de los ingresos y costos operacionales: costos de producción, gastos de venta y gastos de administración. En este caso los gastos de venta y administración son cero ya que este proyecto no necesita de una unidad administrativa y la energía producida no será comercializada sino utilizada directamente en la hacienda para satisfacer sus requerimientos de energía.

### Presupuesto de ingresos.

El cálculo de los ingresos se realizará partiendo de la capacidad de generación, en términos de kw-h del proyecto y el costo comercial del kw-h de la Empresa Electrifica de Santander (ESSA). El presupuesto de ingresos variará a partir de los datos de aumento de los últimos meses en el precio del kw-h suministrado por la ESSA. Este comportamiento obedece a la siguiente ecuación:

**Figura 7 Precio KW/H últimos 12 meses**

$$y=4,0488x^2-37,279x+249,84 \quad R^2 = 0,6455$$



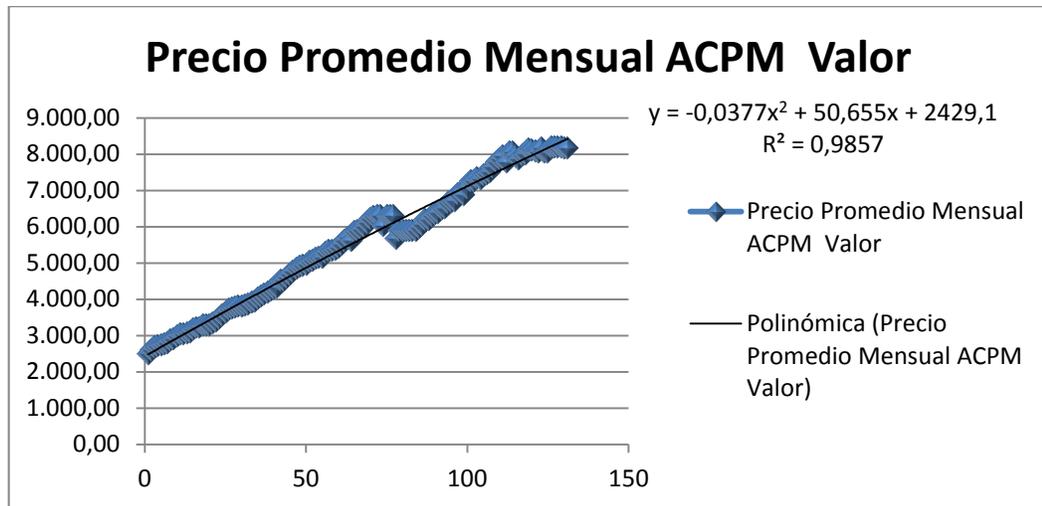
Fuente UPME.

**Costos de producción.** Estos costos están constituidos por los costos directos y los gastos generales de producción. Dentro de los costos directos tenemos en cuenta la mano de obra directa, los materiales directos y la depreciación de los equipos. La depreciación se calcula en base a la vida útil estimada para cada equipo y el método utilizado es el de línea recta.

Los costos de producción variarán durante los 10 años proyectados para la evaluación del proyecto, en función del comportamiento anual del acpm, el cual obedece a la ecuación 1.

**Figura 8 Precios históricos del precio del Acpm desde 2003 hasta 2013.**

$$y = -0,0377x^2 + 50,655x + 2429,1 \quad R^2 = 0,9857$$



Fuente UPME.

## 8. ANÁLISIS DE VARIABLES CASO BÁSICO

Para el análisis económico se realiza una proyección de los gastos energéticos durante los años de evaluación del proyecto teniendo en cuenta las condiciones actuales así como las condiciones que se presentarían si se realizara el proyecto.

**Tabla 10. Consumo energético sin proyecto**

Factor de planta	0,7								
	Año	0	1	2	3	4	5	6	7
	Energía eléctrica consumida KWh		50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	Energía eléctrica consumida KWh/año		306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00
	Porcentaje tomado de la red %		70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
	Precio de la Energía Eléctrica		300,00	309,00	318,27	327,82	337,65	347,78	358,22
	Consumo ACPM por g/KWh		0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914
	Precio ACPM por galon		8.200,00	8.446,00	8.699,38	8.960,36	9.229,17	9.506,05	9.791,23
	Valor Energía de la RED		64.386.000,00	66.317.580,00	68.307.107,40	70.356.320,62	72.467.010,24	74.641.020,55	76.880.251,16
	Valor Energía con ACPM		68.937.170,40	71.005.285,51	73.135.444,08	75.329.507,40	77.589.392,62	79.917.074,40	82.314.586,63
	Total consumido		133.323.170,40	137.322.865,51	141.442.551,48	145.685.828,02	150.056.402,86	154.558.094,95	159.194.837,80

**Tabla 11. Consumo energético con proyecto**

Porcentaje de Biogas	50								
Factor de planta	0,7								
	Año	0	1	2	3	4	5	6	7
	Energía eléctrica consumida KWh		50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	Energía eléctrica consumida KWh/año		306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00	306.600,00
	Porcentaje tomado de la red %		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Precio de la Energía Eléctrica		300,00	309,00	318,27	327,82	337,65	347,78	358,22
	Consumo ACPM por g/KWh		0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914	0,0914
	Precio ACPM por galon		8.200,00	8.446,00	8.699,38	8.960,36	9.229,17	9.506,05	9.791,23
	Valor Energía de la RED		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Valor Energía con ACPM		114.895.284,00	118.342.142,52	121.892.406,80	125.549.179,00	129.315.654,37	133.195.124,00	137.190.977,72
	Total consumido \$		114.895.284,00	118.342.142,52	121.892.406,80	125.549.179,00	129.315.654,37	133.195.124,00	137.190.977,72

Teniendo en cuenta lo anterior se observa que el valor de la energía eléctrica anual en las condiciones actuales presenta mayor gasto que el costo total de la energía aplicando el proyecto del biogás, es decir, anualmente se tendrá un ahorro como se muestra en la siguiente tabla.

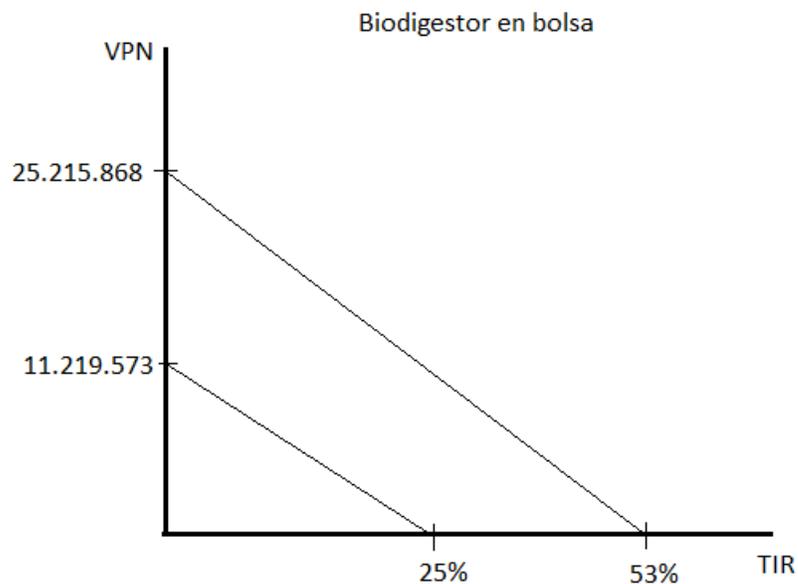
**Tabla 12. Ahorro anual generado por la implementación del proyecto con Biodigestor**

Valor de la energía SIN PROYECTO	133.323.170,40	137.322.865,51	141.442.551,48	145.685.828,02	150.056.402,86	154.558.094,95	159.194.837,80
Valor de la energía CON PROYECTO	114.895.284,00	118.342.142,52	121.892.406,80	125.549.179,00	129.315.654,37	133.195.124,00	137.190.977,72
Ahorro	18.427.886,40	18.980.722,99	19.550.144,68	20.136.649,02	20.740.748,49	21.362.970,95	22.003.860,08

Con los resultados obtenidos de la proyección de ahorro en el gasto de energía eléctrica se realiza el estudio económico del proyecto donde se determinara la viabilidad del proyecto.

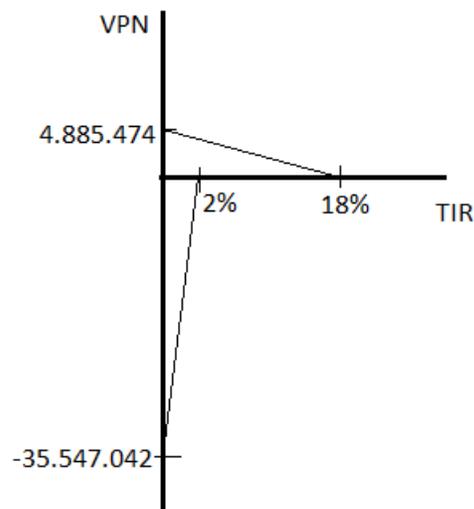
Analizando el respectivo flujo de caja del biodigestor con bolsa y del biodigestor con geomembrana podemos empezar a denotar la viabilidad de la implementación del biodigestor con bolsa.

**Figura 9. VPN VS TIR**



Como se puede apreciar en la figura 9 el biodigestor con bolsa y con financiación a tasa del 12% efectiva anual nos muestra valores de VPN de 25.215.868 a una TIR de 53%, mientras que el mismo proyecto sin la financiación nos muestra valores aun así muy buenos de TIR del 25% con valores de VPN DE 11.219.573.

**Figura 10. Biodigestor con geomembrana**

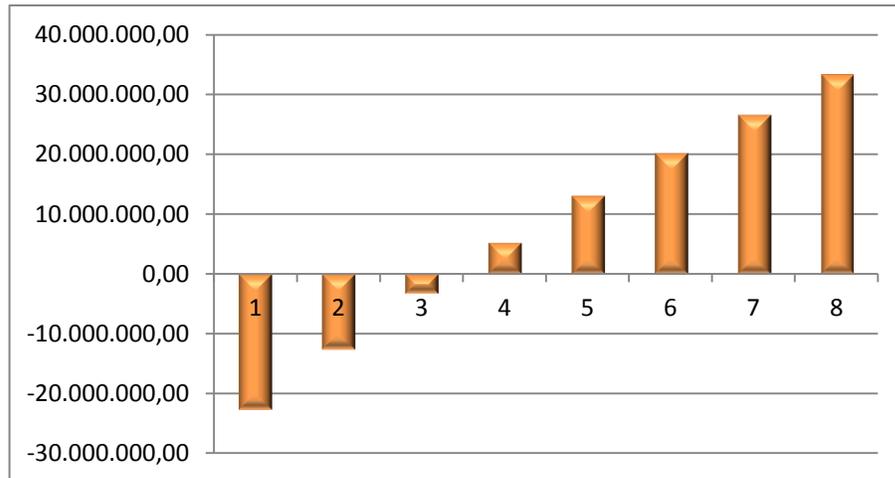


Para el caso del biodigestor con geomembrana ver figura 10, el análisis no es tan satisfactorio, ya que el proyecto con financiación a tasa de 12% efectiva anual nos muestra valores de TIR de 18% y VPN de 4.885.474, mientras que el mismo proyecto sin la financiación nos muestra valores poco alentadores de viabilidad ya que nos genera una TIR de 2% y valores de VPN de -35.547.042.

