

**ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA
UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN
ELÉCTRICA**

DIYANIRA CASTILLO VILLABONA

ANDREA CAROLINA VALDERRAMA SOLANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

**ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA
UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN
ELÉCTRICA**

DIYANIRA CASTILLO VILLABONA

ANDREA CAROLINA VALDERRAMA SOLANO

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director

Ph.D. EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2004

A Dios por la vida llena de sueños y oportunidades

A mis padres por su amor, su ejemplo y confianza.

A mi hermano por hacerme los días más felices.

A mi abuela por ser mi alcahueta y amiga.

A mi familia por su incondicional apoyo.

A Andrea por su inagotable paciencia.

***A la universidad por dejar en mi vida mucho
más que conocimientos.***

***Gracias a Dios por ser la fuente de
fortaleza y sabiduría para mi vida.
A mis padres Numa y Eliseo por sus
oraciones y apoyo constante.
A Marta, Rafael, René, Mayerly por
brindarme un segundo hogar.***

AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro expresan su especial agradecimiento a:

- Al Doctor Edgar Fernando Castillo, director del proyecto
- Al personal del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales CEIAM – UIS
- Al señor Hector Augusto Barrera propietario de la granja porcícola Porkys
- A Eduardo y Wilson, auxiliares del laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 EL BIOGÁS COMO FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA	3
1.1 DEFINICIÓN DE BIOGÁS	3
1.2 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL BIOGÁS	3
1.3 ANTECEDENTES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS	8
1.4 IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DE LAS EMISIONES DE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS	9
1.5 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	11
1.5.1 Factores que influyen en la digestión anaerobia	14
1.6 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE ANIMAL	15
2 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	18
2.1 SISTEMA DE DEPURACIÓN DE CO ₂	18
2.2 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO	19
2.2.1 Propiedades del ácido sulfhídrico	20
2.2.2 Efectos del ácido sulfhídrico sobre el ser humano	21
2.2.3 Origen del ácido sulfhídrico	21
2.2.4 Consecuencias del ácido sulfhídrico sobre las piezas de los equipos	22
2.2.5 Proceso de eliminación del ácido sulfhídrico presente en el biogás	24

2.2.5.1 Desulfuración a partir de masas ferrosas	26
2.3 Sistema de remoción de agua	33
3. GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN MOTORES DIESEL	34
3.1 UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	34
3.1.1 Teoría esencial en motores de combustión interna	34
3.1.2 Teoría esencial en motores diesel	35
3.2 ADECUACIÓN DEL MOTOR DIESEL A UN SISTEMA DE COMBUSTIBLE DUAL	39
3.2.1 Funcionamiento del motor con combustible dual	41
3.2.2 Dispositivos mezcladores para combustible dual	44
3.2.2.1 Cámaras de mezclado simple	44
4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA	51
4.1 METODOLOGÍA DESARROLLADA	51
4.1.1 Determinación de los parámetros de operación de los biodigestores	51
4.1.2 Adecuación del sitio para el desarrollo de las pruebas	51
4.1.3 Caracterización del biogás producido en la granja Porkys	52
4.1.4 Purificación del biogás	52
4.1.5 Prueba con la planta diesel utilizando solo acpm	52
4.1.6 Alimentación del biogás a la planta diesel	52
4.1.7 Prueba de la planta diesel utilizando combustible dual (biogá-acpm)	53
4.1.8 Caracterización de los gases de escape	53
4.2 EQUIPOS UTILIZADOS	
4.2.1 Equipo medidor de pH	54
4.2.2 Equipo para medir la velocidad de flujo del biogás	54
4.2.3 Equipo para la medición de composición del biogás	55

4.2.4	Equipo para la medición de los gases de escape	55
4.2.5	Equipo para la medición de las variables operacionales de la planta	56
4.2.6	Filtro para la captación de Sulfuro de Hidrógeno	56
4.2.7	Dispositivo de secado	56
4.2.8	Medidor de gas	57
4.2.9	Planta modificada al sistema combustible dual	58
4.2.9.1	Dispositivo mezclador aire-biogás	58
4.2.9.2	Medidor de consumo de combustible	60
4.2.10	Dispositivo medidor de energía	60
4.3	RESULTADOS OBTENIDOS	61
4.3.1	Caracterización de los biodigestores de la granja Porkys	61
4.3.2	Caracterización del biogás producido en la granja Porkys	62
4.3.3	Prueba piloto con la planta diesel utilizando solo acpm	64
4.3.4	Prueba piloto de la planta utilizando combustible dual	65
4.3.5	Eficiencia de la planta	66
4.3.6	Caracterización de los gases de combustión	67
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA	71
5.1	CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA	71
5.1.1	Análisis económico	71
5.1.1.1	Flujo neto de inversión	72
5.1.1.2	Flujo neto de operación	72
5.1.2	Evaluación financiera	74
5.1.2.1	Valor presente neto	75
5.1.2.2	Tasa interna de rentabilidad	75
5.1.2.3	Relación beneficio-costo	
5.1.3	Análisis de sensibilidad	76
5.2	ESTUDIO DE CASO: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DE BIOGÁS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA GRANJA PORKYS.	77

5.3 ESTUDIO ECONÓMICO DE UTILIZACIÓN DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN EL SECTOR PORCÍCOLA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.	83
5.3.1 Resultados de la evaluación económica	87
5.3.2 Análisis de sensibilidad	91
5.3.3 Análisis de resultados	93
5.3.3.1 Costo por kw-h	93
5.3.3.2 Porcentaje de reemplazo de biogás por acpm	94
5.4 INCIDENCIA DEL PROYECTO EN SU ENTORNO	96
5.4.1 Efectos del proyecto sobre el medio ambiente	96
6. CONCLUSIONES	99
7. RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición y propiedades del biogás bajo condiciones estándar (0°C, 101,3 kPa).	4
Tabla 2. Parámetros termodinámicos del CH ₄ en condiciones normales.	5
Tabla 3. Ecuaciones termodinámicas de los gases.	5
Tabla 4. Características de digestión anaerobia en residuos de animal	16
Tabla 5. Porcentaje de metano obtenido por digestión anaerobia a partir de residuos de animal.	17
Tabla 6. Producción de biogás a partir de estiércol de varios animales.	17
Tabla 7. Proporción C/N de varios sustratos de animal	17
Tabla 8. Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso	22
Tabla 9. Característica de operación de los motores diesel y Otto	38
Tabla 10. Especificaciones de la Planta Diesel YANMAR.	58
Tabla 11. Parámetros de operación de los biodigestores granja Porkys.	62
Tabla 12. Datos de velocidad de flujo de biogás granja Porkys	62
Tabla 13. Datos de composición del biogás.	63
Tabla 14. Propiedades del Biogás en la Granja Porkys.	63

Tabla 15. Datos de composición del biogás después del desulfurador	64
Tabla 16. Parámetros de operación planta diesel solo acpm.	64
Tabla 17. Consumo específico de acpm [l/kw-h] y biogás [m ³ /kw-h] en el sistema combustible dual.	65
Tabla 18. Comparación de consumo de acpm en los sistemas: solo acpm y combustible dual (biogás – acpm).	65
Tabla 19. Eficiencia térmica en los sistemas solo diesel y combustible diesel	66
Tabla. 20 Concentración gases de combustión sistema solo acpm.	67
Tabla. 21 Concentración gases de combustión sistema dual (biogás-acpm)	67
Tabla 22. Composición acpm	68
Tabla 23. Emisiones de los gases de combustión	68
Tabla 24. Temperatura gases de escape [°C] para los sistemas solo diesel y combustible dual.	69
Tabla 25. Necesidades energéticas de las áreas seleccionadas en la granja Porkys.	78
Tabla 26. Total inversión fija granja Porkys.	78
Tabla 27. Factores utilizados en los costos de producción en la granja Porkys	79

Tabla 28. Costos anuales de producción, granja Porkys, pesos del 2004.	79
Tabla 29. Flujo neto de operación sin financiamiento y términos corrientes, granja Porkys.	80
Tabla 30. Flujo financiero neto del proyecto, sin financiamiento, pesos corrientes; granja Porkys	81
Tabla 31. Variación del TIR con respecto a las horas de servicio, granja Porkys.	82
Tabla 32. Resultados obtenidos de la evaluación económica en la granja Porkys, sin financiamiento, términos corrientes.	83
Tabla 33. Equivalencias de unidades porcinas.	84
Tabla 34. Potencia de producción de biogás en la granja Porkys.	85
Tabla 35. Potencial de generación a partir del número de unidad porcina.	86
Tabla 36. Costo de las plantas utilizadas para la evaluación económica.	87
Tabla 37. Total inversión fija, con biodigestor.	87
Tabla 38. Total inversión fija, sin biodigestor.	87
Tabla 39. Factores utilizados en los costos de producción.	88

Tabla 40. Costos anuales de producción, con biodigestor.	88
Tabla 41. Costos anuales de producción, sin biodigestor.	88
Tabla 42. Flujo neto de operación, con biodigestor.	89
Tabla 43. Flujo neto de operación, sin biodigestor.	89
Tabla 44. Flujo financiero neto del proyecto; con biodigestor.	89
Tabla 45. Flujo financiero neto del proyecto; sin biodigestor.	89
Tabla 46. Indicadores financieros, con biodigestor.	90
Tabla 47. Indicadores financieros, sin biodigestor.	90
Tabla 48 Indicadores financieros en función del número de unidad porcina, granja con biodigestor (tiempo de operación 12 horas, reemplazo 73%).	90
Tabla 49 Indicadores financieros en función del número de unidad porcina, granja sin biodigestor (tiempo de operación 12 horas, reemplazo 73%).	91
Tabla 50. Tiempo mínimo de operación para el cual el TIR = i.	93
Tabla 51. Costos del kw-h para cada una de las granjas de estudio.	93
Tabla 52. Porcentaje de reemplazo mínimo de biogás por acpm.	94
Tabla 53. Toneladas de CO ₂ equivalentes capturadas anualmente en función de la unidad porcina.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Densidad (ρ) del CH ₄ [Kg. /m ³] como una función de presión (P) y temperatura.	6
Fig. 2. Valor calorífico del biogás Hu, como función de la densidad y % en volumen de CH ₄ ($\rho = 0.72$, densidad a condiciones normales).	6
Figura 3. Presión parcial del vapor de agua en una mezcla con biogás como una función de la temperatura del biogás y humedad relativa.	7
Figura 4. Esquema básico de digestión anaerobia.	12
Figura 5. Opciones de Tratamiento para el Gas Natural.	25
Figura 6. Purificador de biogás	30
Figura 7. Esquema de funcionamiento de un motor de cuatro tiempos.	36
Figura 8. Mezclador en unión T	46
Figura 9. Cámara de mezclado simple con válvula de control manual (VCM).	46
Figura 10. Filtro de aire tipo aceite modificado como una cámara de mezclado.	46
Figura 11. Mezclador en unión T con corte oblicuo.	50

Figura 12. Cámara de mezclado con tubería de distribución de gas y malla en alambre para un mayor mezclado.	50
Figura 13. Esquema implementado para el uso de biogás en la planta diesel para generación eléctrica.	54
Figura 14. Equipo pH meter Toledo.	54
Figura 15. Equipo Bacharach y gas Pod para H ₂ S.	55
Figura 16. Equipo HORIBA.	56
Figura 17. Dispositivo de secado.	57
Figura 18. Platina de Orificio conectada a la válvula de bola.	57
Figura 19. Planta Modificada al sistema dual.	58
Figura 20. Esquema diseño dispositivo mezclador.	59
Figura 21. Mezclador biogás-aire.	60
Figura 22. Medidor de combustible.	60
Figura 23. Tablero disipador de energía.	61
Figura 24. Biodigestores presentes en la granja.	62
Figura 25. Consumo específico de acpm en la planta diesel en los sistema solo diesel y combustible dual.	66
Figura 26. Comportamiento de la eficiencia térmica en la planta diesel.	66

Figura 27. Emisiones de CO [kg/kw-h]	68
Figura 28. Emisiones de CO ₂ [kg/kw-h]	68
Figura 29. Emisiones de HC [kg/kw-h]	69
Figura 30. Temperatura de gas de escape en los sistemas: solo acpm y sistema dual.	70
Figura 31. Comportamiento anual del precio del Kw-h en el departamento de Santander.	73
Figura 32. Comportamiento histórico del precio del acpm, 1990 - junio 2004.	74
Figura 33. Variación del costo del Kw-h en función del % de reemplazo de acpm.	80
Figura 34. Análisis de sensibilidad granja Porkys.	82
Figura 35. Análisis de sensibilidad para granjas con biodigestor.	92
Figura 36. Análisis de sensibilidad para granjas sin biodigestor.	92
Figura 37. Variación en el costo del kw-h respecto al % reemplazo de biogás por diesel, para granjas con biodigestor.	95
Figura 38. Variación en el costo del kw-h respecto al % reemplazo de biogás por diesel, para granjas sin biodigestor.	95

LISTA DE ANEXOS.

ANEXO A. Plano de distribución de las áreas de la granja Porkys

ANEXO B. Plano de distribución en la granja Porkys, de la electricidad generada a partir de biogás en el planta diesel.

TITULO: ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA*

AUTORES: DIYANIRA CASTILLO VILLABONA, ANDREA CAROLINA VALDERRAMA**.

PALABRAS CLAVES: BIOGÁS, ENERGÍA, GENERACIÓN ELÉCTRICA, UNIDAD PORCINA, BONOS DE CARBONO.

CONTENIDO:

El biogás, mezcla de gases resultantes de la descomposición bacteriana de la materia orgánica en condiciones anaerobias, puede ser utilizado como combustible alternativo para la generación de energía eléctrica en motores de combustión interna diesel. La investigación se llevó a cabo en tres etapas fundamentales: el monitoreo del biogás a utilizar como combustible; las pruebas piloto de generación de energía, realizadas en la granja porcícola Porkys; y la determinación de los beneficios económicos y ambientales del uso de biogás como un sistema energético renovable en el sector porcícola de Santander.

La fase de monitoreo de gases estableció el caudal promedio de flujo de biogás y su concentración en gases metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. En la segunda fase una planta diesel Yanmar de 5,8 kw fue modificada a un sistema de combustible dual (biogás-acpm), para evaluar sus parámetros de operación como: consumo específico de acpm y biogás, potencia generada y eficiencia térmica de la máquina bajo los dos sistemas diferentes de combustible (acpm, mezcla acpm-biogás). Las pruebas piloto arrojaron un reemplazo de acpm por biogás del 73%, con un consumo específico de biogás de 0,84 m³/kw-h y una reducción en la eficiencia térmica del 33%.

Al utilizar el biogás generado en la granja Porkys como combustible se obtiene una reducción del 26,57% en el costo por kw-h comparado con los costos actuales de la energía suministrada a través del sistema de interconexión de la región, ESSA; permitiendo una reducción de las emisiones de CO en un 68,5%, las de HC en un 66,6 % y un aumento del 45,6 % en las emisiones de CO₂; estos valores determinados respecto a las emisiones expresadas en kg/kw-h de la planta operada con solo acpm. La implementación del proyecto en el sector porcícola de Santander es rentable desde el punto de vista económico para granjas que posean una capacidad de generación eléctrica mayor a 5 kw-h.