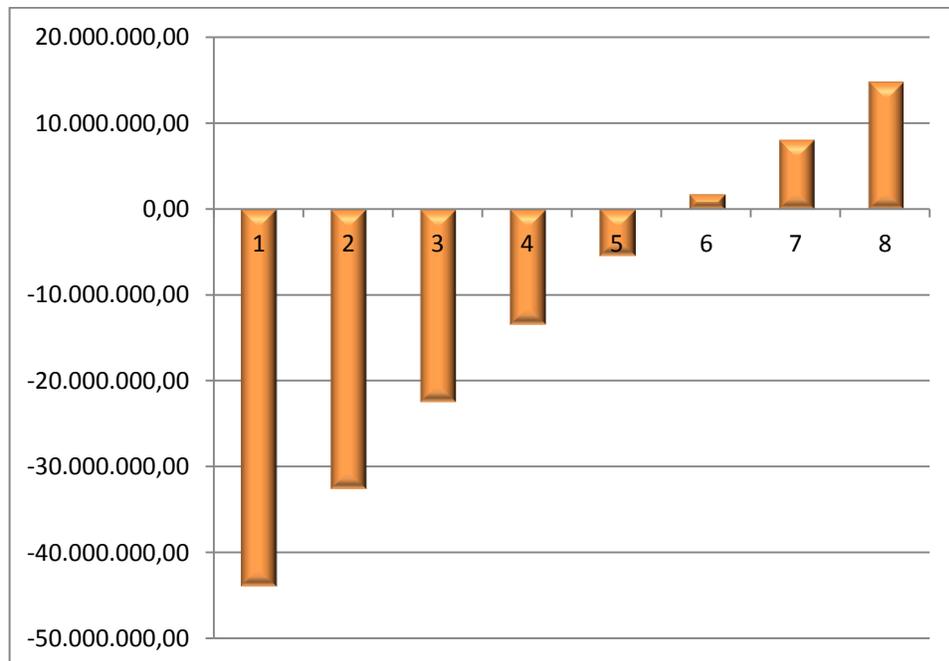
### **8.1 FLUJO NETO ACUMULADOS DE CAJA DEL PROYECTO**

A continuación se muestra el flujo de caja neto del proyecto con el biodigestor de bolsa con y sin préstamo.

**Figura 11. Flujo de caja neto acumulado con préstamo**



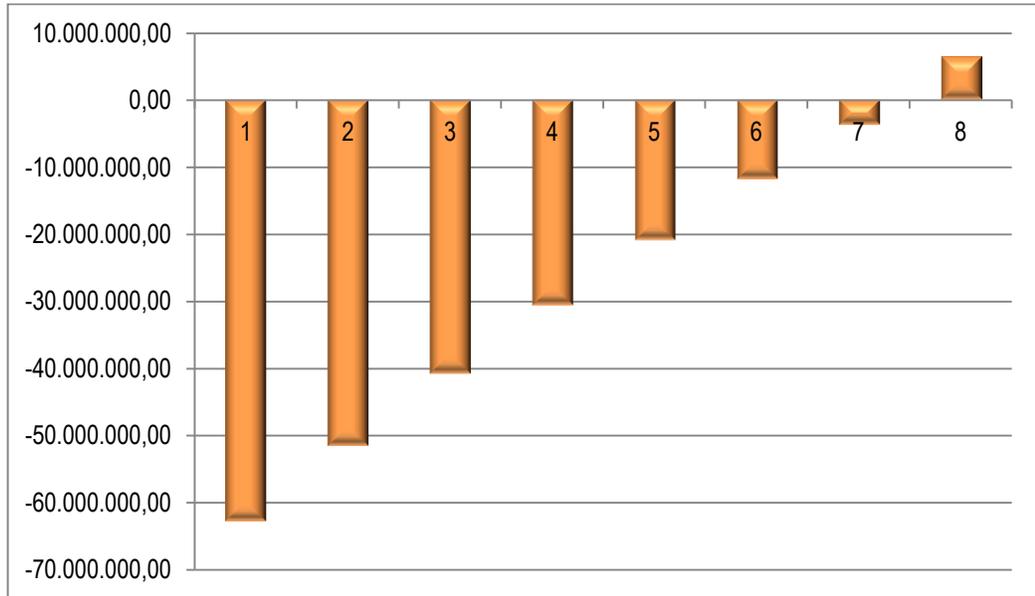
**Figura 12. Flujo de caja neto acumulado sin préstamo.**



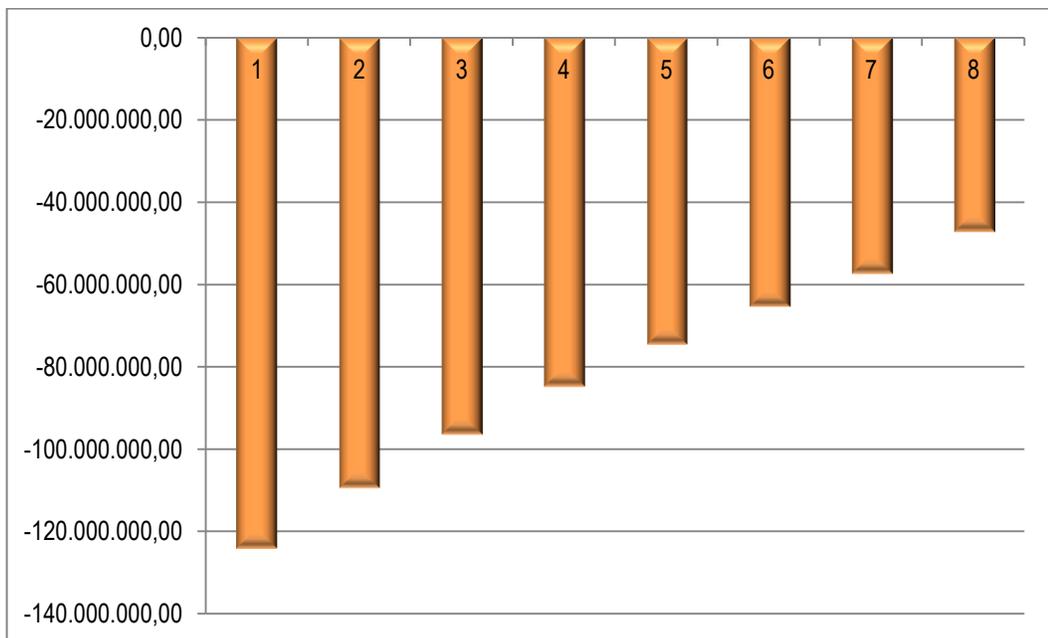
Como se puede apreciar el proyecto con financiación representa mayores beneficios económicos a los inversionistas a la tasa del 12 % efectivo anual.

Ahora se realiza el flujo de caja neto acumulado con la geomembrana.

**Figura 13 Flujo de caja neto acumulado sistema de geomembrana con préstamo.**



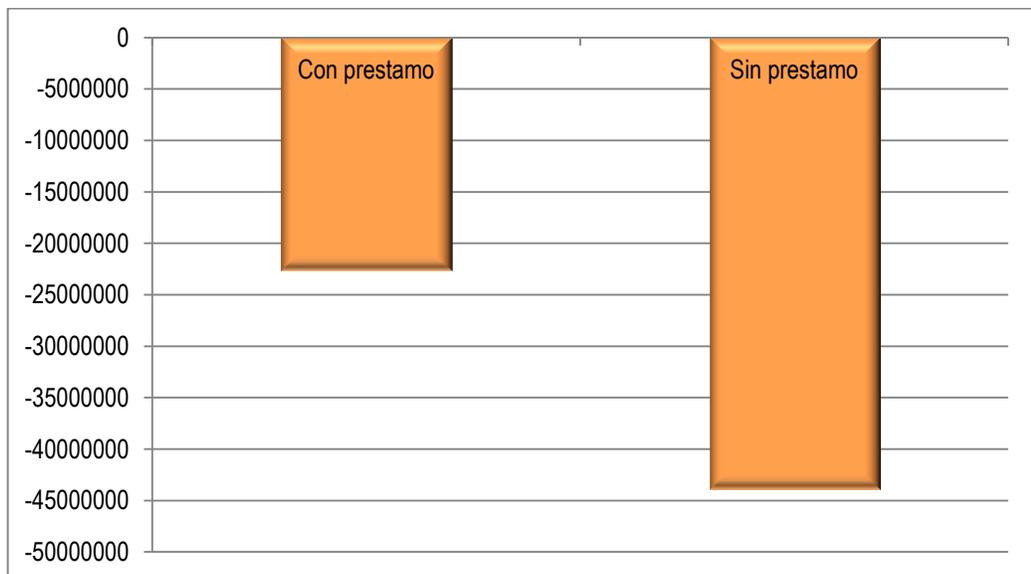
**Figura 14 Flujo de caja neto acumulado sistema de geomembrana sin préstamo.**



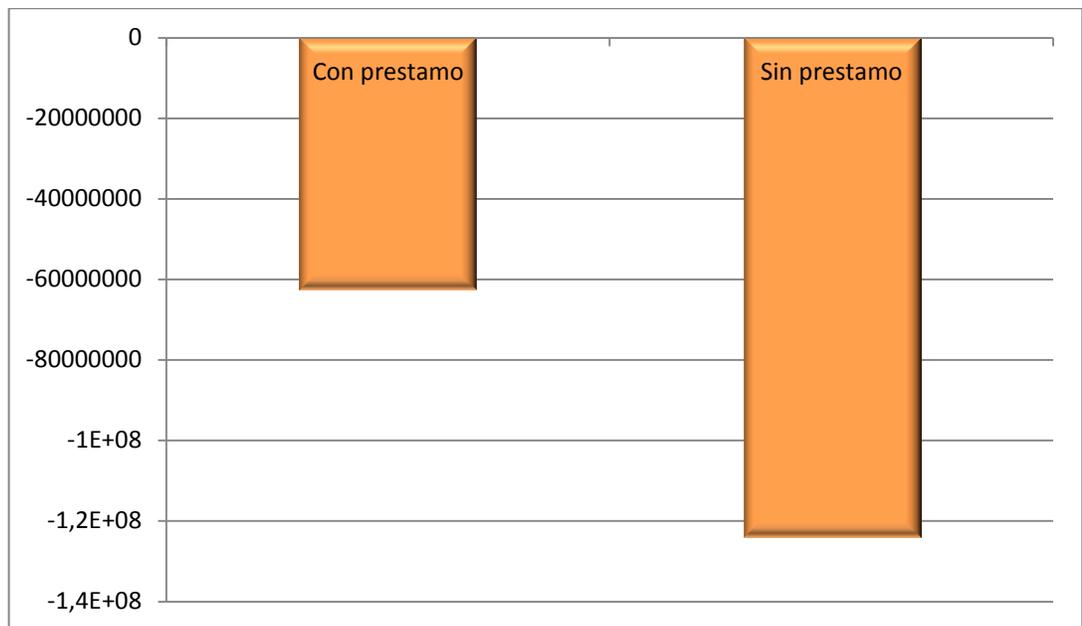
Observando cada una de las figuras, se puede ratificar que el proyecto de biodigestor con bolsas, es más atractivo con préstamo que las demás opciones (sin préstamo con bolsa, con préstamo con geomembrana, sin préstamo con geomembrana), además se puede denotar que la opción menos atractiva es la del proyecto sin préstamo utilizando la tecnología de geomembrana.