* Proyecto de Grado

** Facultad Físico químicas, Escuela de Ingeniería química, Director Dr. Edgar Fernando Castillo

TITLE: STUDY OF TECHNICAL AND ECONOMIC PRE-FEASIBILITY OF BIOGAS USE IN DIESEL PLANTS FOR ELECTRIC GENERATION*.

AUTHORS: CASTILLO VILLABONA, DIYANIRA; VALDERRAMA S, ANDREA**.

KEY WORDS: BIOGAS, ENERGY, ELECTRICAL GENERATION, PIG UNIT, CARBON BONDS.

CONTENT:

The biogas, mixture of result gases of bacteria decomposition of organic matter in anaerobe conditions, can be used as an alternate fuel for generation of electric energy in diesel internal combustion motors. The research took place in three fundamental stages: the biogas monitoring to use as a fuel; the pilot tests of energy generation, which took place at the pig farm Porkys; and the determination of economical and environmental benefit of biogas use as a renewable energy system in the pig field of Santander.

The monitoring gases phase established the average stream of biogas flow and its concentration in methane gases, carbon dioxide and hydrogen sulfide. In the second phase a 5,8 Kw Yanmar diesel plant was modified to a dual fuel system (biogas-acpm) to evaluate its parameters of operation such as: acpm specific volume of flow and biogas, generate power and thermal efficiency of the machine under two fuel different systems(acpm, acpm-biogas mixture). The pilot tests gave an acpm replacement by biogas of 73%, with a biogas specific volume of flow of 0,84m³/Kw-h and a thermal efficiency reduction of 33%.

To use the generate biogas at Porkys farm as a fuel, a reduction of 26,57 % is got in the compared Kw-h cost with the current ones of given energy by the region interconnection system, ESSA; allowing a reduction in the CO emissions in 68.5%, HC ones in 66,6% and an increase of 45,6% in the CO₂ emissions, these determined values in front of the expressed emissions in Kg/Kw-h in the operate plant with only acpm. The project implementation in Santander pig field is profitable since the economic point of view for farms which have a capacity of electric generation greater than 5 Kw-h.

* Graduation project.

** Physics-Chemical faculty, Chemical engineering school, Dr. Edgar Fernando Castillo M. Director.

INTRODUCCIÓN

El biogás, mezcla de gases producidos por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias, ha sido visto como una alternativa viable para la producción de energía; debido a su alto contenido de metano (40 – 70% en volumen) y por ende su alto poder calorífico.

A partir de la necesidad de solucionar el problema ambiental producido por el biogás (venteo de metano a la atmósfera) se han llevado a cabo diferentes estudios para su aprovechamiento, llegando a concluir que un uso eficiente y de fácil ejecución es la utilización del biogás en máquinas de combustión interna.

En el presente estudio se hace una evaluación de la pre-factibilidad técnico y económica del uso de biogás en plantas diesel para generación eléctrica, a través de la adecuación de una planta diesel a un sistema de combustible dual (acpm-biogás).

A partir de los resultados experimentales y teniendo en cuenta parámetros como la potencia real y la específica, el consumo de combustible; se determinará la rentabilidad de la utilización del biogás como combustible y se ofrecerá una posible tecnología para el sector porcícola de Santander, en donde el biogás no representa aún un beneficio económico.

La investigación se expone en este documento de la siguiente forma: el Capítulo 1, presenta los conceptos básicos de la producción, composición,

propiedades y aprovechamiento del biogás para la generación eléctrica. El capítulo 2 hace referencia a los diversos métodos que pueden ser utilizados para la limpieza del biogás. El capítulo 3 expone el funcionamiento del motor diesel, su modificación a un sistema de combustible dual (biogás-acpm) y el diseño e instalación del mezclador aire-biogás. En el capítulo 4 se realiza el estudio de la pre-factibilidad técnica, siguiendo una metodología la cual incluye pruebas pilotos ejecutadas en la granja porcícola Porkys. En el capítulo 5 se desarrolla el estudio económico y el análisis de sensibilidad con el fin de determinar la rentabilidad del proyecto en el sector porcícola de Santander; en este capítulo también se justifica el proyecto desde el punto de vista ambiental en función del porcentaje de captura de CO₂. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes de la investigación basada en los resultados obtenidos.

1. EL BIOGÁS COMO UNA FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA.

1.1 DEFINICIÓN DE BIOGÁS

Con el término 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 un residuo fertilizante.

1.2 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL BIOGÁS.

El Biogás es una mezcla de gases procedentes de la biodegradación anaerobia cuyos componentes principales son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) y trazas de ácido sulfhídrico (H₂S). Sus propiedades y composición se presentan a continuación.

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

Propiedad \ Componente	Composición		Propiedades físicas		Propiedades químicas	
	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	60%CH ₄ 40%CO ₂	65% CH ₄ 34% CO ₂ 1% resto
Fracción en volumen [%]	55 - 70	27-44	0 - 1	0 - 3	100	100
Valor calorífico neto [Kw-h/m ³]	9,9	3,0	-	6,3	6,0	6,8
Inflamabilidad en aire [% en aire]	5 -15	-	4 - 80	4 - 45	6 -12	7,7 -23
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	31,0	-240	100	- 82,5	- 82,5
Densidad [kg/m ³]	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 ³ °C]	1,6	1,6	1,3	1,4	1,6	1,6
Velocidad de la llama [m/s]	0,43	-	0,47	-	0,36	0,38

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

- **Contenido de Energía del Biogás.** La parte útil de la energía del biogás es el valor calorífico de su volumen de CH₄. Los otros componentes también tienen un contenido energético pero ellos no participan en el proceso de combustión.

Tabla 2. Parámetros termodinámicos del CH₄ en condiciones normales.

Propiedad	Valores
Masa mola M	16,04 [kg/kmol]
Densidad ρ	0,72 [kg/m ³]
Capacidad Calorífica cp	2,165 [kJ/kg.K]
Valor calorífico Hu	50 [MJ/kg]
Viscosidad	0,012 centipois
Limite de inflamabilidad en aire	5,3-14 %volumen
Relación Cp/Cv	1,307

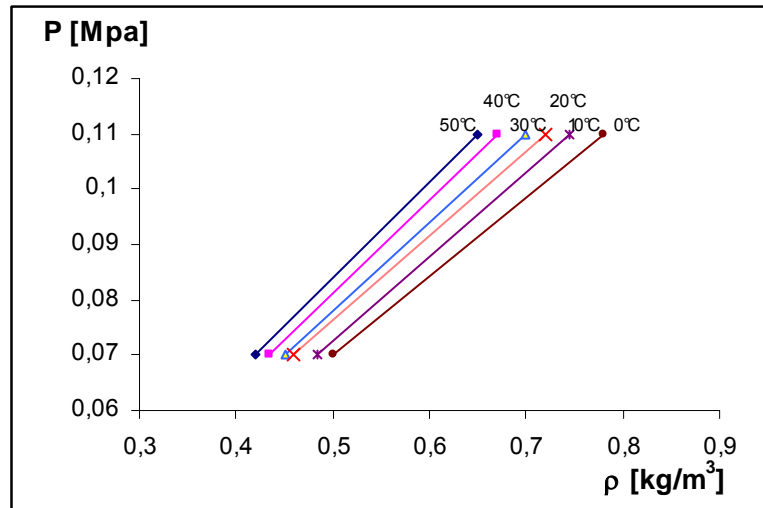
Fuente: Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999

El valor calorífico real del biogás es una función del porcentaje de CH₄, la temperatura y la presión absoluta. Este es un parámetro vital para el motor, quemador o cualquier otra aplicación en la que se use el biogás como un combustible. El cálculo del valor calorífico puede realizarse usando las relaciones termodinámica estándar de los gases.

Tabla 3. Ecuaciones termodinámicas de los gases.

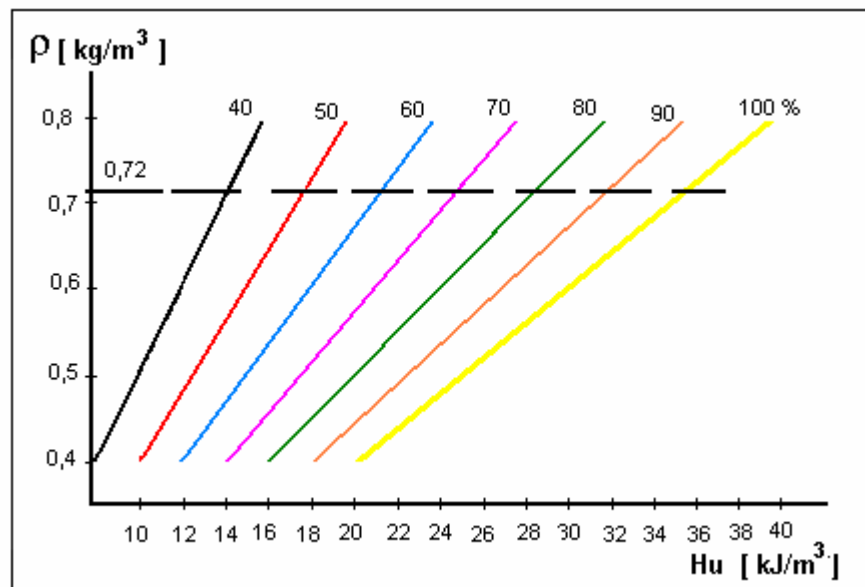
Relación Termodinámica	Ecuación
Ecuación ideal de los gases	$PV = nRT$
Exponente isentrópico	$\gamma = Cp / Cv$
Constante de los gases ideales	$R = Cp - Cv$
Proceso a volumen constante	$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$
Proceso a presión constante	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$
Proceso a temperatura constante	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$

Las siguientes figuras (figura.1 y figura. 2) facilitarán la determinación de la densidad del CH₄ en un primer paso y el valor calorífico del biogás en un segundo paso.



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

Figura 1. Densidad (ρ) del CH₄ [kg/m³] como una función de presión (P) y temperatura.

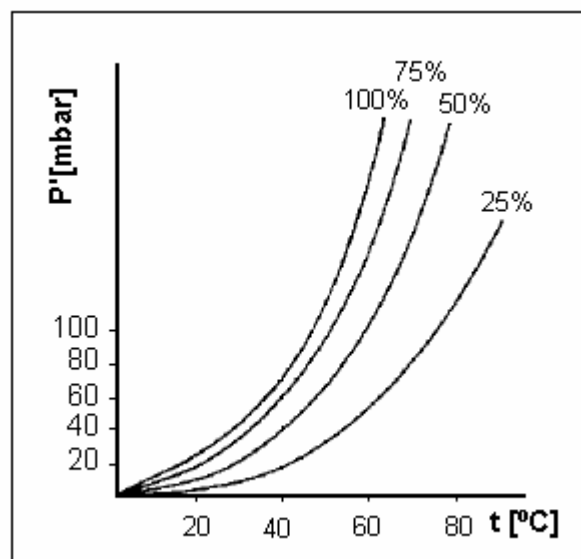


Fuente: Biogas digest. Vol I-II. Gate-gtz, Alemania. 1999

Fig. 2. Valor calorífico del biogás Hu, como función de la densidad y % en volumen de CH₄ ($\rho = 0,72$, densidad a condiciones normales).

Para el uso de los diagramas primero se determina la densidad real del CH_4 usando la temperatura y presión real del biogás (presión atmosférica + presión de la planta de biogás o la presión medida a la entrada al dispositivo de mezclado)

El biogás procedente de la planta normalmente se satura totalmente con vapor de agua. Dependiendo del curso del gas conducido por tuberías entra la planta y el sitio de consumo, parte del vapor de agua se condensará cuando el gas se enfríe. El análisis de gas a menudo no considera la humedad. En estos casos la humedad necesita ser considerada para el cálculo del valor calorífico. Esto puede llevarse a cabo por substracción de la presión parcial p' del vapor de agua de la presión total del gas, p_t . El resultado es el valor de la presión corregida P_c a ser considerada en los cálculos del valor calorífico. Considerando lo anterior $P_c = p_t - p'$. La presión parcial del vapor de agua es una función de la temperatura del gas y la humedad relativa como es dado en la figura 3.



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

Figura 3. Presión parcial del vapor de agua en una mezcla con biogás como una función de la temperatura del biogás y humedad relativa.

1.3. ANTECEDENTES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS. En la Conferencia Internacional sobre Biogás² (*Congreso RENEXPO, efectuado por primera vez durante la Semana Verde Internacional de Berlín 2002*) fue destacado que existían 1.500 plantas de biogás en Alemania, destacándose principalmente las ubicadas sobre todo en Baviera y en Baden-Wurtemberg. De esta forma son abastecidas 172.500 comunidades domésticas, contándose con un potencial de crecimiento de 200.000 instalaciones, que abastecerían 4,4 millones de comunidades domésticas. Las ventajas de los agricultores al utilizar el biogás, quedaron fuera de duda, al ponerse en claro que para el funcionamiento de una instalación bastaría el estiércol de cuatro vacas. Así se podría cubrir el consumo total de energía de una casa pequeña. Cada vez más agricultores y ganaderos descubren también el biogás como fuente de ingreso, transformando en 1.650 pequeñas plantas de biogás desechos de madera y leña, paja, estiércol líquido y otros residuos húmedos en corriente eléctrica.

Existen varias tecnologías de eficiencia comprobada para la generación de electricidad a partir de biogás, sin embargo las más frecuentemente utilizadas son las máquinas de combustión interna y las turbinas de gas, como ejemplo de este tipo de utilización podemos citar el ayuntamiento de Bilbao (España) donde a partir del biogás producido en el vertedero de Bioartigas generan 900 kW continuamente durante todo el día; igualmente en Río de Janeiro (Brasil) y en Holanda, se cubren las necesidades energéticas de más de mil familias a partir de sus rellenos sanitarios.

² Planning and construction of biogas plants for solid waste digestion in agriculture. www.u-nord.de/PDF/bi/001en.pdf.

1.4. IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL DE LAS EMISIONES DE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS.

Entre los principales gases de efecto invernadero están el dióxido de carbono (CO_2) y el Metano (CH_4), principales componentes del biogás; estos gases tienen diferentes contribuciones al efecto 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. Para comparar los efectos directos e indirectos de los gases de efecto invernadero sobre una misma base se ha desarrollado un índice denominado **Potencial de Calentamiento Global** (GWP: Global Warming Potential). El CO_2 fue escogido como gas de referencia para ser consistente con las pautas del IPCC (**Intergovernmental Panel on Climate Change**).

Tomando como unidad el “calor atrapado” (**Radiative Forcing**) por un Kg. de CO_2 durante un periodo de tiempo dado, se prefiere usar 100 años, se define el **GWP** como la razón entre el “calor atrapado” por un Kg. del gas de invernadero respectivo y el “calor atrapado” por un Kg. de CO_2 (IPCC 2001). Es decir el **GWP** relaciona las emisiones de CO_2 necesaria para crear el mismo efecto de calentamiento global que provocaría la emisión de la unidad masa de dicho gas para un período de tiempo determinado. Se estima que el GWP para el metano es 21 en un horizonte de 100 años; esto significa que cada kilogramo de metano emitido a la atmósfera equivale a 21 kg de dióxido de carbono en cuanto al potencial de calentamiento global.

En la ciudad de Kyoto, Japón, en 1997, fue firmado el Protocolo de Kyoto; tratado global para hacer frente al cambio climático en el mundo. En este se estipula la reducción de un 5,2 por ciento de gases de efecto

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 del 55% de las emisiones de bióxido de carbono, elemento que produce el calentamiento del planeta.

A consecuencia de ello, se está desarrollando en la actualidad un mercado mundial de compra-venta y de intercambio de GHG entre empresas y emprendimientos de distintos países. Debido a que los costos asociados con las emisiones de gas en sitios de tratamientos de residuos orgánicos son más económicos que los costos necesarios para obtener una reducción equivalente de los GHG generados en procesos industriales, las industrias generadoras de GHG están actualmente interesadas en adquirir créditos de GHG para sus propias empresas.

Este mercado establece la comercialización de toneladas de dióxido de carbono equivalentes al potencial de calentamiento global, tanto del metano no emitido a la atmósfera en los sitios de tratamientos de residuos orgánicos y de las toneladas no liberadas de GHG producto de la combustión del combustible fósil reemplazado por la venta de biogás para la generación de la energía calórica del proceso industrial en cuestión.

Los sistemas de biogás ofrece beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general: producción de energía (calor, luz, electricidad); mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de patógenos, huevos de gusanos y moscas; ventajas ambientales a través de la protección del suelo, del agua, del aire y la vegetación leñosa, reducción de la deforestación; se ha calculado que un 1 m³ de biogás utilizado para cocinar evita la deforestación de 0,335 hectáreas de bosques con un promedio de 10 años de vida de los árboles (Sasse, 1989); beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía, del aumento en los ingresos y del aumento en la producción

agrícola-ganadera; beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía, reducción en los costos de importación y protección ambiental.

1.5. PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. Este puede realizarse artificialmente en depósitos cerrados herméticamente llamados digestores.

Este proceso bioquímico complejo se desarrolla en tres etapas durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, por la acción de un grupo específico de microorganismos. La microbiología de un digestor, está basada en una concepción de grupos tróficos extensos aparentemente comunes a todos los procesos de digestión que operan en residuos complejos. Estos son: las bacterias hidrolíticas y fermentativas (grupo I), la bacteria acetogénica productora de H_2 obligada (grupo II) y los metanógenos (grupo III). En la figura 4 se muestran estos grupos tróficos junto con sus substratos y productos. Un cuarto grupo, la bacteria homoacetogénica, que es capaz de sintetizar acetato a partir de $H_2 + CO_2$, es de significación incierta.

- Bacterias hidrolíticas fermentativas. Este grupo contiene anaerobios tanto obligados como facultativos y es el responsable de remover pequeñas cantidades de oxígeno, que se introduce, al alimentar el digestor. La hidrólisis de proteínas, celulosa, hemicelulosa y pectinas ocurre en los digestores; el paso limitante de la velocidad de reacción es la hidrólisis de polisacáridos. La biomasa celulósica frecuentemente contiene lignina, la cual es prácticamente no biodegradable en sistemas anaerobios y puede proteger la fracción polisacárida de la biomasa del ataque enzimático, por tanto, solamente podrá digerirse la mitad de los polisacáridos.

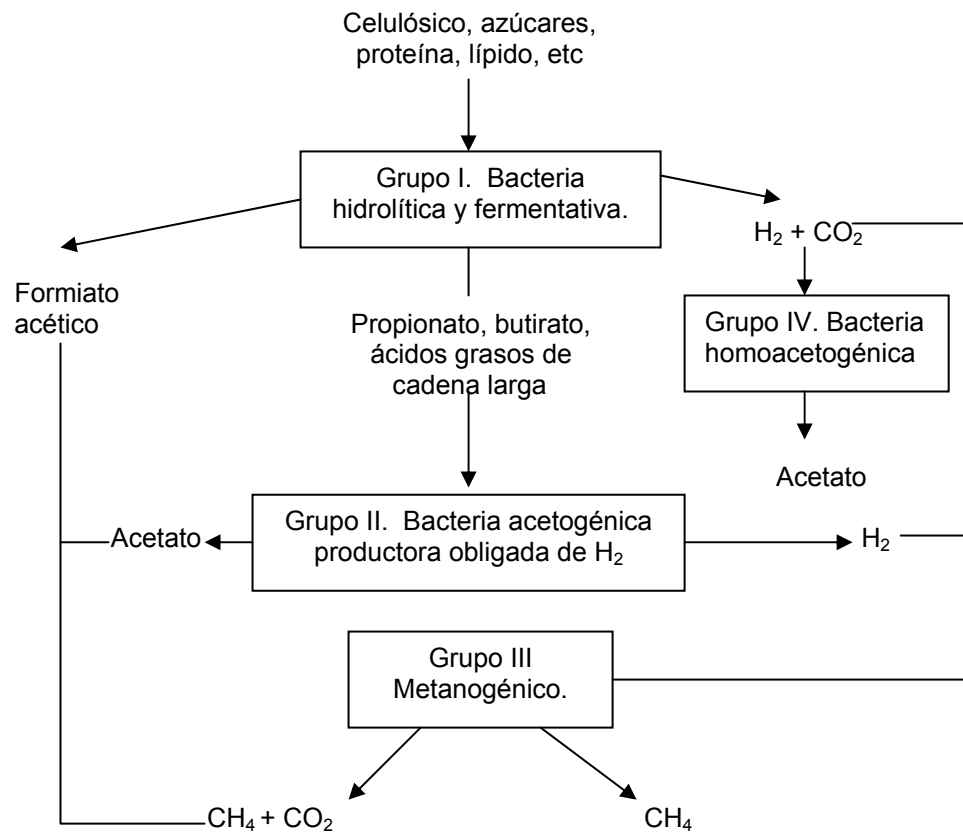


Figura 4. Esquema básico de digestión anaerobia.

- Bacterias acetogénicas obligadas de H₂. También nombrada como bacteria protono-reductora obligada. Entre las especies más comúnmente importantes está la *syntrophomonas nolfei* la cual oxida el butirato a acetato cuando crece conjuntamente con un metanógeno, y la *syntrophobacter nolilii* la cual degrada el propionato a acetato y H₂ sólo en co-cultivo con una sulfatoreductora, especie removedora de H₂. La degradación del propionato requiere una más baja presión parcial de H₂ que la de butirato, explicando el requerimiento de una sulfatoreductora en vez de una metanógena como compañera. La oxidación-β de ácidos grasos de larga cadena a acetato, también se debe a este tipo de metabolismo.

- Bacterias Metanogénicas. Las bacterias metanogénicas están entre los anaeróbios más estrictos que se conocen, y su cultivo ha requerido el desarrollo de técnicas capaces de mantener este ambiente estrictamente libre de oxígeno. Todas las especies podrían obtener energía por medio de la siguiente reacción.



Nueve especies podrían crecer convirtiendo el formiato a metano más CO₂ y solo tres (todas las especies *Methanosarcina barkeri*) podrían crecer en acetato, metanol y metilamina. Muchos estudios de flujo de carbono han mostrado que el porcentaje de metano surge del acetato, mediante la siguiente reacción.



1.5.1 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 16³.

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 (CO₂) 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.

1.6. 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.

³ WERNER, U; STOHR, U; HEES, N. Biogas plants in animal husbandry, GATE-GTZ, 1989, p.24

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 elevada⁴.

Tabla 4. Características de digestión anaerobia en residuos de animal.

Sustrato	Formación de escoria	Formación de sedimentación	Digestión	Tiempo de Retención Recomendada (días)	Producción de Gas Comparada al estiércol de ganado
Estiércol de ganado	ninguna	ninguna	Muy estable	60-80	100%
Estiércol de cerdo	Ligero o fuerte	Fuerte o ligero	Peligro de "caerse", ej., acidificación en el inicio.	40-60	200%
Estiércol de gallina	Ligero a fuerte	fuerte	Lenta, peligro de "caerse"	80	200%

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

⁴ Ibid..p.25

Tabla 5. Porcentaje de metano obtenido por digestión anaerobia a partir de residuos de animal.

Sustrato	Porcentaje de Metano
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 6. Producción de biogás a partir de estiércol de varios animales.

Tipo de Estiércol	Estiércol fresco (Kg.) producido al día	m ³ de biogás ^(b) por cada Kg. fresco
Ganado	10,00 ^(a)	0,06
Cerdo (50 kg)	02,25	0,078
Gallina (2 kg)	00,18	0,062

Fuente: Curso de biogás. www.geocities.com/institutoingefor/cursos/curso01/biogas.html

- (a) El dato se refiere a una estimación de la cantidad de estiércol que es posible recolectar, de todo el producido, cuando el ganado no está estabulado.
 (b) Este valor varía según el diseño utilizado. Los datos presentados son para un digestor tipo hindú.

Tabla 7. Proporción C/N de varios sustratos animal.

Sustrato	C/N
Orina	0,8
Estiércol de ganado	10-20
Estiércol de cerdo	9-13
Estiércol de aves de corral	9,3

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

2. SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS.

2.1. SISTEMA DE DEPURACIÓN DE CO₂.

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.

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 CO₂ 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.

Todos los procesos de absorción (física o química), como los de adsorción, necesitan complejas instalaciones y consumen gran cantidad de energía, pues tanto los solventes como los rellenos de las columnas empacadas deben ser regenerados.

Estos procesos se ejecutan a nivel industrial, por tanto son poco recomendables cuando se tratan flujos de biogás, producidos en pequeñas instalaciones de tratamientos anaeróbicos.

A partir de esto, y teniendo en cuenta que cualquier proceso utilizado para retirar el CO₂, implica elevados costos de operación y montaje, en este proyecto no se realizara la remoción del mismo, a pesar de que su presencia reduce el poder calorífico del biogás.

2.2 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL ACIDO SULFHÍDRICO

La dificultad de utilizar el biogás como combustible, es su contenido de ácido sulfhídrico (H₂S), 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 pocos los procesos 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.

2.2.1 Propiedades del ácido sulfhídrico

- Es extremadamente tóxico (casi tan tóxico como el Cianuro de Hidrógeno) y de 5 a 6 veces tan tóxico como el Monóxido de Carbono.
- Incoloro, de olor repulsivo, muchas veces descrito como el olor de huevos podridos, que se percibe a una baja concentración (0,05 hasta 500 ppm).
- Forma una mezcla explosiva con una concentración de entre 4,3 y 46 por ciento por volumen. Esto constituye una gama extremadamente amplia. La combustión espontánea se produce a los 260 °C (500 °F).
- Arde con una flama azul y produce Anhidro Sulfuroso (SO₂), el cual es menos tóxico que el Acido Sulfhídrico. Actúa de manera altamente corrosiva en los gases de escape, contamina el medio ambiente (lluvia acida).
- Es más pesado que el aire - su gravedad específica es de 1,189 (la del aire es = 1,000) a 15,56 °C y 101,325 KPa. Por lo tanto, el H₂S se acumula en puntos bajos tales como los sótanos de los pozos
- Es soluble tanto en agua (4 volúmenes de gas en 1 volumen de agua a 0°C) y en hidrocarburos líquidos. Produce irritación en los ojos, garganta y el sistema respiratorio.
- El Valor Límite de Concentración Mínima (TLV) es de máximo de ocho horas de exposición sin el equipo respiratorio de protección – 10 ppm.
- Es corrosivo a todos los metales de la serie electroquímica.

- Su punto de ebullición es de $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-79°F). Su punto de fusión es de $-116\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-177°F).

2.2.2 Efectos del ácido sulfhídrico sobre el ser humano. El efecto principal es la muerte por inhalación. El H_2S modifica el pigmento rojo de la sangre, la que cambia de color café hasta verde oliva. El transporte del oxígeno se dificulta, lo que lleva a una asfixia interna. Como síntoma se presenta la irritación de las mucosas (incluso de los ojos), náuseas, vómitos, disnea, y espasmos, así como parálisis respiratoria y paro cardíaco.

2.2.3 Origen del ácido sulfhídrico. La mayor parte de este gas que se encuentra en la atmósfera tiene un origen natural, se produce por descomposición de la materia orgánica, cerca de los lagos, en áreas con actividad geotérmica y pozos de gas natural.

La industria produce emisiones de este gas en procesos en los que participan compuestos de azufre y materia orgánica a altas temperaturas. Algunas actividades industriales que emiten este gas son: la fabricación de pasta de papel, el refinado del petróleo y la industria textil entre otros. Se le conoce también como hedor de mina, o gas de alcantarilla.

El origen del ácido sulfhídrico en las plantas de biogás, se debe a la transformación de proteínas sulfurosas. Estas provienen de materiales vegetales o de restos de forraje de animales. Al emplear excremento humano y estiércol de animal, sin embargo la principal fuente de proteínas la conforma la masa de bacterias excretada del intestino. Azufre orgánico, sobre todo en forma de sulfatos puede ser transformado en H_2S , por reacción bioquímica en el digestor.

El material vegetal produce poco H₂S en el biogás, en cambio el estiércol de gallinas, de reses y de cerdos genera un promedio hasta 0,5 y aproximadamente 0,3 % en volumen de H₂S respectivamente. Desperdicios ricos en proteínas (vinaza, melaza) pueden generar una cantidad considerable de H₂S (hasta un 3% en volumen). También el azufre inorgánico en forma de sulfatos (aguas altamente saladas para limpiar los establos y para diluir) contiene una gran cantidad de H₂S.

2.2.4 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 H₂S, permitidos para la utilización de biogás como combustible.

Tabla 8. Tecnologías de utilización del biogás y requisitos para su uso.

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

^a WELLINGER, A y LINBERG, A. Biogas upgrading utilization. International Energy Association, Paris, France; 2000, p.20.

^b Capstone turbine corp. (2002). www.microturbine.com/documents/specsheetlandfill.pdf

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

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_2S 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_2S y SO_2 : el H_2S tiene una acción corrosiva sobre las partes metálicas, el H_2S 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 son atacados. Los gases de escapes de los quemadores a gas, lámparas a gas y motores producen 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 200 a 250 horas de servicio. El 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.

2.2.5 Procesos de eliminación del ácido sulfhídrico 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; o 5) Condensación (Kohl y Neilsen 1997).

Los procesos de remoción de H_2S se dividen en base seca, base líquida, solvente físico, de membrana, alternativo, y procesos biológicos. Las características deseables para un sistema de purificación de gas incluyen bajo capital, bajos costos de operación, facilidad de funcionamiento y disposición de los medios, mínimo material y entrada de energía. A partir de esto y teniendo en cuenta la figura 5; 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.