## MÁXIMO ENDEUDAMIENTO

**Figura 15. Máximo endeudamiento del sistema de biodigestor con bolsas.**



**Figura 16. Máximo endeudamiento del sistema de biodigestor con geomembranas**



Como se puede apreciar el máximo endeudamiento del proyecto muestra que la organización al realizar la financiación respectiva pierde su capacidad o músculo para poder realizar más financiación ya que pasa de 22.637.450 millones con préstamo a 43.814.900 sin préstamo, mientras que para el sistema de geomembrana el poder de financiación pasa de 62.637.450 con préstamo a 123.814.900 sin préstamo.

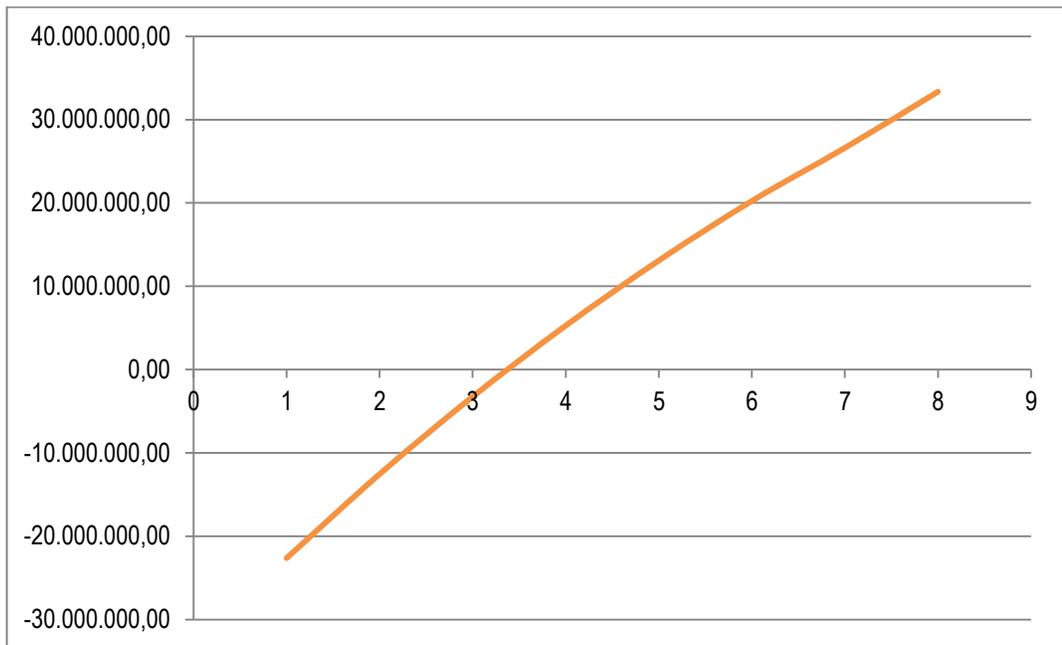
Sin embargo este factor no es decisivo ya que en realidad el estudio presentado con financiación es más rentable comparado con el que no la tiene y lo puede constatar los valores de VPN y TIR del proyecto.

### **PAYOUT**

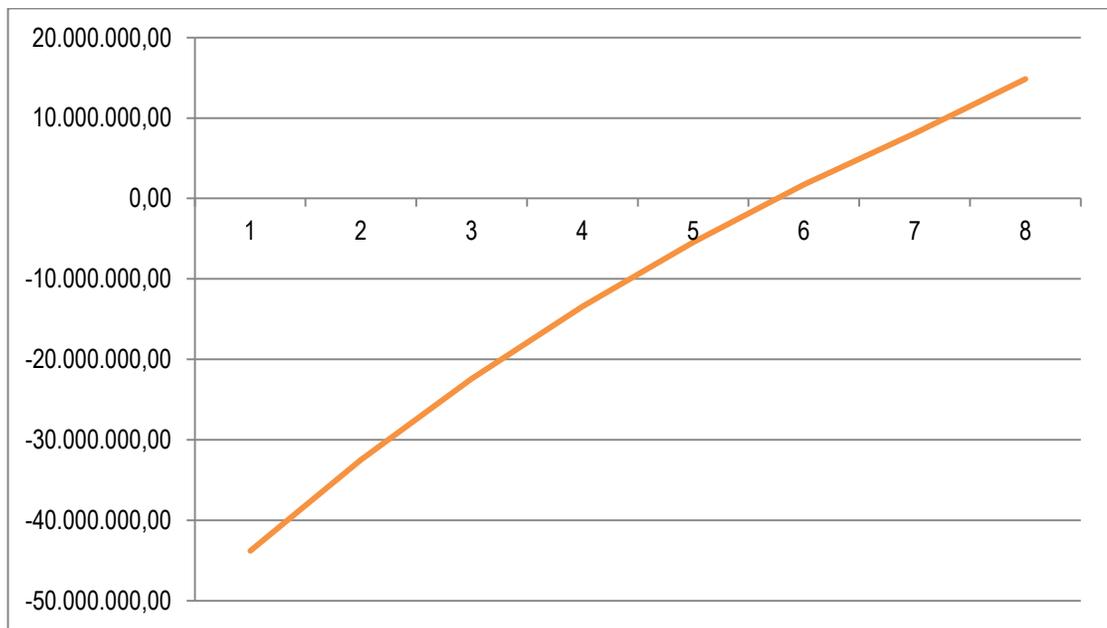
Como se puede apreciar en el estado de pérdidas y ganancias correspondiente a la recuperación de la inversión con financiación en el sistema de biodigestor con bolsa se puede apreciar que la recuperación de la inversión es muy rápido, en un

poco más de 3 años se logra recuperar el capital invertido por los inversionistas como se puede apreciar en la figura 17.

**Figura 17. Payout sistema de biodigestor en bolsa y con financiamiento.**



**Figura 18. Payout sistema de biodigestor con bolsa con sin préstamo.**

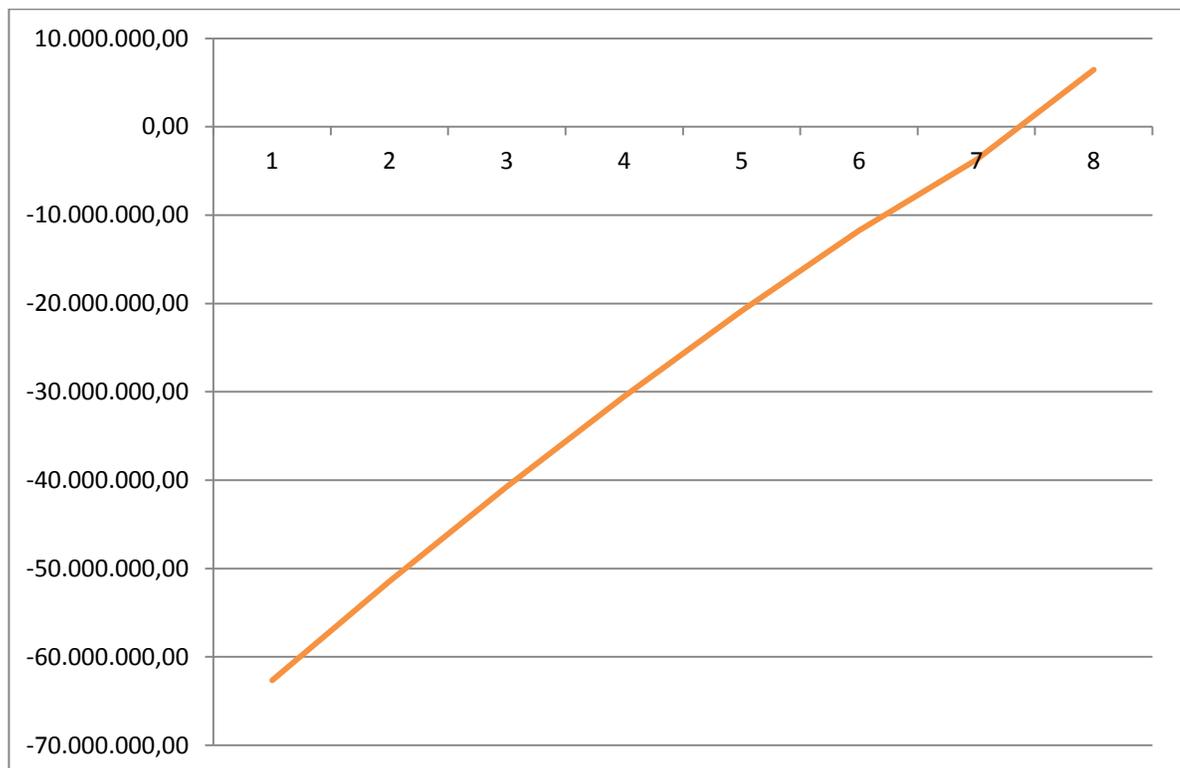


Para el caso del biodigestor con bolsa sin crédito se puede observar claramente en la gráfica que el periodo de recuperación se expande a más de 5 años, dando con esto un mayor impacto hacia lo toma de decisión por el proyecto financiado a la tasa de interés de 12% efectivo anual.

Para el caso de la utilización del biodigestor con geomembranas se puede apreciar que el periodo de recuperación del capital invertido se expande a más de 7 años, lo cual hace constatar que este biodigestor no es el sistema más atractivo económicamente.

Payout con crédito en el sistema de geomembranas, ver figura 19.