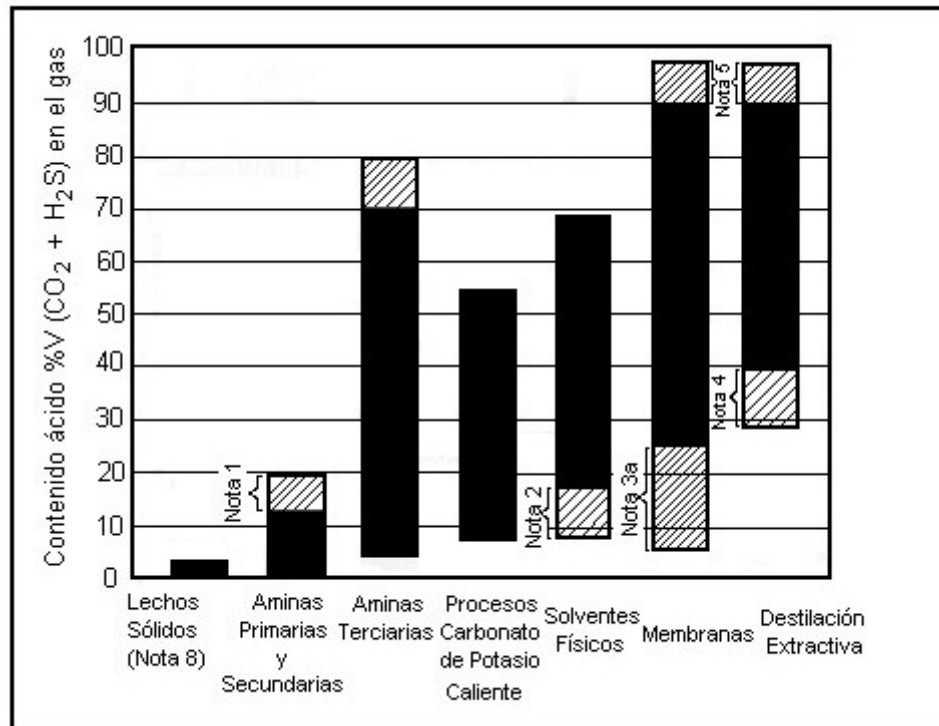


Figura 5. Opciones de Tratamiento para el Gas Natural¹⁵

Notas:

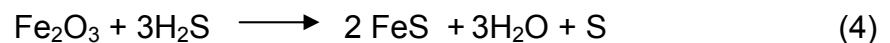
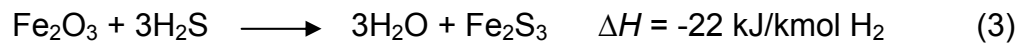
1. Aminas primarias y secundarias, puede ser económico para flujos de gas con un contenido de gas ácido mayor al 20% (H₂S + CO₂).
2. Solventes físicos, puede ser económico por debajo del 5-10% gas ácido (presión parcial 50 psi)
3. Las membranas pueden ser económicas por debajo del 8-12% de gas ácido o aun 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 CO₂ es económico cerca al 90% del CO₂ en el alimento.
6. Aminas terciario: MDEA (TEA y DMEA).
8. Los lechos sólidos (óxido férrico, óxido de cinc, Sulfatreat, etc.), normalmente son económicos para concentración menores al 1% gas ácido.

Procesos de adsorción en seco. Son medios secos en caja o vasos de tipo torre dónde el gas puede fluir ascendente o descendientemente a través de los medios. Este método, es la mejor opción cuando se busca

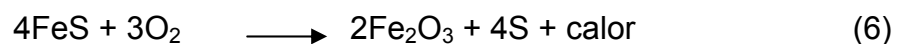
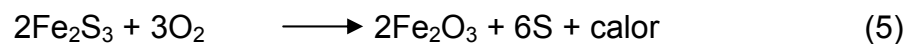
¹⁵ KOHL, A and NEILSEN, R. Gas Purification. Golf Publishing company. Houston. Texas, 1997.

instalaciones y mantenimientos económicos, con resultados de purificación satisfactorios.

2.2.5.1 Desulfuración a partir de masas ferrosas. Frecuentemente son utilizadas masas ferrosas, en forma de tierra natural y de ciertos minerales ferrosos. Las masas ferrosas deben contener el hierro en forma de óxidos, oxidatos o de hidróxidos. Estos reaccionan de la siguiente manera:



Como se observa en las ecuaciones anteriores, el óxido Férrico (Fe_2O_3) cuando reacciona con el H_2S , produce sulfuro férrico (FeS_3) y en algunos casos sulfuro ferroso (FeS) y azufre. Tanto el Fe_2S_3 como el FeS son muy inestables y en presencia del oxígeno reaccionan, de esta forma transforman nuevamente el hierro en óxido activado, llevándose a cabo las siguientes reacciones:



El proceso de formación de sulfuro férrico (FeS_3) y en algunos casos sulfuro ferroso (FeS) y azufre, se detiene naturalmente después de cierto

tiempo. La mayor parte del hierro se encuentra entonces en forma de sulfuro.

La masa purificadora puede, por lo tanto ser regenerada. Sin embargo la regeneración no es posible en forma ilimitada. Después de cierto tiempo la masa purificadora se encuentra cubierta de azufre elemental que obstruye los poros.

- **Masa purificadora.** Decisivo en una masa purificadora es su porcentaje de hierro, que en forma de óxido, debe corresponder por lo menos a un 40 o 50%. El porcentaje de “hierro activo” con respecto al contenido en hierro total debe ser, en lo posible, superior al 70 %. Como hierro activo se entiende aquí a óxidos de hierro con ciertas modificaciones de sus cristales, como por ejemplo, α -FeOOH, β -FeOOH. Algunos materiales técnicos ferrosos como pirita tostada, escorias y similares no reaccionan con el H_2S , a pesar de tener una composición química parecida.

En la naturaleza existen tierras ferrosas con propiedades adecuadas para ser utilizadas como masa purificadora. Se trata en especial de tierras de alto contenido ferrico: $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ o bien $FeO(OH)$. Estas tierras se conocen bajo los nombres de hematites parda o limonita. Se presenta en diferentes subespecies:

- Goethita (hierro acicular): α -FeO(OH)
- Lepidocroita (micra rubi) : β -FeO(OH)
- Limonita (aparentemente) amorfa.

- **Requisitos de la masa purificadora¹⁶:** La masa purificadora debe cumplir ciertas condiciones para obtener un buen efecto en el purificador.

- **Peso específico aparente:** la masa no debe ser muy compacta, debe tener una cierta porosidad, si es demasiado fina se interrumpe el flujo de gas. La pérdida de presión en la carga o en el purificador es demasiado elevada. En casos extremos se podría obstruir el purificador.

- **Molienda, trituración:** la masa ferrosa, que se presenta en forma de tierra o en grandes trozos debe ser triturado y molida. La trituración hace aumentar la superficie de contacto (importante para la reacción química) y tiene una influencia positiva sobre la estructura cristalina de la masa. El tamaño de los granos deberá ser de 2 a 5 mm

- **Material de relleno:** para obtener la porosidad deseada se debe mezclar la masa ferrosa con un material de relleno. Para esto se utilizan sustancias orgánicas que esponjan la estructura de la masa y además son capaces de aglutinar cierta cantidad de agua en la masa purificadora preparada. Como material de relleno se puede utilizar: viruta fina de madera o aserrín, paja molida, tamo, turba fina, harina de fibra de coco u otros materiales similares. Se mezcla aproximadamente un 10 a un 15 % de material de relleno a la masa ferrosa. Se debe agregar agua, de modo que la masa preparada tenga finalmente un contenido de humedad entre el 20 y 30%.

¹⁶ MUCHE H and ZIMMERMANN, H. La purificación del biogás. GATE-GTZ, 1984, p.17-18.

- **Peso específico aparente:** el peso aparente específico, considerado como medida de porosidad, debe ser de alrededor de 0,7 a 0,8 kg/l.

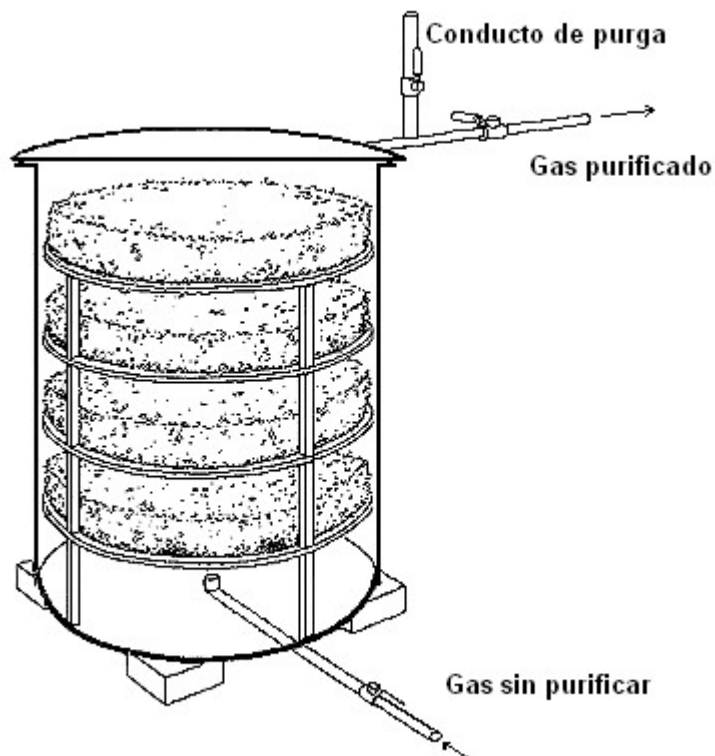
- **Valor pH:** el pH de la masa preparada debería ser por lo menos de 5; una reacción ligeramente alcalina es aún preferible. El pH puede ser ajustado con sosa o con potasa. Para tal efecto se debe agregar de un 2 a un 4% de esta sustancia a la masa purificadora.

Para evitar que la masa purificadora se seque, la temperatura del gas en el interior del purificador debe variar lo menos posible. Si es necesario el desulfurador debe ser aislado térmicamente, las temperaturas más favorables para las reacciones químicas que tienen lugar en el desulfurador están entre 15 a 20°C.

- **Diseño y manejo del desulfuración.** El equipo de purificación consiste en un cajón o en un tonel. En su interior se encuentra la masa purificadora ya preparada. Esta es depositada sobre varias planchas perforadas. Esto es necesario para que las capas de masa purificadora no sobrepasen un espesor de 20 a 30 cm. De lo contrario, la masa se comprimirá con suma facilidad, lo que hará aumentar la resistencia al paso del gas¹⁷.

¹⁷ Ibid.. p. 30

Figura 6. Purificador de biogás



El biogás entra en el cilindro, fluye a través de la masa a una velocidad máxima de 0,005 m/s y abandona el purificador por la parte superior ya liberado de H_2S ; cuando al cabo de un tiempo la masa esta sulfurada, el gas que abandona el purificador contiene cantidades crecientes de H_2S .

El purificador es abierto entonces en la parte superior y las planchas perforadas con la masa usada son retiradas de su interior, para ser regenerada colocándola en contacto con el oxígeno. El proceso de regeneración y reutilización de la masa puede repetirse hasta 10 veces aproximadamente, después de ello la masa purificadora queda deteriorada.

Comercialmente existen algunos procesos de remoción de secos que se usan para el endulzamiento de los gases agrios. El producto de óxido de

hierro más conocido se llama “esponja férrica”; aunque propietarios de medios de óxido de hierro como SulfaTreat®, Azufre-Rite®, y Medios-G2® han ofrecido alternativas para la esponja férrica.

- **Esponja de hierro (Iron Sponge).** Este proceso utiliza viruta de madera impregnada con una forma hidratada de óxido de hierro (Fe_2O_3) con estructuras cristalinas gamma y alfa. El rango óptimo de velocidad lineal se reporta como 0,6 - 3 m^3/min y la temperatura debe mantenerse entre 18 °C y 46 °C.

La esponja férrica puede operarse en la modalidad por lote con regeneración separada, o con un flujo pequeño de aire en el flujo de gas para regeneración continua. En la modalidad por lote, la experiencia operacional indica que solamente el 85% (0,56 kg H_2S / kg Fe_2O_3) de la eficacia teórica puede lograrse (Taylor 1956). La esponja férrica gastada puede regenerarse en sitio por recirculación del gas en la vasija ajustando en un 8% la concentración de O_2 y manteniendo una velocidad de 0,3-0,6 $\text{m}^3/\text{m}^3\text{lecho}/\text{min}$ (Taylor 1956). Alternativamente, la esponja puede retirarse, extenderse afuera en una capa de 0,15 m espesor, conservándose humedecida durante 10 días. Ratas de remoción del 2,5 kg $\text{H}_2\text{S}/\text{kg}$ Fe_2O_3 se han informado en el modo continuo de regeneración¹⁸.

- **SulfaTreat®.** Consiste principalmente en compuestos de Fe_2O_3 o Fe_3O_4 cubiertos sobre un soporte granular y comercializados por la Compañía SulfaTreat® de St. Louis, MO. SulfaTreat®; se usa similarmente a la esponja de hierro en un vasija de baja presión con un

¹⁸ ANEROUSIS, J. P. AND S. K. WHITMAN. "Iron Sponge: Still a Top Option for Sour Gas Sweetening." Oil and Gas Journal February 18, 1985: 71-76.

flujo de gas semejantemente y es más eficiente con flujos de gas hidratados¹⁹.

La eficiencia de remoción en los sistemas comerciales está en un rango de 0,55 – 0,72 kg H₂S/kg óxido férrico, similar o ligeramente superior que los valores reportados para la operación en lote para la esponja férrica (Kohl y Neilsen 1997). El tamaño de partículas van de malla 4 a 30 con una densidad a granel de 1120 kg/m³, y un costo aproximado de US\$0,88/kg (Taphorn 2000). Debido a su estructura uniforme y naturaleza fluida, SulfaTreat® es más fácil de manejar que la esponja férrica, reduciendo costos de operación, mano de obra para su cambio, y caídas de presión en el lecho.

- **Sulfur-Rite®**. Es un producto de óxido de hierro en base seca ofrecido por GTP-Merichem. Los sistemas Sulfur-Rite® vienen preempaquetados en unidades cilíndricas, se recomiendan en instalaciones con menos de 180 kg sulfuro/día en el gas y flujos por debajo de 4200 m³/h. La literatura de la compañía afirma que el producto tiene 3 - 5 veces la efectividad de la esponja férrica²⁰.

- **Medio-G2®**. Es originalmente una tecnología de adsorción en base de óxido de hierro desarrollada por ADI International, Inc., para remover el arsénico del agua potable. Recientemente ADI ha empezado a probar el Medio-G2® para remoción de H₂S de los efluentes de gas con resultados prometedores²¹.

¹⁹ TAPHORN, D. SulfaTreat-410HP Estimated Performance Sheet quoted for S. Zicari. SulfaTreat, St. Louis, MO.

²⁰ MCKINSEY ZICARI, STEVEN. Renoval of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. Cornell University, January 2003, p: 20.