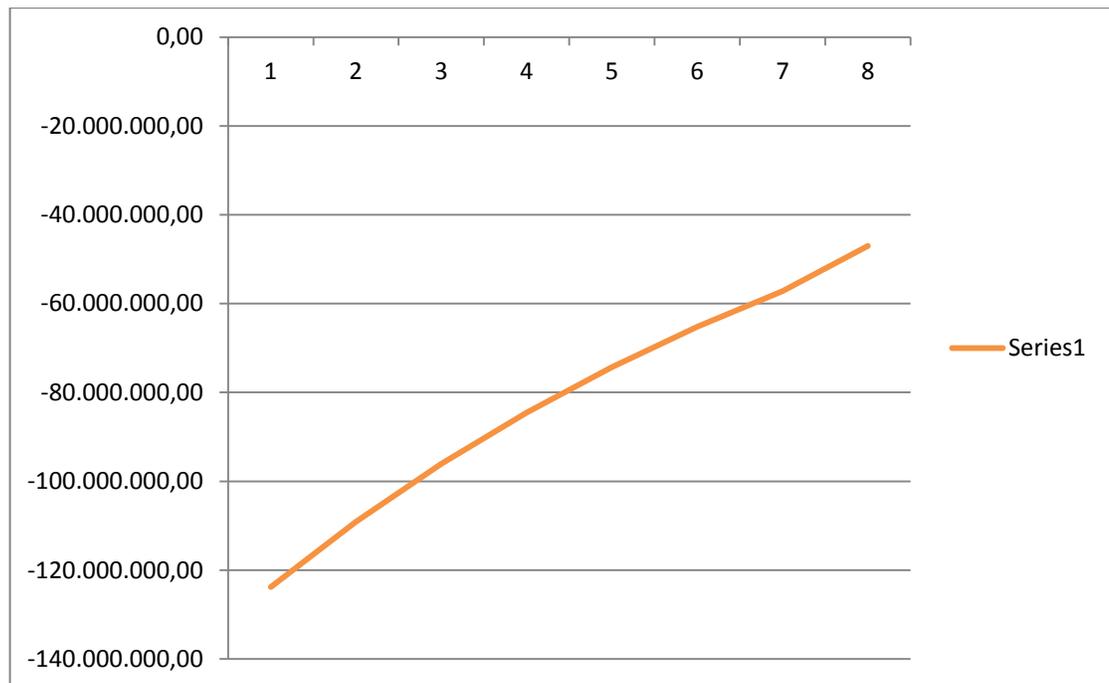
**Figura 19. Payout con crédito en sistema de geomembranas.**



Por ultimo como se puede observar en la figura 20 , el sistema de geomembrana expandiendo el tiempo a más 7 años no se recupera el capital invertido, por ende se descarta esta opción no es recomendada bajo ningún aspecto.

Payout sin crédito en el sistema de geomembranas,ver figura 20

**Figura 20 .Payout sin crédito en el sistema de geomembrana. IVAN**



Cabe resaltar que este indicador lo que busca es relacionar la ganancia expresada en el VPN y la inversión inicial, al ser una herramienta comparativa lo que muestra es que el proyecto biodigestor con bolsa y con préstamo genera un índice IVAN de 1,11, mientras que sin préstamo el mismo proyecto genera un índice IVAN de 0,26. Para el caso del proyecto de biodigestores con geomembranas y con préstamo se genera un índice IVAN de 0,08, mientras que para el mismo proyecto sin financiación el índice IVAN pasa a -0,29, con esto se ratifica que hay una pérdida de valor en la inversión realizada.

## 9. SENSIBILIDADES PARA BIODIGESTOR TIPO BOLSA

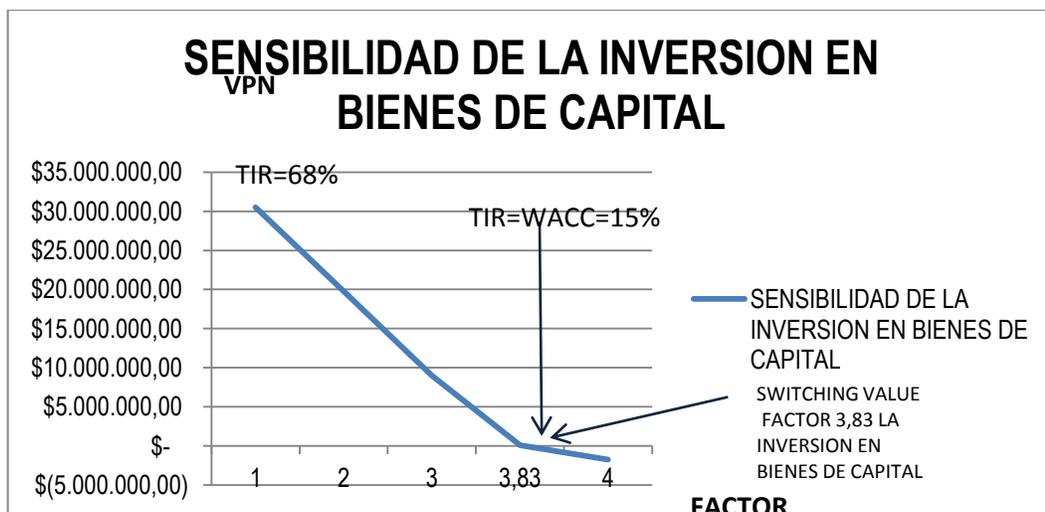
Debido a que el proyecto diseñado con financiación es más rentable y genera más riqueza se escoge éste para realizar el análisis de sensibilidad.

Se eligen cuatro variables consideradas las más importantes y de mayor peso para el análisis financiero las cuales son:

- Inversión en bienes de capital
- Inversión en capital de trabajo
- Porcentaje de biogás
- Valor del ACPM

### • SENSIBILIDAD: INVERSIÓN EN BIENES DE CAPITAL

Figura 21 .Sensibilidad de la inversión.



**Tabla 13. Sensibilidad de la inversión.**

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN BIENES DE CAPITAL BIODIGESTOR DE BOLSA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR INVERSION	TIR
Factor "1" x(inversión)	\$ 30.522.388,00	1	68,00%
Factor "2"x(inversión)	\$ 19.758.741,00	2	34%
Factor "3"x(inversión)	\$ 8.995.094,00	3	21%
Factor "3,83"x(inversión)	\$ 61.266,00	3,83	15%
Factor "4"(inversión)	-\$ 1.768.554,00	4	14,00%

**ANÁLISIS:**

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=3,83$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.
- El factor  $f=3,83$  es el valor del switching value para la inversión en bienes de capital.
- La curva de la gráfica es una curva suave lo que indica variaciones pequeñas en el VPN respecto a los cambios en la inversión.
- Con lo anterior se concluye que el proyecto es moderadamente sensible a la variación en el factor de inversión en bienes de capital, se requiere que el índice de crecimiento de la inversión ascienda casi 4 veces el caso básico para que el proyecto recupere la inversión pero no genere utilidades.
- La probabilidad de que esto ocurra es considerable puesto que si los requerimientos en la calidad de los equipos y materiales son más exigentes los precios aumentarían sustancialmente teniendo en cuenta los valores que se manejan en el mercado local.
- Para controlar la variable y esperar que esto no ocurra se debe definir estrictamente las especificaciones técnicas de los equipos y materiales y mantenerse en el presente tipo de biodigestor para la adquisición en el mercado colombiano teniendo presente la estabilidad económica que vive nuestro país actualmente.

## SENSIBILIDAD: CAPITAL DE TRABAJO

Figura 22. Sensibilidad capital de trabajo.

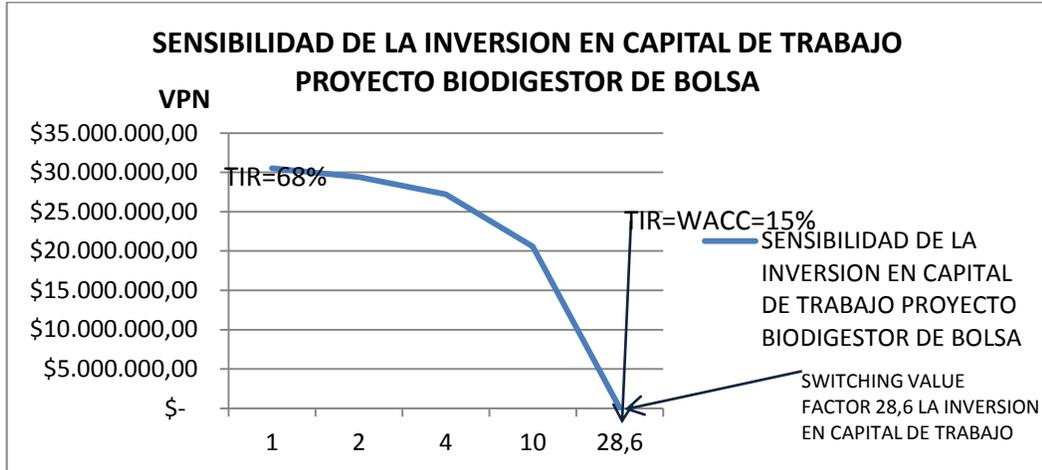


Tabla 14. Sensibilidad de la inversión

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN BIENES DE CAPITAL			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR INVERSION	TIR
Factor "1" x(inversión) caso básico	\$ 30.522.388,00	1	68,00%
Factor "2" x(capital de trabajo)	\$ 29.418.418,00	2	64%
Factor "4" x(capital de trabajo)	\$ 27.210.479,00	4	56%
Factor "10" x(capital de trabajo)	\$ 20.586.660,00	10	40%
Factor "6,125" (capital de trabajo)	\$ 52.823,00	28,6	15,00%
Factor "6,125" (capital de trabajo)	\$ 52.823,00	28,6	15,00%

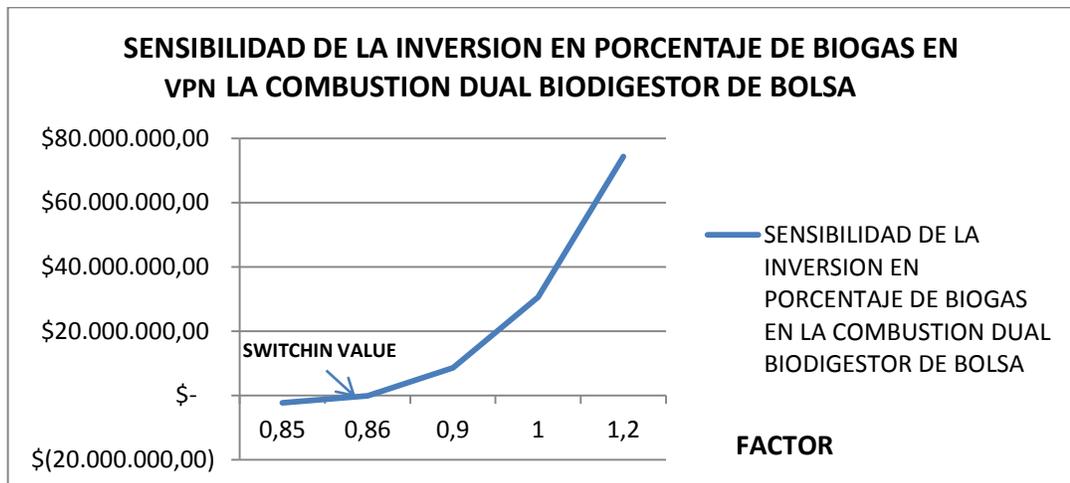
### ANÁLISIS:

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=28,6$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.
- El factor  $f=28,6$  es el valor del switching value para la inversión en capital de trabajo.

- La curva de la gráfica es una curva extremadamente suave lo que indica variaciones casi imperceptibles en el VPN respecto a los cambios en los costos de capital de trabajo.
- El proyecto no es sensible a la variación en el factor de capital de trabajo, se requiere que el índice de crecimiento de los costos ascienda 28 veces el caso básico para que el proyecto recupere la inversión pero no genere utilidades.
- La probabilidad de que esto ocurra es prácticamente nula ya que la tendencia por el contrario es bajar los costos de la mano de obra debido al crecimiento en la oferta laboral de mano de obra calificada y a la creciente competencia en el campo de generación con biogás.
- No es necesario establecer estrategias para controlar esta variable.

## SENSIBILIDAD: PORCENTAJE DE BIOGÁS

**Figura 23. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás.**



**Tabla 15. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás.**

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN PORCENTAJE DE BIOGÁS EN LA COMBUSTIÓN DUAL BIODIGESTOR DE BOLSA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR	TIR
Factor "0,85" x(%biogás)	-\$ 2.338.967,00	0,85	8,00%
Factor "0,86" x(%biogás)	-\$ 148.210,00	0,86	15%
Factor "0,90" x(%biogás)	\$ 8.614.818,00	0,9	34%
Factor "1" x(%biogás)	\$ 30.522.388,00	1	68%
Factor "1,2" (%biogás)	\$ 74.337.528,00	1,2	128,00%

**ANÁLISIS:**

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=0,86$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.
- El factor  $f=0,86$  es el valor del switching value para la variable de porcentaje de biogás.
- La curva de la gráfica es una curva pronunciada lo que indica variaciones muy grandes en el VPN respecto a los cambios en los porcentajes de biogás.
- Se observa que con un reemplazo de 43% o menos del ACPM por biogás el proyecto empieza a dejar de ser rentable; al alcanzar los valores de  $VPN=0$  con el factor de 0,86 el proyecto deja de ser atractivo.
- Se observa que con un factor de 1,2, es decir con un reemplazo del 60% del ACPM por biogás el VPN asciende a 74 millones lo cual es extraordinariamente bueno pero técnicamente es difícil puesto que las variables de refrigeración y mantenimiento restringen el aumento en el porcentaje de reemplazo de ACPM.
- Se deben tener planes de contingencia para que la disminución del porcentaje de biogás no alcance factores de 0,86; se debe asegurar el suministro de biogás a la planta generadora.

- Esta variable de sensibilidad es de mucho cuidado para la rentabilidad del proyecto en el sentido que un cambio muy pequeño en los porcentajes de biogás producen ya sea el aumento en la riqueza o la caída del proyecto.

## SENSIBILIDAD: VALOR DEL ACPM

Figura 24. Sensibilidad en el valor del ACPM

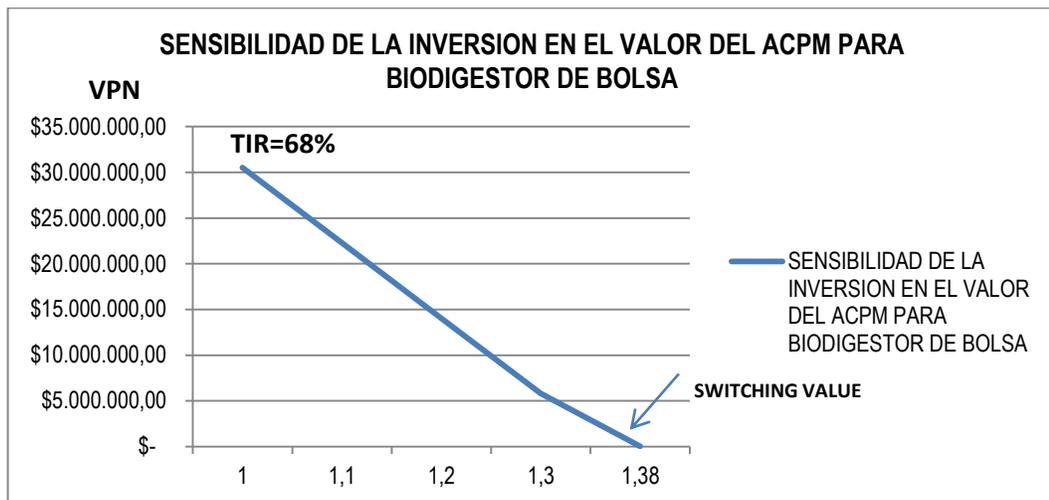


Tabla 16 Sensibilidad en el valor del ACPM

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN EL VALOR DEL ACPM PARA BIODIGESTOR DE BOLSA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR	TIR
Factor "1" x(valor ACPM)	\$ 30.522.388,00	1	68,00%
Factor "1,1" x(valor ACPM)	\$ 22.280.764,00	1,1	57%
Factor "1,2"x(valor ACPM)	\$ 14.039.139,00	1,2	45%
Factor "1,3"x(valor ACPM)	\$ 5.797.515,00	1,3	30%
Factor "1,38"(valor ACPM)	\$ 28.378,00	1,37	15,00%

### ANÁLISIS:

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=1,38$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.

- El factor  $f=1,38$  es el valor del switching value para el valor del ACPM.
- La curva de la gráfica es una curva pronunciada lo que indica variaciones grandes en el VPN respecto a los cambios en el valor del ACPM.
- Se observa que para un factor de 1,38 en el valor del ACPM el proyecto empieza a no ser rentable; este valor del factor es muy pequeño y es altamente probable que ocurra debido a la tendencia en los últimos años de subir el precio de los combustibles.
- Se deben crear estrategias efectivas para amortiguar los costos generados en el flujo de caja a razón del aumento en el valor del ACPM; esta variable se considera crítica para el aseguramiento de la rentabilidad del proyecto.

## 10. SENSIBILIDADES PARA BIODIGESTOR TIPO GEOMEMBRANA

Debido a que el proyecto diseñado con financiación es más rentable y genera más riqueza se escoge éste para realizar el análisis de sensibilidad.

Se eligen cuatro variables consideradas las más importantes y de mayor peso para el análisis financiero las cuales son:

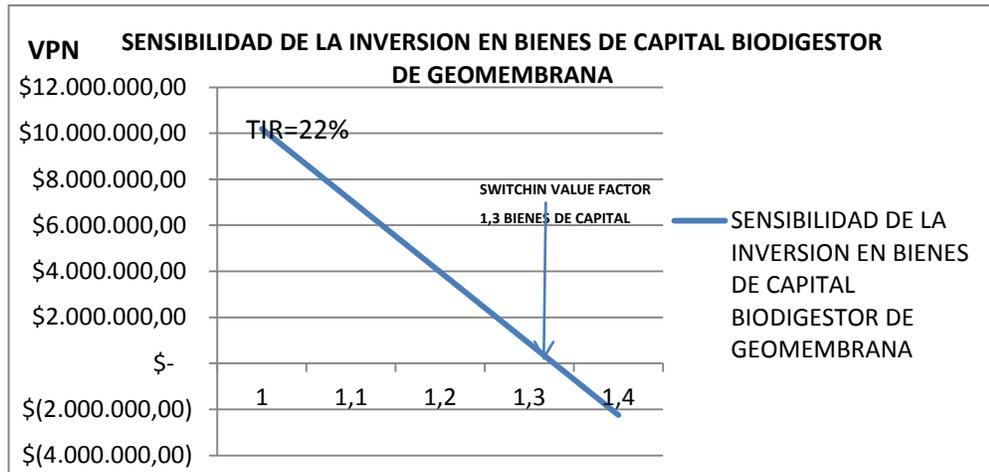
- Inversión en bienes de capital
- Inversión en capital de trabajo
- Porcentaje de biogás
- Valor del ACPM

### SENSIBILIDAD: INVERSIÓN EN BIENES DE CAPITAL

Tabla 17. Sensibilidad de la inversión en biodigestor membrana.

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN BIENES DE CAPITAL BIODIGESTOR DE GEOMEMBRANA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR INVERSIÓN	TIR
Factor "1" x(inversión)	\$ 10.191.995,00	1	22,00%
Factor "1,1"x(inversión)	\$ 7.082.591,00	1,1	19%
Factor "1,2"x(inversión)	\$ 3.973.187,00	1,2	17%
Factor "1,3"x(inversión)	\$ 863.783,00	1,3	15%
Factor "1,4"(inversión)	-\$ 2.245.622,00	1,4	14,00%

**Figura 25. Sensibilidad de la inversión en biodigestor membrana.**



**ANÁLISIS:**

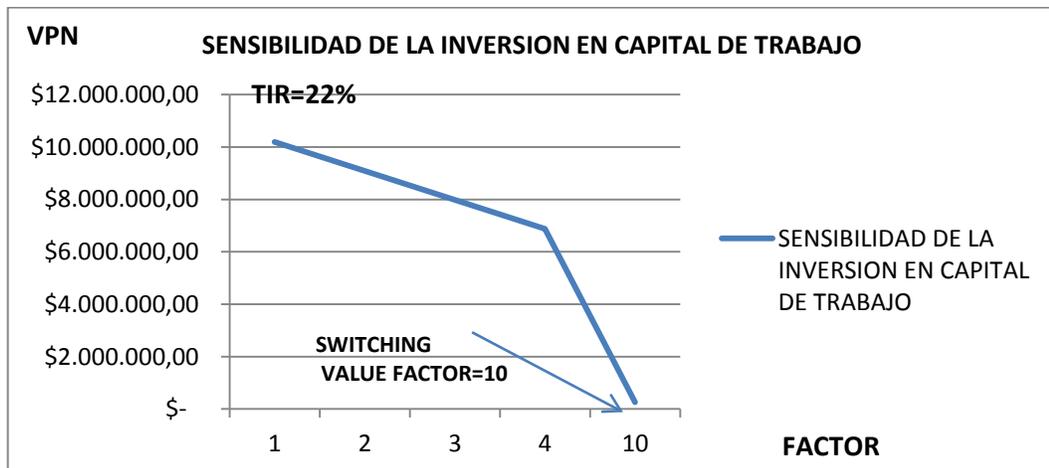
- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=1,3$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.
- El factor  $f=1,3$  es el valor del switching value para la inversión en bienes de capital.
- La línea de la gráfica es una recta de pendiente pronunciada lo que indica variaciones muy grandes en el VPN respecto a cambios pequeños en la inversión.
- De tan solo 1,3 veces aumentada la inversión de capital el proyecto deja de ser rentable.
- Es muy probable que esto ocurra puesto que la tendencia de los precios en equipos es aumentar.
- Es muy complicado controlar esta variable y además no es posible establecer un plan de contingencia para minimizar las afecciones adversas provocadas.