²¹ Ibid.. p: 21

Modelos a escalas laboratorio y piloto indican posibles tratamientos hasta 30,000 ppm de H₂S, y el producto gastado no es peligroso. Medio-G2® puede remover hasta 560 mg de H₂S/g sólido. Esto se logra regenerando la matriz con aire hasta 15 veces. Cada ciclo de adsorción retira aproximadamente 35 - 40 mg H₂S/g medio. Un diseño del sistema en dos vasijas (paralelo) se recomienda para el funcionamiento continuo, estimando ciclo de 8 horas de regeneración para una escala completa. Se estiman costos del producto aproximados de US \$1060/m³.

2.3 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 se regenerado.

3. GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EN MOTORES DIESEL

3.1 UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

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 acpm²² (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.

3.1.1 Teoría esencial motores de combustión interna. Un motor de combustión interna, es cualquier máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Todos los motores de combustión interna se clasifican en dos tipos

²² Utilización del Biogás para generación de electricidad. www.cipav.gov.co

principales: de cuatro y dos tiempos. Un motor se llama de cuatro tiempos cuando tiene lugar la combustión cada cuatro carreras consecutivas, es decir, cada dos vueltas del eje cigüeñal. Los motores de combustión interna más usados a través de la historia han sido el motor Otto o motor de gasolina y el motor diesel.

3.1.2 Teoría esencial en motores diesel. El motor diesel, llamado también motor de ignición por compresión recibe su nombre por el doctor Rudolf Diesel quién patentó un motor del tipo de ignición por compresión en Alemania en 1893.

En el motor de gasolina el combustible entra a los cilindros como una mezcla de aire y combustible y la inflamación o ignición de la mezcla se produce por una chispa eléctrica en las bujías. En el caso del diesel, el combustible se inyecta en el cilindro en forma de chorro de rocío atomizado y la ignición ocurre debido a la elevada temperatura del aire que hay dentro del cilindro en el cual se inyecta el combustible.

El motor diesel succiona aire a las condiciones ambientales comprimiéndolo en la cámara de combustión y lo comprime a una presión de alrededor de 6000 KPa, por encima de lo cual el aire alcanza temperatura alrededor de 600 °C. Poco antes de que el pistón alcance el PMS (Punto muerto superior), el combustible se inyecta y enciende inmediatamente a estas condiciones.

Los motores de combustión interna diesel de cuatro tiempos funcionan con cuatro carreras de los pistones: admisión de aire, compresión, potencia y escape, los cuales se ilustran en la figura 7. Las válvulas de admisión y de escape se abren y cierran en momentos exactos en relación con el pistón. El árbol de levas, impulsado desde el cigüeñal abre y cierra las válvulas.

Por razón de sencillez, en los siguientes párrafos se considerará que las válvulas abren o cierran en PMS (punto muerto superior), límite superior o sea la parte más alta de la carrera del pistón y PMI (punto muerto inferior), límite inferior de la carrera. En realidad, no están sincronizadas para abrir y cerrar en esos puntos exactos sino que abren antes o después de PMS o PMI para permitir la entrada de aire del exterior al cilindro y para el escape de los gases de combustión con la mayor eficacia posible.

En la figura 7 se ilustra la secuencia de los cuatro tiempos de un motor de combustión interna, el cual es descrito como sigue:

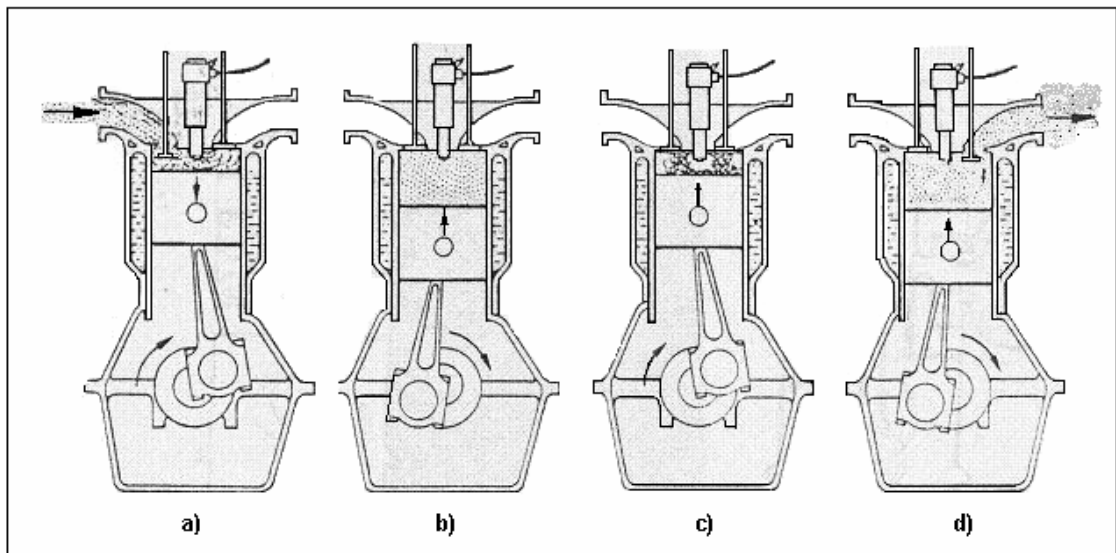


Figura 7. Esquema de funcionamiento de un motor de cuatro tiempos

a) Admisión de aire (carrera descendente). En la carrera de admisión de aire, la válvula de admisión está abierta y el pistón se mueve hacia abajo. El aire entra al cilindro por el orificio de la válvula de admisión. En PMI el cilindro está lleno de aire.

b) Compresión (carrera ascendente). Después de que el pistón llega al PMI empieza a moverse hacia arriba. Cuando ocurre esto, se cierra la válvula de admisión. La válvula de escape también está cerrada con lo cual el cilindro está hermético. Cuando el cigüeñal en rotación y la biela empujan el pistón hacia arriba, se comprime el aire. Para el momento en que el pistón llega al PMS, el aire ha sido comprimido a alrededor de 1/16 parte de su volumen original o quizás más todavía. La compresión del aire en el cilindro no sólo le aumenta su presión sino también su temperatura. El aire que hay en el pequeño espacio encima del pistón o sea la cámara de combustión, está lo bastante caliente para inflamar el combustible Diesel que se inyectará en él.

c) Potencia (carrera descendente). Justo antes del PMS se atomiza una pequeña cantidad de combustible desde el inyector hacia la cámara de combustión en el cilindro. El aire caliente en la cámara no sólo forma una mezcla combustible con la atomización, sino que además la inflama. La combustión o el quemado ocurren con rapidez y aumenta la presión dentro del cilindro. Los gases calientes hacen presión contra el cilindro y el pistón, y proporcionan la fuerza que obliga al pistón a bajar en el cilindro. Este movimiento se transfiere por medio de la biela al cigüeñal para hacerlo girar y que funcione el motor. Las dos válvulas permanecen cerradas durante la carrera de potencia, pero casi al final de ella se abre la válvula de escape.

d) Escape (carrera ascendente). Con la válvula de escape abierta y la válvula de admisión cerrada, el pistón se mueve hacia arriba en la carrera de escape para expulsar los gases quemados del cilindro por el orificio de la válvula de escape. Cuando el pistón llega al PMS, se cierra la válvula de escape.

Con esto concluyen los cuatro tiempos o carreras del ciclo. Cuando el motor sigue su marcha se vuelve a abrir la válvula de admisión, lo cual permite la entrada de aire exterior al cilindro cuando el pistón inicia la carrera descendente para volver a empezar el ciclo.

Comparación de los motores de gasolina y diesel. A continuación se presentan algunas comparaciones y diferencias generales entre los motores de gasolina y Diesel.

Tabla 9. Característica de operación de los motores diesel y Otto²³

Característica	Motor diesel	Motor Otto
Relación de compresión	15 – 21	6–9,5 (gasolina) 6– 12 (alcohol)
Presión después de la compresión sin ignición [bares]	35 – 60	15 – 20
Temperatura después de la compresión sin ignición [°C]	600 – 900	400 - 600
Relación de aire en exceso λ	1,3 – 4	0,7 – 1,2
Eficiencia	0,3 – 0,4	0,2 – 0,35
Consumo específico de combustible [kg/kw-h]	0,23 – 0,35	0,3 – 0,4
Eficiencia volumétrica	0,7 – 0,9	0,3 – 0,9
Temperatura gases de escape [°C]	400 - 600	500 - 700
Velocidades [rpm]		
- estacionarios	1300 – 2500	1300-2500 (gas)
- vehículos	1300 – 5000	1300 – 7000

²³ MITZLAFF, Klaus von. Engines for biogas. GATE-GTZ, Alemania, 1988, p. 124

3.2 ADECUACIÓN DEL MOTOR DIESEL A UN SISTEMA DE COMBUSTIBLE DUAL

Como fue descrito en la sección 3.1.2, 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 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 solamente²⁴. Esto dependerá del funcionamiento y parámetros de diseño del motor.

El funcionamiento del motor a carga parcial requiere una reducción del suministro de gas por medio de una válvula de control de gas. La válvula puede operarse manual o automáticamente, usando un sistema mecánico o electrónico.

²⁴ Ibid..p.33

La relación de mezcla aire/combustible succionada variaría mediante el suministro de biogás al motor pero incluso una mezcla muy pobre ($\lambda = 4,0$) enciende con muchas y bien distribuidas gotas de rocío del combustible diesel inyectado.

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 pueden 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. En el funcionamiento con biogás limpio, es decir 95 - 98% de CH₄, las temperaturas de combustión son más altas que las alcanzadas cuando el biogás no es tratado, por lo tanto la substitución 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 dual²⁵.

3.2.1 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%.

²⁵ Ibid.. p. 34

El ducto de entrada y contenedor del motor diesel son dimensionados de tal manera que para una máxima velocidad y potencia de salida el motor pueda succionar suficiente aire con el objeto de obtener una relación de aire/combustible óptimo para el funcionamiento, es decir una relación de aire en exceso en un rango de $\lambda = 1,2 - 1,3$. Cuando el combustible diesel es reducido y una mezcla del aire/gas se succiona en cambio de aire solamente, parte del aire es desplazado por el gas. Con menos aire alimentado al motor y una relación de aire en exceso mantenida en $\lambda = 1,2 - 1,3$; el combustible total de entrada (diesel y gas de combustible en kJ/s) será menor que el combustible entrado en el funcionamiento con diesel.

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 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 revelante 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.

3.2.2 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.

3.2.2.1 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 8). 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.

La corriente de aire dentro de la cámara de mezcla no se controla; puede ser sin embargo necesario estrangular ligeramente la corriente de aire antes de que entre en la cámara de mezcla o zona de mezcla, para

proporcionar una ligera depresión. La depresión puede necesitarse en casos dónde el gas se proporciona a bajas presiones, causando de esta forma una caída de presión necesaria para la succión del gas combustible. La posición de la depresión en el estrangulador permanecerá inalterada durante la operación. En la mayoría de los casos la depresión creada por el filtro de aire mantiene suficiente succión de gas. Sin embargo, cualquier depresión adicional disminuye el rendimiento.

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 succión²⁶. El flujo de biogás debe ser controlado por una válvula a la entrada de la cámara de mezclado para evitar la sobreoferta de este.

Las cámaras de mezclado con volúmenes más grandes (figura 9) que simplemente una tubería con unión T, proporcionan un tiempo de retención mayor y una mezcla más homogénea del aire y biogás dentro de la cámara; esto es esencial cuando la distancia entre el dispositivo de mezclado y la entrada del colector es corta, proporcionando de esta forma un tiempo de mezclado. En los casos donde el filtro de aire es de tipo aceite, la conexión de la tubería de suministro de biogás en la cámara de succión del filtro puede ser utilizada como una cámara de mezclado simple (figura 10).

²⁶ Ibid.. p. 35

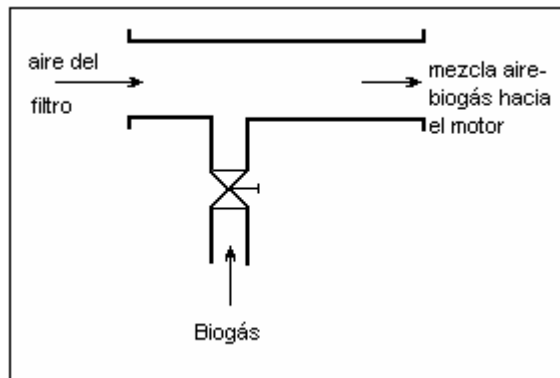


Figura 8. Mezclador en unión T.

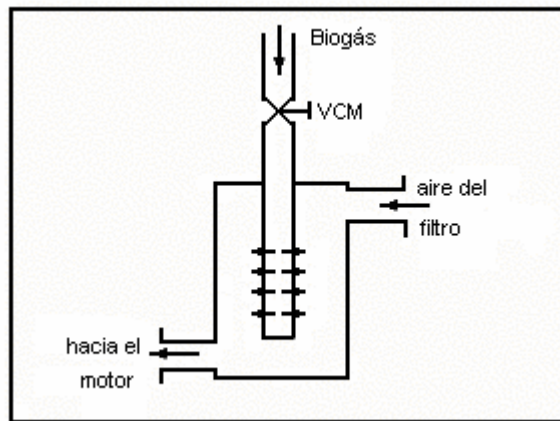


Figura 9. Cámara de mezclado simple con válvula de control manual (VCM).

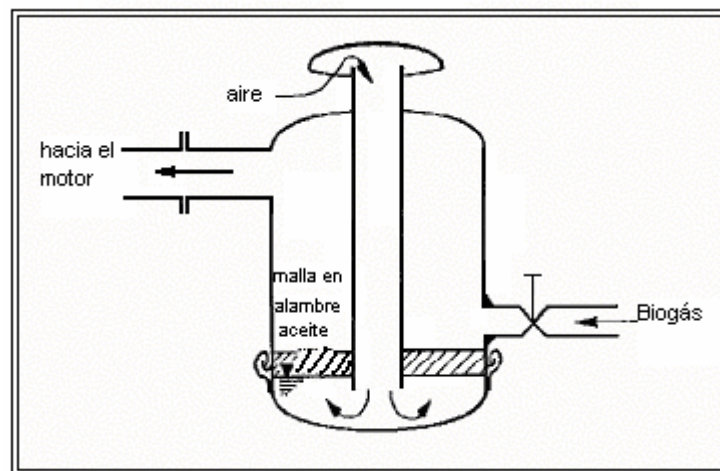


Figura 10. Filtro de aire tipo aceite modificado como una cámara de mezclado.

Una cámara de mezclado como la descrita en la figura 10, proporcionará una mezcla individual de aire/combustible según su diseño y/o graduación de la válvula de gas. Una vez se pone a punto, el motor operará a una velocidad y potencia de salida constante con tal de que la demanda de potencia no sea variada. A carga más alta y por ende velocidades bajas, la succión del motor succionará menos aire mientras el flujo de gas de combustible permanece casi constante. Como resultado, la relación aire/combustible cambiará y la mezcla se hará más rica. Si el motor encuentra un nuevo equilibrio a una velocidad más baja que la máquina pueda tolerar, el funcionamiento puede continuar sin ajustes tanto como la relación de exceso de aire permita más combustible. El gobernador, a menos que se bloquee, también aumentará la cantidad de combustible de diesel inyectado, para mantener la velocidad anterior. Para ahorrar este consumo de combustible diesel adicional, el control del flujo de gas debe ajustarse por consiguiente cuando el motor se opera a condiciones diferentes.