## SENSIBILIDAD: INVERSIÓN CAPITAL DE TRABAJO

Tabla 18. Sensibilidad inversión capital de trabajo biodigestor geomembrana

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN CAPITAL DE TRABAJO BIODIGESTOR GEOMEMBRANA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR INVERSIÓN	TIR
Factor "1" x(inversión)	\$ 10.191.995,00	1	22,00%
Factor "2"x(capital de trabajo)	\$ 9.088.025,00	2	21%
Factor "3"x(capital de trabajo)	\$ 7.984.055,00	3	20%
Factor "4"x(capital de trabajo)	\$ 6.880.085,00	4	19%
Factor "10"x(capital de trabajo)	\$ 256.267,00	10	15,00%

Figura 26. Sensibilidad inversión capital de trabajo biodigestor geomembrana



**ANÁLISIS:** En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=10$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.

- El factor  $f=10$  es el valor del switching value para la inversión en capital de trabajo.

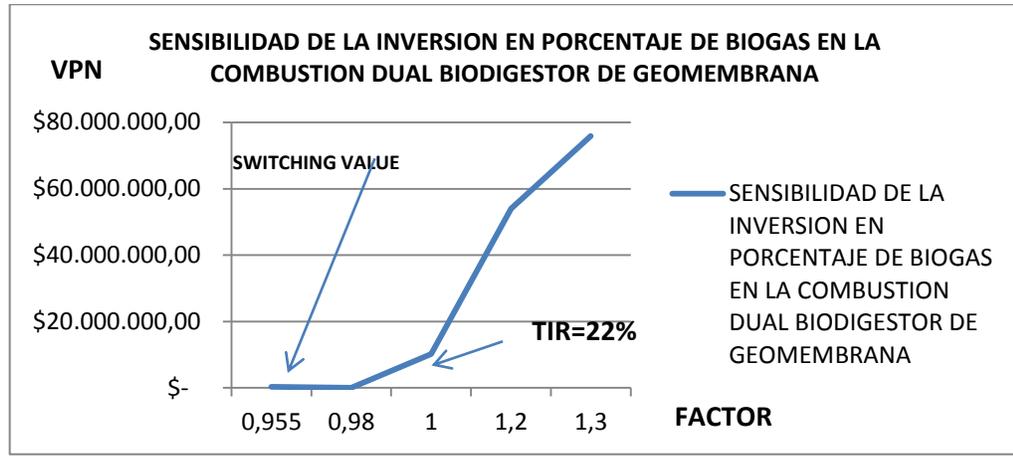
- La curva de la gráfica es una curva extremadamente suave lo que indica variaciones casi imperceptibles en el VPN respecto a los cambios en los costos de capital de trabajo.
- El proyecto no es sensible a la variación en el factor de capital de trabajo, se requiere que el índice de crecimiento de los costos ascienda 10 veces el caso básico para que el proyecto recupere la inversión pero no genere utilidades.
- La probabilidad de que esto ocurra es prácticamente nula ya que la tendencia por el contrario es bajar los costos de la mano de obra debido al crecimiento en la oferta laboral de mano de obra calificada y a la creciente competencia en el campo de generación con biogás.
- No es necesario establecer estrategias para controlar esta variable.

## SENSIBILIDAD: PORCENTAJE DE BIOGÁS

**Tabla 19. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás en la combustión dual biodigestor de geomembrana**

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN PORCENTAJE DE BIOGÁS EN LA COMBUSTIÓN DUAL BIODIGESTOR DE GEOMEMBRANA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR	TIR
Factor "0,955" x(%biogás)	\$ 333.588,00	0,955	15,00%
Factor "0,98" x(%biogás)	\$ 48.158,00	0,98	19%
Factor "1"x(%biogás)	\$ 10.191.995,00	1	22,00%
Factor "1,2"x(%biogás)	\$ 54.007.134,00	1,2	48%
Factor "1,3"(%biogás)	\$ 75.914.704,00	1,3	60,00%

**Figura 27. Sensibilidad de la inversión en porcentaje de biogás en la combustión dual biodigestor de geomembrana**



**ANÁLISIS:**

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=0,955$  y una TIR en este mismo punto de 15% =RMA.
- El factor  $f=0,955$  es el valor del switching value para la variable de porcentaje de biogás.
- La curva de la gráfica es una curva pronunciada lo que indica variaciones muy grandes en el VPN respecto a los cambios en los porcentajes de biogás.
- Se observa que con un reemplazo de 48% o menos del ACPM por biogás el proyecto empieza a dejar de ser rentable; al alcanzar los valores de  $VPN=0$  con el factor de 0,955 el proyecto deja de ser atractivo.
- Se observa que con un factor de 1,2, es decir con un reemplazo del 60% del ACPM por biogás el VPN asciende a 54 millones lo cual es extraordinariamente bueno pero técnicamente es difícil puesto que las variables de refrigeración y mantenimiento restringen el aumento en el porcentaje de reemplazo de ACPM.
- Se deben tener planes de contingencia para que la disminución del porcentaje de biogás no alcance factores de 0,955; se debe asegurar el suministro de biogás a la planta generadora.

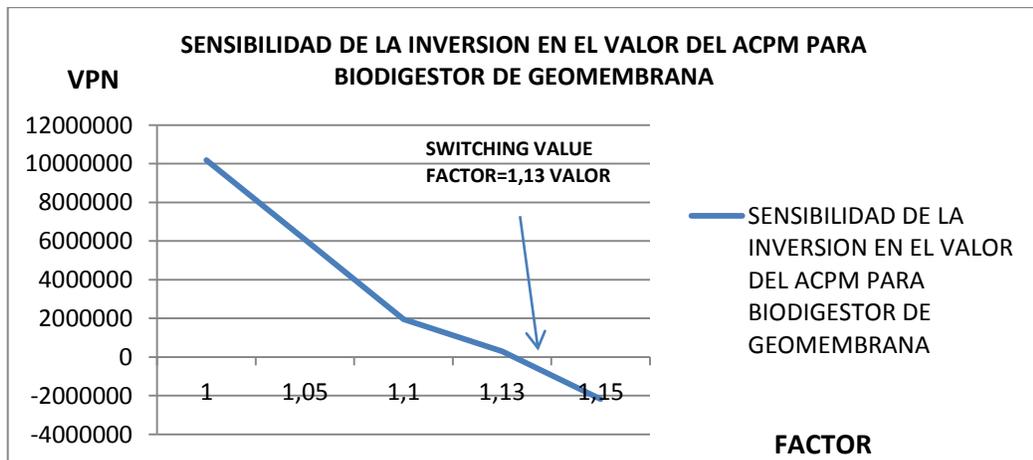
- Esta variable de sensibilidad es de mucho cuidado para la rentabilidad del proyecto en el sentido que un cambio muy pequeño en los porcentajes de biogás producen ya sea el aumento en la riqueza o la caída del proyecto.

### SENSIBILIDAD: VALOR DEL ACPM

**Tabla 19 Sensibilidad de la inversión en el valor del acpm para biodigestor de geomembrana.**

SENSIBILIDAD DE LA INVERSIÓN EN EL VALOR DEL ACPM PARA BIODIGESTOR DE GEOMEMBRANA			
FACTOR DE LA INVERSIÓN	VPN	FACTOR	TIR
Factor "1" x(valor ACPM) caso básico	10191955	1	22,00%
Factor "1,05" x(valor ACPM)	6071183	1,05	19%
Factor "1,1"x(valor ACPM)	1950370	1,1	16%
Factor "1,13"x(valor ACPM)	302045	1,13	15%
Factor "1,15"(valor ACPM)	-2170442	1,15	13,00%

**Figura 28 Sensibilidad de la inversión en el valor del acpm para biodigestor de geomembrana.**



## **ANÁLISIS:**

- En la gráfica observamos que el corte con el eje horizontal o lo que es igual cuando el VPN sea igual a cero obtenemos un valor en el factor de inversión de  $f=1,13$  y una TIR en este mismo punto de  $15\% =RMA$ .
- El factor  $f=1,13$  es el valor del switching value para el valor del ACPM.
- La curva de la gráfica es una curva pronunciada lo que indica variaciones grandes en el VPN respecto a los cambios en el valor del ACPM.
- Se observa que para un factor de  $1,13$  en el valor del ACPM el proyecto empieza a no ser rentable; este valor del factor es muy pequeño y es altamente probable que ocurra debido a la tendencia en los últimos años de subir el precio de los combustibles.
- Se deben crear estrategias efectivas para amortiguar los costos generados en el flujo de caja a razón del aumento en el valor del ACPM; esta variable se considera crítica para el aseguramiento de la rentabilidad del proyecto.

## 11. CONCLUSIONES

- La utilización de sistemas de biodigestores con membranas no es la opción más viable en cuanto a inversión se refiere ya que los valores de TIR 18% con préstamo y 2% sin préstamo, VPN 4.885.474 con préstamo y -35.547.042 sin préstamo, y valores de payout de 6 años con préstamo y de más de 8 años sin préstamo, claramente este sistema económicamente no es rentable comparado con el biodigestor en bolsa.
- El biodigestor con bolsa representa la mejor opción en cuanto a viabilidad económica se refiere ya que los valores de TIR con préstamo de 53%, sin préstamo 25%, VPN con préstamo de 25.215.868 y de 11.219.573 sin préstamo Y payout con préstamo de 3 años, mientras que sin préstamo nos da un valor de 5 años, claramente estas condiciones muestran valores atractivos para los inversionistas, además hay creación de valor importante para el capital invertido y la rentabilidad de la hacienda.
- Cabe resaltar que el proyecto genera más valor para los inversionistas con el sistema de biodigestor con bolsa y con financiación a la tasa de 12% efectivo anual respecto a la otra modalidad con o sin financiación.
- Aunque se pensara viable el proyecto empleando biodigestor tipo geomembrana tal como lo muestra el caso básico se evidenció en el análisis de sensibilidades que cualquier modificación pequeña o mínima en los valores de los porcentajes de biogás y valores de ACPM tan pequeños como un 13% hacen que el proyecto sea poco tentativo, VPN=0 Y TIR= 15% además de que la probabilidad de que los eventos no deseables ocurran son muy altas.

## BIBLIOGRAFÍA

Asociación Colombiana de Porcicultores - ACP. Corporación Autónoma Regional Rionegro – Nare. - CORNARE. Corporación Autónoma Regional Del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA. Ministerio del Medio Ambiente. Manejo de elementos de la producción porcina que pueden causar efecto ambiental. Disponible en: [www.corantioquia.gov.co/docs/ventanilla/CARTPORCI.pdf](http://www.corantioquia.gov.co/docs/ventanilla/CARTPORCI.pdf)

Biodigestores. Disponible en: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Biodisgestores.pdf>

Biogas Digest. Volume II. Biogas - Application and Product Development. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol2.pdf>

Biogas Digest. Volume II. Biogas - Application and Product Development. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol2.pdf>.

Biogas Digest. Volume III. Biogas - Costs and Benefits. And Biogas – Programme Implementation Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol3.pdf>

Biogas Digest. Volume IV. Biogas – Country Reports. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol4.pdf>

Biogas plants in animal husbandry. Disponible en: [http://journeytoforever.org/biofuel\\_library/biogasanimals.pdf](http://journeytoforever.org/biofuel_library/biogasanimals.pdf), Biogas Digest. Volume I Biogas Basics.. Disponible en: <http://www.gate-international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol1.pdf>

[international.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol1.pdf](http://www.gateinternational.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol1.pdf).

Biogas plants in animal husbandry. Disponible en: <http://www.gateinternational.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g32bie.pdf>.

Biogas Plants. by Ludwig Sasse. Disponible en: <http://www.gateinternational.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g34bie.pdf>.

Capstone turbine corp. (2002).  
[www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf](http://www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf)

Digestión anaerobia. Disponible en:  
[http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04\\_42.htm](http://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm)

Disambiental Ltda. Disponible en: [www.disambiental.com.co](http://www.disambiental.com.co)

Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor para obtener biogás a partir de desechos. Propiedades y composición del biogás. Recuperado el Marzo 06 de 2008 de: <http://proyectobiogas.blogspot.com/2008/03/propiedades-y-composicion-del-biogas.html>.

Disponible en:  
<http://www.gateinternational.org/documents/publications/webdocs/pdfs/biogasdigestvol1.pdf>

Engines for biogás. Disponible en: <http://www.gateinternational.org/documents/publications/webdocs/pdfs/g36ene.pdf>

Geosoluciones. Disponible en: [www.geomembranas.com.co](http://www.geomembranas.com.co)

KOHL, A y NEILSEN, R. Gas purification. Golf Publishing Company, Houston, Texas, 1997, p.1395.

Nassir Sapag Chain, Edición I. 2001 FORMULACION Y EVALUACION DE PROYECTOS. Pearson Education S.A

Tomás, J.; León, R. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/224381771/Curso-Diccionario-Automovil-Mantenimiento-Reparacion>

Utilización del Biogás para generación de electricidad. Disponible en: [www.cipav.gov.co](http://www.cipav.gov.co)

WELLINGER, A y LINBERG, A. Biogas upgrading utilization. International Energy Association, Paris, France; 2000.

WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. Flujo de caja del proyecto con biodigestor en bolsa

Año calendario												
Año de operación			0	1	2	3	4	5	6	7		
Año de descuento "n"			0	1	2	3	4	5	6	7	Total	
1 Activo Fijo Depreciable			(42.354.900,00)									(42.354.900,00)
Valor de Salvamento del Activo fijo depreciable										4.235.490,00		
2 Terrenos												0,00
Valor de Salvamento de los terrenos										0,00		
3 Activo Fijo Total			(42.354.900,00)									(42.354.900,00)
4 Capital de Trabajo Neto			(1.460.000,00)									(1.460.000,00)
Valor de Salvamento del C. de T.										1.460.000,00		
5 Gastos Durante la Construcción												0,00
6 Inversión Total Acumulada			(43.814.900,00)									(43.814.900,00)
7 Préstamo			21.177.450,00									21.177.450,00
8 Amortización a capital				(5.294.362,50)	(5.294.362,50)	(5.294.362,50)	(5.294.362,50)					(21.177.450,00)
9 Saldo Deudor al Final del Período			21.177.450,00	15.883.087,50	10.588.725,00	5.294.362,50	0,00					
10 Intereses			0,00	(2.117.745,00)	(1.588.308,75)	(1.058.872,50)	(529.436,25)	0,00				(5.294.362,50)
11 Depreciación anual				6.050.700,00	6.050.700,00	6.050.700,00	6.050.700,00	6.050.700,00	6.050.700,00	6.050.700,00		
12 Depreciación acumulada					12.101.400,00	18.152.100,00	24.202.800,00	30.253.500,00	36.304.200,00	42.354.900,00		
13 Ganancia Ocasional										4.235.490,00		
14 Valor de la energía SIN PROYECTO				133.323.170,40	137.322.865,51	141.442.551,48	145.685.828,02	150.056.402,86	154.558.094,95	159.194.837,80		
15 Valor de la energía CON PROYECTO				114.895.284,00	118.342.142,52	121.892.406,80	125.549.179,00	129.315.654,37	133.195.124,00	137.190.977,72		
16 Ahorro				18.427.886,40	18.980.722,99	19.550.144,68	20.136.649,02	20.740.748,49	21.362.970,95	22.003.860,08		
Venta de abono				3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00		
17 Costo Materia Prima				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
18 Gastos (AOM)				1.842.788,64	1.898.072,30	1.955.014,47	2.013.664,90	2.074.074,85	2.136.297,09	2.200.386,01		
19 Ingresos Operacionales				16.585.097,76	17.082.650,69	17.595.130,21	18.122.984,12	18.666.673,64	19.226.673,85	19.803.474,07		
20 Utilidad Gravable con Préstamo			0,00	8.416.652,76	9.443.641,94	10.485.557,71	11.542.847,87	12.615.973,64	13.175.973,85	17.988.264,07		
21 Utilidad Gravable sin Préstamo			0,00	10.534.397,76	11.031.950,69	11.544.430,21	12.072.284,12	12.615.973,64	13.175.973,85	17.988.264,07		
22 Imponible con Préstamo			0,00	2.861.661,94	3.210.838,26	3.565.089,62	3.924.568,28	4.289.431,04	4.479.831,11	6.116.009,78		
23 Imponible sin Préstamo			0,00	3.581.695,24	3.750.863,24	3.925.106,27	4.104.576,60	4.289.431,04	4.479.831,11	6.116.009,78		
24 Flujo Neto de Caja Con Préstamo		0,00	-22.637.450,00	11.605.690,82	12.283.503,68	12.971.168,09	13.668.979,59	14.377.242,60	14.746.842,74	17.922.954,29		
25 Flujo Neto de Caja Sin Préstamo		0,00	-43.814.900,00	13.003.402,52	13.331.787,46	13.670.023,94	14.018.407,52	14.377.242,60	14.746.842,74	17.922.954,29		
26 Factor de Descuento $1/(1+i)^n$ i= RMA	1,000000	1,000000	1,000000	0,869565	0,756144	0,657516	0,571753	0,497177	0,432328	0,375937		
27 Flujo Neto de Caja Descontado a RMA con Préstamo		0,00	-22.637.450,00	10.091.905,06	9.288.093,52	8.528.753,57	7.815.283,45	7.148.030,54	6.375.467,07	6.737.902,38		
28 FNC Acumulado Descontado a RMA con Préstamo		0,00	-22.637.450,00	-12.545.544,94	-3.257.451,42	5.271.302,16	13.086.585,60	20.234.616,14	26.610.083,22	33.347.985,60		
29 TIR Con Préstamo							53%					
30 VPN a RMA con Préstamo		\$ 25.215.868										
31 Índice de Valor Actual Neto (IVAN)		1,11										
32 Período de Repago (años de operación)							2					
33 Máximo Endeudamiento							(522.637.450)					
32 Flujo Neto de Caja Descontado a RMA sin Préstamo		0,00	-43.814.900,00	11.307.306,54	10.080.746,66	8.988.262,64	8.015.070,00	7.148.030,54	6.375.467,07	6.737.902,38		
33 FNC Acumulado Descontado a RMA sin Préstamo		0,00	-43.814.900,00	-32.507.593,46	-22.426.846,80	-13.438.584,16	-5.423.514,16	1.724.516,38	8.099.983,45	14.837.885,83		
34 TIR sin Préstamo							25%					
35 VPN a RMA sin Préstamo		\$ 11.219.573										
36 Índice de Valor Actual Neto (IVAN)		0,26										
37 Período de Repago (años de operación)							5					
38 Máximo Endeudamiento							(543.814.900)					

### ANEXO B. Pautas del proyecto biodigestor en bolsa

			Valores monetarios en millones de pesos de 2.013
			Rendimiento Mínimo Atractivo (% anual /100)
			0,15
Valor de Salvamento (% de Inversión/100)	0,1		
Financiación (% de la inv. En Act. Fijo / 100)	0,5		
Tasa interés anual del préstamo (%/100)	0,1		
Imporrenta + CREE (%/100)	0,34		
Depreciación (línea recta ) anual	1/7		

### ANEXO C. Indicadores financieros biodigestor en bolsa

INDICADORES FINANCIEROS		
	Con Prestamo	Sin Prestamo
TIR	53%	25%
VPN	\$ 25.215.868,13	\$ 11.219.573,40
IVAN	1,11	0,26
Max. Endeudamiento	(\$ 22.637.450,00)	(\$ 43.814.900,00)
P.out	2	3