- **Conexión al motor y filtro de aire.** Los filtros de aire están en la mayoría de los casos directamente conectados a la entrada del colector del motor; en algunos casos estos están aislados

El diseño y dimensiones de la entrada y salida de la cámara de mezclado necesitan empatar respectivamente con el filtro de aire y entrada al colector. Los mezcladores tipo tubo deben tener diámetros iguales o mayores al de la entrada al colector. En caso de un diámetro más grande un adaptador en reducción es necesario con un máximo ángulo de reducción de 10° para asegurar el flujo uniforme sin estancamientos. Los tubos de mezclado con un diámetro más pequeño que el colector no deben usarse ya que ellos causan restricciones de flujo innecesarias y reducción de potencia a velocidades más altas.

- **Tubo o Boquilla de Entrada de gas.** La dimensión de la boquilla de entrada de gas depende principalmente de:

- Energía de combustible requerida por el motor para una máxima potencia y velocidad.

- Valor calorífico del biogás (por volumen) bajo las condiciones reales de temperatura, presión y su composición (% CH₄).

Se recomienda que se dimensione el área de la sección en cruz de la boquilla de tal manera que suficiente biogás puede proporcionarse al motor incluso a condiciones "desfavorables", es decir valor mínimo de poder calorífico del biogás, presión de gas mínima, resistencia de flujo considerable; un sobredimensionamiento del 10% en el diámetro de la boquilla del gas es aceptable. Sin embargo, una sobreoferta de biogás puede prevenirse fácilmente con una válvula de control o calibración la cual después de todo actúa como una resistencia adicional en el sistema de tubería reduciendo la diferencia de presión activa en la boquilla, es decir la velocidad de flujo y suministro de gas.

En casos donde el suministro de biogás sea demasiado alto o la válvula del control permanezca totalmente abierta, un orificio fijo adicional o estrangulamiento ajustable puede instalarse en la tubería de gas para limitar el flujo máximo de gas y prevenir el funcionamiento con una sobreoferta de gas en la válvula de control en la posición totalmente abierta. Una válvula neumática de regulación de presión bien ajustada puede servir para el mismo propósito.

Los siguientes parámetros servirán como guía para el dimensionamiento de la boquilla de gas³⁴:

- Diferencia de presión activa [Δp] = 2 kPa (20 centímetros H₂O).
- Velocidad máxima de flujo de gas en tubería desde la planta al motor = 2 m/s.
- Velocidad de gas en la boquilla [cg] = 20 m/s.
- Valor calorífico volumétrico de biogás [Hu,vol] = 17000 kJ/m³.
- Consumo de combustible específico por el motor [sfc]= 0,8 m³/kw-h.

La forma de la boquilla y la manera como ésta es conectada o introducida en el dispositivo de mezclado es importante para una buena mezcla de aire y gas. Los siguientes métodos pueden utilizarse:

- **Simple unión en T:** Un extremo de la tubería del gas se une sin sobresalir en el dispositivo mezclador, efectuando solamente un pequeño cambio en la caída de presión activa y por ende una succión del motor más alta. La distancia mínima de la entrada del gas al colector del motor que debe ser observada para todo tipo de mezclador en unión T debe ser dos veces el diámetro del colector del motor (figura 8).
- **Unión en T con la tubería de gas saliente en el dispositivo de mezclado:** La boquilla de gas es de corte oblicuo (30 - 45°) con la apertura enfrente a la entrada del motor (figura 11). La tubería de gas ligeramente salida reduce el área de sección en cruz para el flujo de aire y causa una ligera depresión, aumentando la caída de presión activa dentro del dispositivo mezclador. La caída de presión eleva la succión del motor (la velocidad del motor), y también succiona más gas. La función es algo similar a la función de un inyector venturi. El desempeño del mezclado es superior a una unión en T aplanada.

³⁴ Ibid..p. 40

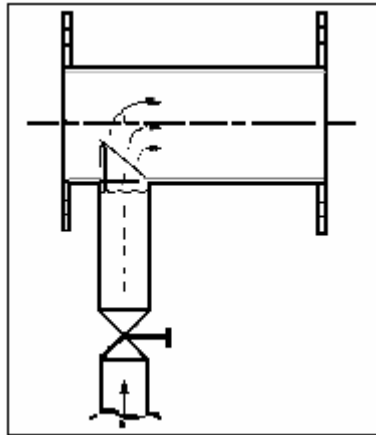


Figura 11. Mezclador en unión T con corte oblicuo.

- **Cámaras de mezclado con volúmenes más grandes:** Estas proporcionan mayor tiempo para el mezclado a velocidades de flujo relativamente bajas. Sin embargo, es ventajoso para el mezclado si la tubería de gas sobresale en la cámara y distribuye el gas a través de varios orificios. Los flujos también pueden mezclarse con dos o tres capas de malla de alambre (aproximadamente 1 cm³ apertura en la malla) a una distancia corta (aproximadamente 5 mm) de la tubería del gas (figura 12).

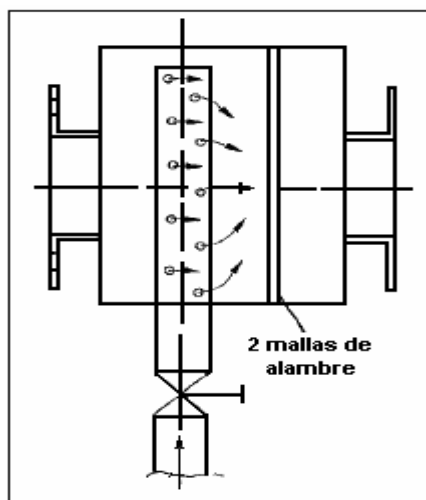


Figura 12. Cámara de mezclado con tubería de distribución de gas y malla en alambre para un mayor mezclado.

4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA.

Para evaluar el estudio técnico del proyecto se efectuaron una serie de pruebas piloto para determinar las variables operacionales de la planta diesel en el sistema de combustible dual tales como: nivel de reemplazo de acpm por biogás, m³ de biogás/kw-h de generación y eficiencia térmica

El desarrollo de las pruebas se llevó a cabo en la Granja Porcícola Porkys, localizada en la Finca los Santos vereda Navarra, municipio de Piedecuesta (Santander), ubicada a 1350 metros sobre el nivel del mar y una temperatura promedio de 27°C.

4.1 METODOLOGÍA DESARROLLADA.

4.1.1 Determinación de los parámetros de operación de los biodigestores. Se ubicaron todos los ductos de alimentación para los biodigestores provenientes de las diferentes áreas de la finca. Se calculó para cada uno, el volumen [m³], el caudal [m³/h], el tiempo de retención [días] y el pH del vertimiento.

4.1.2 Adecuación del sitio para el desarrollo de las pruebas. A partir de las visitas de campo realizadas a la granja, se fijó el sitio donde se ubicaría la planta diesel para la realización de las pruebas piloto, teniendo en cuenta que fuera un lugar amplio, cubierto y alejado de los biodigestor para evitar posible peligros de explosión.

4.1.3 Caracterización del biogás producido en la granja Porkys. Se registraron mediciones de velocidades de flujo en [m/s] para el biogás, tomando intervalos de tiempo aproximadamente de 2 horas durante un día para un total de 5 monitoreos. El ducto de salida de biogás tiene un diámetro de 1 ¼". Se realizaron mediciones de la composición en volumen y en base seca del biogás cada 5 minutos obteniéndose un total de cinco reportes para su caracterización.

4.1.4 Purificación del Biogás. El biogás procedente de los biodigestores se hizo pasar por un desulfurador. La caída de presión fue medida por medio de dos tubos en U [cm de H₂O], ubicados a la entrada y salida de este. El biogás fue caracterizado a la salida del desulfurador con el objeto de determinar el porcentaje de remoción de H₂S. Posteriormente el biogás es conducido hacia el lugar donde se desarrollaron las pruebas con la planta eléctrica. El biogás es transportado desde la salida del desulfurador, para ser secado, hacia un lecho de silica gel por medio de una tubería de PVC de 1,5 pulgadas.

4.1.5 Prueba con la planta diesel utilizando solo acpm. La planta fue alimentada solo con acpm. Se arrancó sin carga, dejando que se estabilizara durante tres minutos. Se alimentó la carga al generador inicialmente con 1500 W, se realizaron mediciones de consumo de acpm (mm de acpm desplazado), velocidad del motor [rpm], voltaje [voltios], corriente [amperios] cada 5 minutos, durante los 15 minutos de duración de la prueba. Este procedimiento se repitió para 3000 y 4500 W respectivamente.

4.1.6 Alimentación del biogás a la planta diesel. Para alimentar la planta diesel con biogás fue necesario modificar la planta a un sistema de

combustible dual. El consumo de biogás se controló manipulando una válvula de bola ubicada después del secador.

4.1.7 Prueba de la planta diesel utilizando combustible dual (biogás - acpm).

- Se arrancó la planta utilizando solo combustible diesel, sin carga.
- La planta se dejó durante 3 minutos en funcionamiento normal.
- Se alimentó la carga al generador inicialmente con 1500 W (sólo diesel).
- Se midió el voltaje [voltios] y la corriente [amperios] con el fin de determinar una potencia constante.
- Una vez estable la planta de generación (potencia constante), se alimentó la unidad con biogás, manipulando la válvula de bola hasta fijar una caída de presión diferencial constante [cm de H₂O] determinada por una platina de orificio. Logrando un funcionamiento normal de la planta para esta presión diferencial fija, se midió el consumo de combustible, el flujo de biogás, voltaje y corriente durante 15 minutos en intervalos de cinco minutos. Posteriormente se fijaron otras caídas de presión para la misma carga y se midieron, en las mismas condiciones, los parámetros anteriormente nombrados.
- El procedimiento anterior se realizó nuevamente para cada una de las cargas: 3000 y 4500 W.

4.1.8 Caracterización de los gases de escape. La composición y temperatura de los gases de escape se midieron para cada una de las pruebas (planta solo diesel y planta combustible dual).

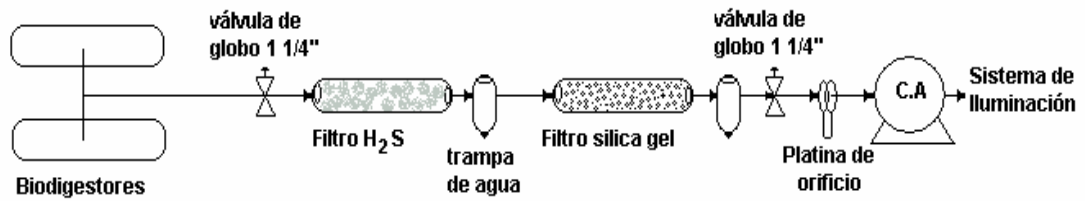


Figura 13. Esquema implementado para el uso de biogás en la planta diesel para generación eléctrica.

4.2 EQUIPOS UTILIZADOS.

4.2.1 Equipo medidor de pH. Se utilizó un pH meter marca TOLEDO modelo MP-120.



Figura 14. Equipo pH meter Toledo.

4.2.2 Equipo para medir la velocidad de flujo del biogás. Se utilizó un medidor de velocidad de flujo **ANEMÓMETRO TESTO-STRASSE 1 D-79853**, con sonda para salida de ducto No 044. Con su respectiva hélice. La unidad para expresar la velocidad de flujo para el biogás fue de m/s.

4.2.3 Equipo para la medición de composición del biogás. Se utilizó un equipo portátil analizador de gases, **BIOGAS ANALYZER, BACHARACH**, modelo GA94A/1, serial # G3389. El equipo detecta los siguientes gases: CH₄, O₂, CO₂. El CH₄ y el CO₂ son determinados por una celda infrarroja que realiza una lectura a una longitud de onda dual y el O₂ mediante una celda electroquímica. Los límites de detección del equipo para estos gases son de 0 – 100%, 0 – 50 % y 0 – 21 % respectivamente. Este reporta los valores en porcentaje (%v/v) en base seca, con un intervalo de temperatura del gas de entrada entre 0 – 40 °C. El equipo cuenta con un filtro que evita el paso de material particulado. Este equipo se le adecuó un accesorio llamado Gas Pod, para determinar la concentración en ppm de H₂S. El rango de detección está entre 0 – 50 ppm.



Figura 15. Equipo Bacharach y gas Pod para H₂S.

4.2.4 Equipo para la medición de los gases de escape. Se utilizó un equipo analizador de emisiones de gases **HORIBA MEXA – SERIE 554J**, el cual utiliza una tecnología norma, BAR 97. Este equipo mide los siguientes gases: CO (0 – 10 % volumen), HC (0 -10000 ppm), CO₂ (0 – 20 %volumen) y O₂ (0-25 %volumen). Este equipo trabaja a condiciones ambientales para un rango de temperatura de 0 – 40 °C y un humedad del 90% o menos. La composición de hidrocarburos (HC) es expresada con respecto al gas propano.



Figura 16. Equipo HORIBA.

4.2.5 Equipo para la medición de variable operacionales de la planta.

Para la medición de la corriente y voltaje se utilizó un Voltiamperímetro, marca WAVETEK METERÍAN modelo AC38; límite de detección: corriente (0,1-400) y voltaje (0,1-750). Para la medición de la velocidad del motor se usó un tacómetro fotoeléctrico digital marca NUTAC, límite de detección (0-9000 rpm).

4.2.6 Filtro para la captación de Sulfuro de Hidrógeno. Por seguridad el biogás efluente de los biodigestores se hizo pasar por un desulfurador. Este filtro consiste en un cilindro de 0,6 m de ancho por 1 m de alto. En su interior posee una masa ferrosa purificadora distribuida en 3 placas, cada una de estas separadas a una altura de 0,22 m, de lo cuales 0,18 m son ocupados por la masa ferrosa. La masa ferrosa utilizada posee una densidad aparente de 0,83 [kg/m³] con una composición en porcentaje en peso de 55% magnetita, 15% aserrín y 30% de agua. La magnetita fue sometida a un proceso de trituración para obtener granos de 2 - 5 mm.

4.2.7 Dispositivo de Secado. El Filtro utilizado para la adsorción de agua consiste en una manguera de 1,5 in de diámetro por 1m de largo el cual contiene en su interior un lecho de silica gel de 0,8 m de longitud; agente higroscópico usado para la eliminación de humedad presente en el gas.



Figura 17. Dispositivo de secado.

4.2.8 Medidor de gas. El dispositivo utilizado para la medición de flujo de gas fue una platina de orificio, la cual consiste en una placa perforada que se instala en la tubería produciendo una contracción en el tubo que produce una diferencia de presión. La platina fue previamente calibrada obteniendo un coeficiente de gasto $C_v = 0,028$.

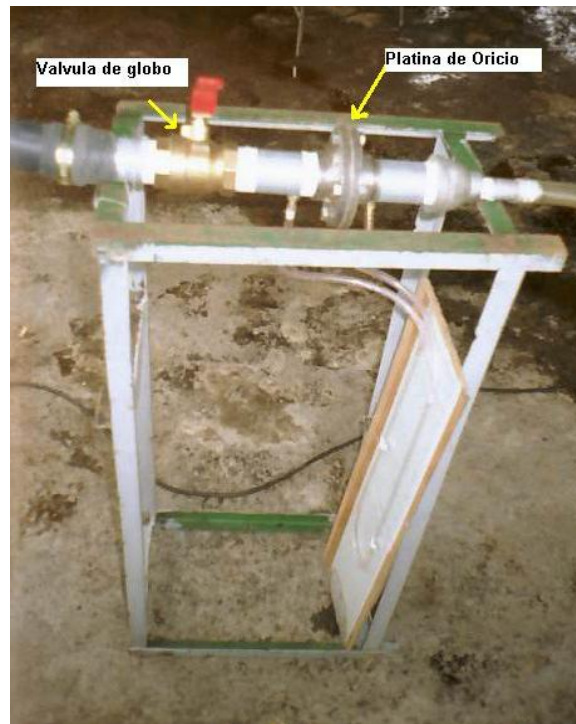


Figura 18. Platina de Orificio conectada a la válvula de bola.

4.2.9 Planta modificada al sistema combustible dual. Se utilizó una Planta Eléctrica Diesel de cuatro tiempos marca YANMAR serie L100AE la cual tiene las siguientes especificaciones:

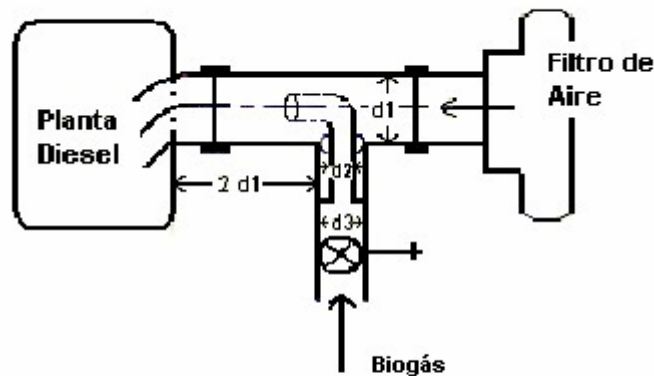
Tabla 10. Especificaciones de la Planta Diesel YANMAR.

Característica	Valor
Potencia valorada	5,8 KW
Tensión de Salida	120/240 Voltios
Velocidad	3600 rpm
Fases	Monofásica
Desplazamiento cilindrada	24,8 in ³
Diámetro de colector	0,04 m



Figura 19. Planta Modificada al sistema dual.

4.2.9.1 Dispositivo mezclador aire-biogás. Se seleccionó y diseñó un mezclador tipo unión en T como se muestra en la figura 20.



d1: diametro tubo de succión de aire
d2: diametro boquilla de entrada de biogás al mezclador
d3: diametro tubería biogás

Figura 20. Esquema diseño dispositivo mezclador.

Teniendo en cuenta las especificaciones de la Planta Diesel (Tabla 10), consumo volumétrico de biogás y los siguientes datos: eficiencia volumétrica: 0,85, velocidad del gas en la boquilla: 20 m/s, distancia mínima de la entrada de gas al colector del motor, 2 veces el diámetro del colector. Se diseñó un mezclador aire-biogás en acero galvanizado tipo unión en T con las siguientes dimensiones:

- Diámetro de la tubería de biogás d_1 : ½ in
- Diámetro de la boquilla d_2 : 0,007 m.
- Distancia del la entrada de gas al colector: 0,08 m.



Figura 21. Mezclador biogás-aire.

4.2.9.2 Medidor de consumo de combustible. Para evaluar el consumo de combustible acpm en la planta diesel se adaptó a esta un cilindro en acrílico de 0,1752 m de diámetro, con un volumen de 24,11 litros; donde cada mililitro desplazado equivale un volumen de acpm de 0,0241 litros.

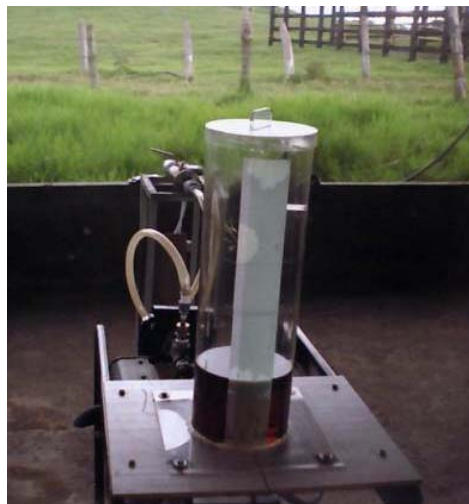


Figura 22. Medidor de combustible.

4.2.10 Dispositivo medidor de Energía. Para la medición de la potencia generada se utilizó un tablero disipador energético de potencia eléctrica (Figura 23). Este está diseñado con base en lámparas

incandescentes de alta potencia en las que se incluyen sistemas halógenos para mejorar la efectividad del proceso, el sistema cuenta con cuatro lámparas cada una de estas con una carga de 1500 W. La potencia máxima de generación fue de 4500 W.



Figura 23. Tablero disipador de energía.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS

4.3.1 Caracterización de los biodigestores de la granja porkys. La granja Porkys cuenta para el tratamiento del estiércol fresco de cerdo con dos biodigestores de 100 m³ plásticos tubulares de flujo continuo; alimentados con el efluente resultante de la separación sólido-líquido de las aguas residuales conducidas por canaletas existentes en la granja, las cuales recogen la excreta, orina, sobras de alimento y el agua de lavado de las diferentes áreas de la porcícola (ver anexo A). Los sólidos procedentes de la separación sólido-líquido, son mezclados con melaza y sal, para producir cerdaza, alimento concentrado para el ganado. El efluente líquido de los biodigestores, es conducido hacia las lagunas de oxidación de donde es distribuido y bombeado para riego de los potreros.

Tabla 11. Parámetros de operación de los biodigestores granja Porkys.

Parámetro	Valor
Caudal promedio vertimiento [m ³ /seg.]	1,16*10 ⁻⁴
pH	7,27
Tiempo de retención [días]	10
Presión [cm de H ₂ O]	8



Figura 24. Biodigestores presentes en la granja.

4.3.2 Caracterización del biogás producido en la granja Porkys.

Tabla 12. Datos de velocidad de flujo de biogás granja Porkys.

HORA	VELOCIDAD [m/s]	CAUDAL [m ³ /h]
10:00 a.m	5,2	14,82
12:00 m	5,6	15,96
2:00 p.m	6,1	17,39
4:00 p.m	5,1	14,53
6:00 p.m	4,5	12,83
Promedio		15,10

Tabla 13. Datos de composición del biogás.

HORA	% CH4	%CO2	%O2	H ₂ S [ppm]
10:00 a.m	68	32	0	3
10:05 a.m	67	33	0	3
10:10 a.m	67	33	0	3
10:15 a.m	66	34	0	3
10:20 a.m	67	33	0	3
Promedio	67	33	0	3

Tabla 14. Propiedades del Biogás en la Granja Porkys.

Propiedad	Valor	Unidades
Caudal promedio	15,10	[m ³ /h]
Presión atmosférica	85,11	[kPa]
Presión planta	0,784	[kPa]
Presión total	86,13	[kPa]
Temperatura de gas en ducto	30	[°C]
Densidad Biogás	0,551	[kg/m ³]
Composition :		
%CH ₄	67	% volumen
% CO ₂	33	% volumen
% H ₂ S	3	ppm
Valor Calorífico	18468,6	kJ/m ³

La alta concentración de metano en el biogás, hace de este un gas de alto poder calorífico confirmando así su posible uso para la generación de electricidad, en maquinas de combustión interna, garantizando un funcionamiento estable. Los resultados obtenidos de concentración de ácido sulfhídrico (3 ppm) confirman que el biogás extraído en la granja Porkys se puede utilizar, sin riesgo alguno, en la planta diesel.

Tabla 15. Datos de composición del biogás después del desulfurador.

HORA	% CH4	%CO2	%O2	H ₂ S [ppm]
10:00 a.m	68	32	0	3
10:05 a.m	67	33	0	3
10:10 a.m	67	33	0	3
10:15 a.m	66	34	0	3
10:20 a.m	67	33	0	3
Promedio	67	33	0	3

Según los datos reportados en la tabla 13 y 15, se puede observar que la concentración de H₂S no cambia, esto es debido a que es muy pequeña la concentración de este gas en el biogás, por tanto la masa ferrosa del desulfurador no reacciona con el H₂S presente. La caída de presión en el desulfurador fue de 0,5 cm de H₂O, lo que indica que el biogás está fluyendo normalmente.

4.3.3 Prueba piloto con la planta diesel utilizando sólo acpm.

Tabla 16. Parámetros de operación planta diesel solo acpm.

VOLTAJE [Voltios]	CORRIENTE [Amp.]	CARGA [Kw.]	VELOCIDAD [rpm]	CONSUMO ACPM.	
				[l/h]	[l/Kw-h]
244	6,2	1,513	3595	1,447	0,956
238	12,7	3,023	3544	2,025	0,670
237	19,2	4,550	3487	2,411	0,568

4.3.4 Prueba piloto de la planta utilizando combustible dual.

Tabla 17. Consumo específico de acpm [l/kw-h] y biogás [m³/kw-h] en el sistema combustible dual.

VOLTAJE [Voltios]	CORRIENTE [Amp.]	CARGA [Kw]	VELOCIDAD [rpm]	CONSUMO ACPM		CONSUMO BIOGÁS [m ³ /Kw-h]
				[l/h]	[l/Kw-h]	
241	6,1	1,470	3560	0,627	0,426	1,241
233	12,3	2,866	3513	0,675	0,236	0,901
228	18,6	4,241	3410	0,675	0,159	0,839

En la tabla 17 podemos observar que el consumo específico de biogás de la planta para la potencia máxima de operación, fue de 0,84 m³/kw-h.

A partir de las tablas 16 y 17 se obtiene que la potencia de salida del sistemas biogás-acpm comparada con el sistema solo diesel, disminuye en un 1,6% por kw-h, a partir de este resultado podemos afirmar que tanto la potencia de salida como la velocidad no varían significativamente cuando se realiza la modificación de la planta.

Tabla 18. Comparación de consumo de acpm en los sistemas: solo acpm y combustible dual (biogás – acpm).

CONSUMO ESPECÍFICO DE ACPM [l/Kw-h].			
Carga Kw	Operación de la planta utilizando solo ACPM	Operación de la planta con mezcla Biogás-ACPM	Reemplazo de ACPM %
1,470	0,956	0,426	52,67
2,866	0,670	0,236	63
4,241	0,568	0,159	72

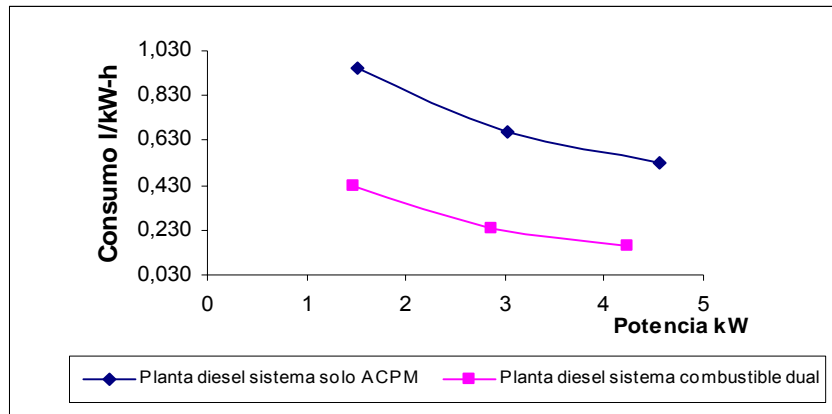


Figura 25. Consumo específico de acpm en la planta diesel en los sistema solo diesel y combustible dual.

4.3.5 Eficiencia de la planta.

Tabla 19. Eficiencia térmica en los sistemas solo diesel y combustible diesel.

POTENCIA Kw.	CONSUMO COMBUSTIBLE Kw.	EFICIENCIA
Sistema solo diesel		
1,513	10,24	0,16
3,023	14,34	0,22
4,550	18,44	0,24
Sistema combustible dual		
1,47	15,36	0,10
2,87	21,51	0,14
4,24	25,60	0,17

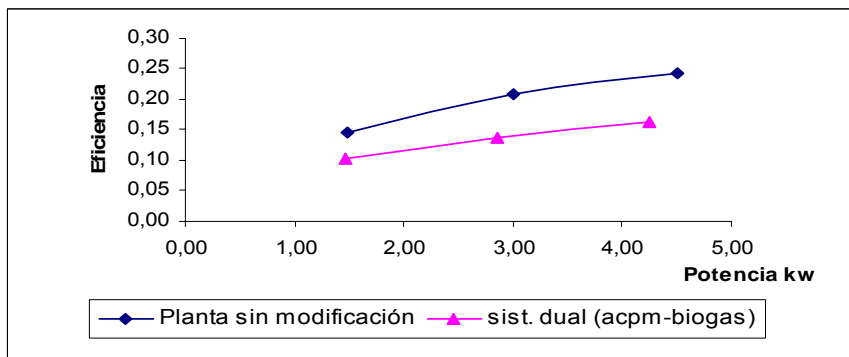


Figura 26. Comportamiento de la eficiencia térmica en la planta diesel.

La eficiencia térmica se evalúa a partir de la relación entre la potencia de salida y la energía del combustible usado para producir esa salida. Según los resultados reportados en la tabla 19, la eficiencia térmica de la planta diesel operada en el sistema combustible dual (biogás-acpm) disminuyó en un 33% en comparación con el funcionamiento normal de la planta. Esto es debido a que el diseño original de la planta es para funcionamiento con combustible diesel, además el biogás utilizado como combustión posee un porcentaje del 33 % de CO₂, inerte a la combustión, el cual ocupa un volumen dentro del cilindro y reduce por tanto el poder calorífico del biogás.

4.3.6 Caracterización de los gases de combustión. Para determinar la concentración de los gases de escape se utilizó el analizador de emisión de gases para vehículos HORIBA MEXA- serie 554J. La concentración de estos gases es reportado en porcentaje en volumen para el CO, CO₂ y O₂ y HC en ppm de propano. La concentración de H₂S y CH₄ fue determinada por el analizador de gases de biogás Bacharach.

Tabla. 20 Concentración gases de combustión sistema solo acpm.

%CO	%CO ₂	HC(ppm)	%O ₂	H ₂ S (ppm)	%CH ₄
0,33	3,07	108	16,4	0,5	0

Tabla. 21 Concentración gases de combustión sistema dual (biogás-acpm).

	Gases de combustión					
	%CO	%CO ₂	HC(ppm)	%O ₂	H ₂ S(ppm)	%CH ₄
1,5	0,17	4,58	121	13,94	0	0,2
3	0,10	6,66	131	11,48	0	0
4,5	0,08	7,72	135	9,9	0	0
Promedio	0,117	6,32	129	11,77	0	0,067

A partir del balance de materia, y teniendo en cuenta el consumo específico de acpm y biogás, determinados a partir de las pruebas pilotos y reportados en las tablas 20 y 21, se determinaron las emisiones de los gases de combustión expresadas en kg/kw-h de CO, CO₂ y HC. Para el cálculo del balance de masa, se utilizó la siguiente composición para el acpm con una densidad de 0,854 kg/m³.