## ANEXO D. Flujo de caja proyecto biodigestor con geomembranas

Año calendario												
Año de operación			0	1	2	3	4	5	6	7		
Año de descuento "n"			0	1	2	3	4	5	6	7	Total	
<b>1 Activo Fijo Depreciable</b>			(122.354.900,00)									(122.354.900,00)
Valor de Salvamento del Activo fijo depreciable										12.235.490,00		
<b>2 Terrenos</b>												0,00
Valor de Salvamento de los terrenos										0,00		
<b>3 Activo Fijo Total</b>			(122.354.900,00)									(122.354.900,00)
<b>4 Capital de Trabajo Neto</b>			(1.460.000,00)									(1.460.000,00)
Valor de Salvamento del C. de T.										1.460.000,00		
<b>5 Gastos Durante la Construcción</b>												0,00
<b>6 Inversión Total Acumulada</b>			(123.814.900,00)									(123.814.900,00)
<b>7 Préstamo</b>			61.177.450,00									61.177.450,00
<b>8 Amortización a capital</b>				(15.294.362,50)	(15.294.362,50)	(15.294.362,50)	(15.294.362,50)					(61.177.450,00)
<b>9 Saldo Deudor al Final del Período</b>			61.177.450,00	45.883.087,50	30.588.725,00	15.294.362,50	0,00					
<b>10 Intereses</b>			0,00	(6.117.745,00)	(4.588.308,75)	(3.058.872,50)	(1.529.436,25)	0,00				(15.294.362,50)
<b>11 Depreciación anual</b>				17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	17.479.271,43	
<b>12 Depreciación acumulada</b>					34.958.542,86	52.437.814,29	69.917.085,71	87.396.357,14	104.875.628,57	122.354.900,00		
<b>13 Ganancia Ocasional</b>										12.235.490,00		
<b>14 Valor de la energía SIN PROYECTO</b>				133.323.170,40	137.322.865,51	141.442.551,48	145.685.828,02	150.056.402,86	154.558.094,95	159.194.837,80		
<b>15 Valor de la energía CON PROYECTO</b>				114.895.284,00	118.342.142,52	121.892.406,80	125.549.179,00	129.315.654,37	133.195.124,00	137.190.977,72		
<b>16 Ahorro</b>				18.427.886,40	18.980.722,99	19.550.144,68	20.136.649,02	20.740.748,49	21.362.970,95	22.003.860,08		
Venta de abono			3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00		
Costo Materia Prima			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Gastos (AOM)			1.842.788,64	1.898.072,30	1.955.014,47	2.013.664,90	2.074.074,85	2.136.297,09	2.200.386,01			
<b>19 Ingresos Operacionales</b>				16.585.097,76	17.082.650,69	17.595.130,21	18.122.984,12	18.666.673,64	19.226.673,85	19.803.474,07		
<b>20 Utilidad Gravable con Préstamo</b>			0,00	-7.011.918,67	-4.984.929,49	-2.943.013,71	-885.723,56	1.187.402,22	1.747.402,42	14.559.692,64		
<b>21 Utilidad Gravable sin Préstamo</b>			0,00	-894.173,67	-396.620,74	115.858,79	643.712,69	1.187.402,22	1.747.402,42	14.559.692,64		
<b>22 Imporrenta con Préstamo</b>			0,00	-2.384.052,35	-1.694.876,03	-1.000.624,66	-301.146,01	403.716,75	594.116,82	4.950.295,50		
<b>23 Imporrenta sin Préstamo</b>			0,00	-304.019,05	-134.851,05	39.391,99	218.862,32	403.716,75	594.116,82	4.950.295,50		
<b>24 Flujo Neto de Caja Con Préstamo</b>			0,00	-62.637.450,00	12.851.405,11	14.189.217,97	15.536.882,38	16.894.693,88	18.262.956,89	18.632.557,03	27.088.668,57	
<b>25 Flujo Neto de Caja Sin Préstamo</b>			0,00	-123.814.900,00	16.889.116,81	17.217.501,74	17.555.738,23	17.904.121,80	18.262.956,89	18.632.557,03	27.088.668,57	
<b>26 Factor de Descuento <math>1/(1+i)^n</math> i= RMA</b>	1,000000	1,000000	1,000000	0,869565	0,756144	0,657516	0,571753	0,497177	0,432328	0,375937		
<b>27 Flujo Neto de Caja Descontado a RMA con Préstamo</b>			0,00	-62.637.450,00	11.175.134,88	10.729.087,31	10.215.752,36	9.659.596,06	9.079.917,28	8.055.368,59	10.183.633,88	
<b>28 FNC Acumulado Descontado a RMA con Préstamo</b>			0,00	-62.637.450,00	-51.462.315,12	-40.733.227,81	-30.517.475,45	-20.857.879,39	-11.777.962,11	-3.722.593,52	6.461.040,36	
<b>29 TIR Con Préstamo</b>							18%					
<b>30 VPN a RMA con Préstamo</b>	\$ 4.885.475											
<b>31 Índice de Valor Actual Neto (IVAN)</b>	0,08											
<b>32 Período de Repago (años de operación)</b>							2					
<b>33 Máximo Endeudamiento</b>							(\$ 62.637.450)					
<b>32 Flujo Neto de Caja Descontado a RMA sin Préstamo</b>			0,00	-123.814.900,00	14.686.188,53	13.018.904,91	11.543.182,86	10.236.739,75	9.079.917,28	8.055.368,59	10.183.633,88	
<b>33 FNC Acumulado Descontado a RMA sin Préstamo</b>			0,00	-123.814.900,00	-109.128.711,47	-96.109.806,56	-84.566.623,71	-74.329.883,95	-65.249.966,67	-57.194.598,08	-47.010.964,21	
<b>34 TIR sin Préstamo</b>							2%					
<b>35 VPN a RMA sin Préstamo</b>	(\$ 35.547.043)											
<b>36 Índice de Valor Actual Neto (IVAN)</b>	-0,29											
<b>37 Período de Repago (años de operación)</b>							5					
<b>38 Máximo Endeudamiento</b>							(\$ 123.814.900)					

### ANEXO E. Pautas del proyecto biodigestor con geomembranas

			Valores monetarios en millones de pesos de 2.013
			Rendimiento Mínimo Atractivo (% anual /100)
			0,15
Valor de Salvamento (% de Inversión/100)	0,1		
Financiación (% de la inv. En Act. Fijo / 100)	0,5		
Tasa interés anual del préstamo (%/100)	0,1		
Imporrenta + CREE (%/100)	0,34		
Depreciación (línea recta ) anual	1/7		

**ANEXO F. Indicadores financieros biodigestor con geomembrana**

<b>INDICADORES FINANCIEROS</b>		
	<b>Con Prestamo</b>	<b>Sin Prestamo</b>
<b>TIR</b>	18%	2%
<b>VPN</b>	\$ 4.885.474,75	(\$ 35.547.042,88)
<b>IVAN</b>	0,08	-0,29
<b>Max. Endeudamiento</b>	(\$ 62.637.450,00)	(\$ 123.814.900,00)
<b>P.out</b>	5	>7

## ANEXO G. Cuadro de sensibilidades

SENSIBILIDADES y SWITCHING VALUES	FACTORES DE VARIACION
<i>Variables que determinan el comportamiento del rendimiento de un proyecto</i>	
<b>Inversiones</b>	
- Inversiones en bienes de capital	1
- Inversiones en capital de trabajo	1
<b>Dimensiones del mercado</b>	
Valor de la energia electrica de la red	1
% de Biogas	1
Valor del ACPM	1
<b>Costos / gastos de operación</b>	
- Costos/gastos variables proyectados	
- Costos/gastos fijos proyectados	
<b>Vida económica del proyecto</b>	
<b>Impuesto de renta</b>	
<b>Financiación</b>	
- Tasa de interés	1
- Período de gracia	
- Periodo de amortización	
<b>RMA</b>	

## ANEXO H. Flujo de caja sensibilidad en inversión de bienes de capital biodigestor de bolsa con financiación

Valor de Salvamento del C. de T.											1.460.000,00	
5 Gastos Durante la Construcción												0,00
6 Inversión Total Acumulada			#####									#####
7 Préstamo			84.709.800,00									84.709.800,00
8 Amortización a capital				-21.177.450,00	-21.177.450,00	-21.177.450,00	-21.177.450,00					-84.709.800,00
9 Saldo Deudor al Final del Período			84.709.800,00	63.532.350,00	42.354.900,00	21.177.450,00	0,00					
## Intereses			0,00	-8.470.980,00	-6.353.235,00	-4.235.490,00	-2.117.745,00	0,00				-21.177.450,00
## Depreciación anual				24.202.800,00	24.202.800,00	24.202.800,00	24.202.800,00	24.202.800,00	24.202.800,00	24.202.800,00		
## Depreciación acumulada					48.405.600,00	72.608.400,00	96.811.200,00	#####	#####	#####		
## Ganancia Ocasional											16.941.960,00	
## Valor de la energía SIN PROYECTO				#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####		
## Valor de la energía CON PROYECTO				#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####		
## Ahorro				18.427.886,40	35.791.870,80	31.390.566,48	23.554.790,28	21.038.892,00	15.500.567,71	57.640,80		
Venta de abono				3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00	3.000.000,00		
## Costo Materia Prima				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
## Gastos (AOM)				1.842.788,64	3.579.187,08	3.139.056,65	2.355.479,03	2.103.889,20	1.550.056,77	5.764,08		
## Ingresos Operacionales				16.585.097,76	32.212.683,72	28.251.509,83	21.199.311,25	18.935.002,80	13.950.510,94	51.876,72		
## Utilidad Gravable con Préstamo				0,00	-16.088.682,24	1.656.648,72	-186.780,17	-5.121.233,75	-5.267.797,20	-10.252.289,06	-7.208.963,28	
## Utilidad Gravable sin Préstamo				0,00	-7.617.702,24	8.009.883,72	4.048.709,83	-3.003.488,75	-5.267.797,20	-10.252.289,06	-7.208.963,28	
## Imporrenta con Préstamo				0,00	-5.470.151,96	563.260,56	-63.505,26	-1.741.219,47	-1.791.051,05	-3.485.778,28	-2.451.047,52	
## Imporrenta sin Préstamo				0,00	-2.590.018,76	2.723.360,46	1.376.561,34	-1.021.186,17	-1.791.051,05	-3.485.778,28	-2.451.047,52	
## Flujo Neto de Caja Con Préstamo				0,00	-86.169.800,00	13.584.269,72	25.296.188,16	24.079.525,09	20.822.785,73	20.726.053,85	17.436.289,22	19.444.884,24
## Flujo Neto de Caja Sin Préstamo				0,00	#####	19.175.116,52	29.489.323,26	26.874.948,49	22.220.497,43	20.726.053,85	17.436.289,22	19.444.884,24
## Factor de Descuento $1/(1+i)^n$ i=RMA		1,000000	1,000000	1,000000	0,869565	0,756144	0,657516	0,571753	0,497177	0,432328	0,375937	
## Flujo Neto de Caja Descontado a RMA con Préstamo				0,00	-86.169.800,00	11.812.408,45	19.127.552,48	15.832.678,62	11.905.495,32	10.304.511,79	7.538.189,00	7.310.052,22
## FNC Acumulado Descontado a RMA con Préstamo				0,00	-86.169.800,00	-74.357.391,55	-55.229.839,07	-39.397.160,45	-27.491.665,13	-17.187.153,34	-9.648.964,34	-2.338.912,12
## TIR Con Préstamo												14%
## VPN a RMA con Préstamo				(\$ 1.768.554)								
## Índice de Valor Actual Neto (IVAN)				-0,02								
## Período de Repago (años de operación)												2
## Máximo Endeudamiento												(\$ 86.169.800)
## Flujo Neto de Caja Descontado a RMA sin Préstamo				0,00	#####	16.674.014,37	22.298.165,03	17.670.714,88	12.704.641,52	10.304.511,79	7.538.189,00	7.310.052,22