Tabla 22. Composición acpm.

Componente	Concentración
Azufre (máx.)	920 [ppm]
%C en masa	87,1
%H en masa	13,1
%O en masa	-
% N en masa	-

Fuente: Exhaust emissions testing of Colombia high sulfur and reformulated low sulfur diesel fuel. Environment canada, 2002 pág 5.

Tabla 23. Emisiones de los gases de combustión.

Emisiones	solo acpm kg/kw-h	biogás- acpm kg/kw-h
CO	0,0295	0,0093
CO ₂	0,4314	0,7930
HC	6,13E-05	2,05E-05
CH ₄	-	3,06E-06

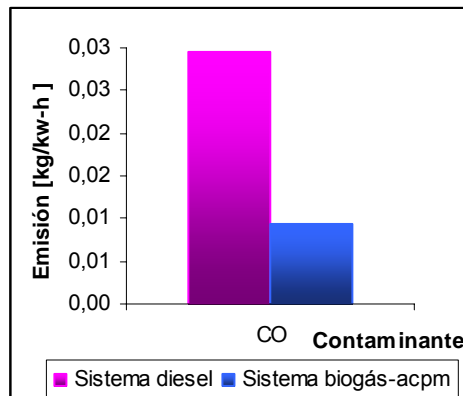


Figura 27. Emisiones de CO [kg/kw-h]

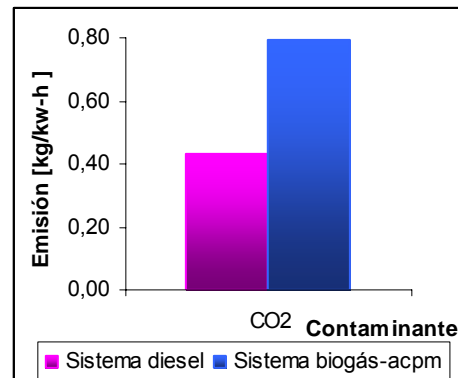


Figura 28 Emisiones de CO₂ [kg/kw-h]

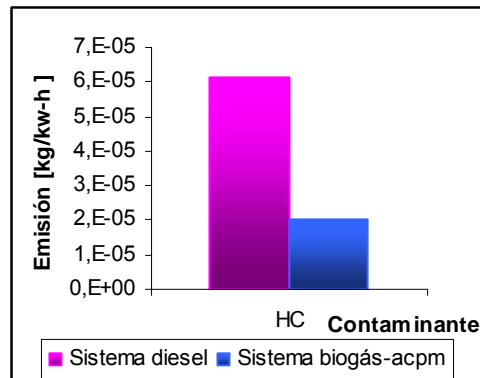


Figura 29. Emisiones de HC [kg/kw-h]

Según los datos reportados en la tabla 23, la concentración de CO para el sistema dual biogás-acpm disminuye en un 68,5 % respecto al sistema solo acpm. Esto indica que se está consumiendo un combustible de mejor calidad. Las emisiones de CO₂ aumentan en un 45,6 % debido a la concentración de CO₂, inerte a la combustión, presente en el biogás (33 % volumen). Las emisiones de HC disminuyen para el sistema dual (biogás-acpm) en un 66,6 % comparado con el sistema solo acpm, este valor es el resultado del porcentaje de sustitución del biogás por acpm; cabe aclarar que la concentración de hidrocarburos reportada por el HORIBA corresponde a partes por millón de propano, compuesto presente en el acpm.

Tabla 24. Temperatura gases de escape [°C] para los sistemas solo diesel y combustible dual

TEMPERATURA GASES DE COMBUSTIÓN [°C]		
POTENCIA [kw-h]	ACPM	BIOGÁS- ACPM
1,5	182	204
3	213	232
4,5	270	295

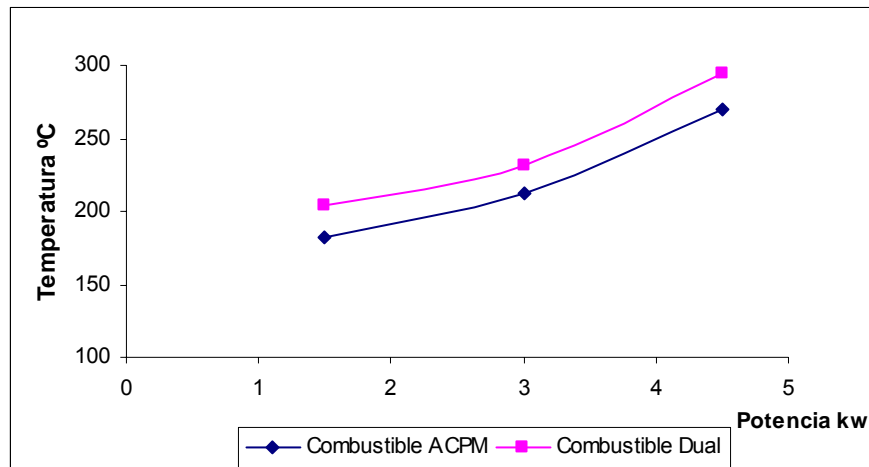


Figura 30. Temperatura de gas de escape en los sistemas: solo acpm y sistema dual.

Se puede observar en la figura 30; que la temperatura de los gases de combustión en el sistema dual es mayor que en el sistema solo diesel, como se expuso, en el capítulo 3, esto debido a una velocidad de combustión menor en el sistema biogás-acpm.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DIESEL PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA.

A partir del estudio técnico y teniendo en cuenta los requerimientos para el desarrollo de 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 una comunidad específica en este caso para el sector Porcícola de la región de Santander.

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA.

5.1.1 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 determina sin financiamiento, es decir se está suponiendo que todos los recursos financieros van hacer suministrados por los inversionistas o propietarios interesados en adquirir el proyecto y la proyección del programa de inversiones se hará en términos corrientes.

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.

5.1.1.1 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 2004 de todos los activos fijos y depreciables requeridos para el desarrollo del proyecto.

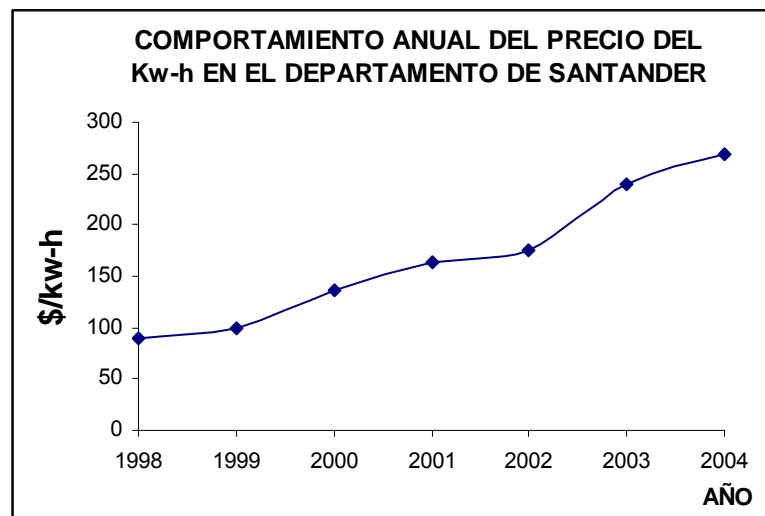
- **Programa de Inversión Fija del Proyecto.** El año cero (0) corresponde al periodo de implementación del proyecto y en el se efectúa la inversión inicial. A partir del año uno (1) se realizará la operación de producción y utilización de electricidad y no se efectuarán reinversiones en los próximos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

5.1.1.2 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 las porcícolas para satisfacer algunos de sus requerimientos energéticos.

- **Presupuesto de ingresos.** El cálculo de los ingresos se realizará partiendo de la capacidad de generación, en términos de kw-h de cada una de las porcícolas 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 anual en el precio del kw-h suministrado por la ESSA. Este comportamiento obedece a la siguiente ecuación:

$$\$/kw-h = 2,4682 \cdot x^2 + 10,837 \cdot x + 74,67 \quad R^2 = 0,9818$$

7



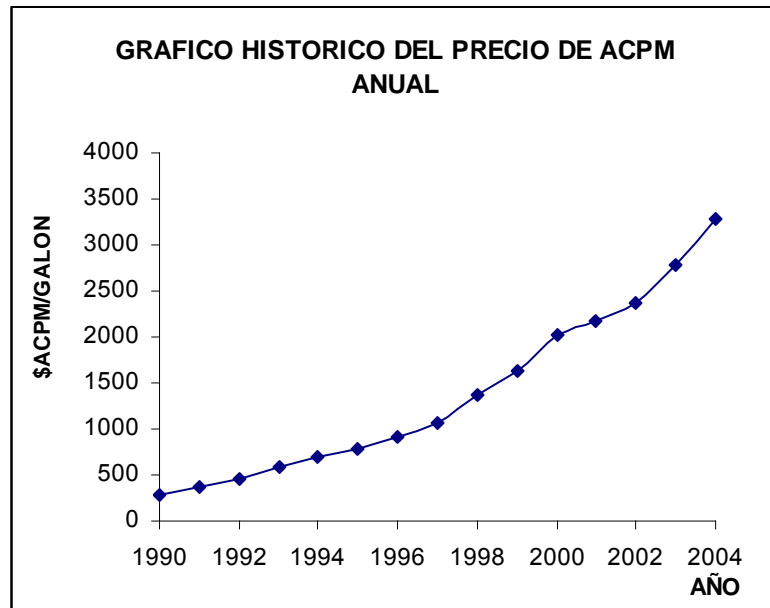
Fuente: Comisión de regulación de energía y gas CREG. www.creg.gov.co

Figura 31. Comportamiento anual del precio del Kw-h en el departamento de Santander.

- **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 cinco años proyectados para la evaluación del proyecto, en función del comportamiento anual del acpm, el cual obedece a la ecuación 8.

$$\text{\$acpm/galón} = 12,444*(X)^2+5,7105*X+308,68, R^2=0,9952$$

8



Fuente: Federación nacional de distribuidores derivados del petróleo FENDIPETROLEO.
www.fendinal.org.co

Figura 32. Comportamiento histórico del precio del acpm, 1990 - Junio 2004.

5.1.2 Evaluación financiera. A partir del flujo financiero neto del proyecto se realiza la evaluación financiera, al encontrar los resultados obtenidos (ingresos y egresos) con las inversiones realizadas.

La evaluación financiera me permite establecer la viabilidad del proyecto y determinar si es recomendable o factible su realización, es decir a partir de esta se debe justificar la inversión. Para realizar la evaluación financiera se utilizan métodos que tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo tales como: valor presente neto (VPN), tasa interna de rentabilidad (TIR) y relación beneficio-costos. Para realizar dichos cálculos se consideró el flujo financiero neto sin financiamiento

5.1.2.1 Valor presente neto. Resulta de la diferencia entre el valor presente de todos los ingresos y el valor presente de todos los egresos determinados en el flujo financiero neto, teniendo en cuenta la tasa de interés de oportunidad. La tasa de interés de oportunidad para la evaluación del proyecto será del 12%.

El cálculo del VPN se hace con base a partir de la siguiente expresión³⁴:

$$VPN = -I_0 + \frac{FNP_1}{(1+i)^1} + \frac{FNP_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNP_5}{(1+i)^5} \quad 9$$

Donde:

FNP_i : Flujo financiero neto del proyecto en el año i

I_0 : Inversión realizada en el año cero (0)

i : Tasa de interés de oportunidad

5.1.2.2 Tasa interna de rentabilidad (TIR). El TIR representa la rentabilidad de la inversión del proyecto para los accionistas del proyecto. Para efectos de su cálculo el valor presente neto se iguala a cero y su valor debe ser superior a la tasa de oportunidad del inversionista, para considerar el proyecto rentable.

5.1.2.3 Relación beneficio-costo, R^{BC} . La relación beneficio costo se obtiene mediante el cociente entre la sumatoria de los valores actualizados de los ingresos y la sumatoria de los valores actualizados de

³⁴ BACA, Urbina Gabriel. Evaluación de proyectos. 4ª. Edición. McGraw-Hill, México, 2001. 216 p.

los egresos³⁵. El valor presente de los ingresos y egresos se determina utilizando la tasa de interés de oportunidad usada en el cálculo del VPN.

$$R^{BC} = \frac{\sum \frac{\text{ingresos}}{(1+i)^n}}{\sum \frac{\text{egresos}}{(1+i)^n}} \quad 10$$

5.1.3 Análisis de Sensibilidad

La evaluación económica se hace en condiciones de certidumbre, es decir las variables involucradas en la determinación de los costos se comportan según lo estimado y proyectado en los estudios técnico, financiero y económico. Sin embargo, existe un grado de incertidumbre que hace que las variables varíen su comportamiento con el tiempo y esto dificulta la toma de decisiones respecto a si el proyecto es viable o no. Debido a esta situación conviene contemplar posibles modificaciones en aquellas variables que se consideren de mayor incidencia para el proyecto ya sea en el flujo neto de inversión o en el flujo neto de operación.

El análisis de sensibilidad consiste en establecer los efectos producidos en el valor presente neto y la tasa interna de rendimiento, al introducir modificaciones en las variables que tienen mayor influencia en los resultados del proyecto. La sensibilidad de este proyecto se estableció con respecto a la variable más incierta; para este caso el tiempo de servicio de la planta.

³⁵ CONTRERAS BUITRAGO, Marco Elías. Formulación y evaluación de proyectos. Bogotá. Universidad nacional abierta y a distancia. 1998, 491 p.

5.2. ESTUDIO DE CASO: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DE BIOGÁS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA GRANJA PORKYS.

La evaluación económica está determinada por la capacidad de generación de la porcícola, esta capacidad de generación expresada en kw-h depende de la producción continua de biogás en los biodigestores instalados en la granja. A partir de las pruebas preliminares se obtuvo que para un reemplazo de acpm por biogás del 73%, el consumo específico de biogás fue de 0,84 m³/h por cada kw-h generado. Según las mediciones en campo se obtuvo que el flujo promedio de biogás en la granja es de 15,10 m³/h, medidos a condiciones de temperatura y presión de 30 °C y 86,3 kPa. Teniendo en cuenta lo anterior, la capacidad de generación en la granja es de 12,7 kw-h.

Para el aprovechamiento de la energía generada a partir del biogás es necesario escoger una planta diesel, que me permita operar continuamente y que su potencia de diseño sea por lo menos 20% mayor que la potencia de generación en la granja Porkys. Para la evaluación económica de este caso específico se supuso una planta diesel marca Cummins, referencia 20ENAF, potencia de salida de 16 Kw, trifásica, velocidad 1800 rpm.

- Aprovechamiento de la energía generada a partir del biogás en la granja Porkys. La granja Porkys actualmente se encuentra conectada a la red de distribución energética del sector (ESSA); la energía eléctrica a producir a partir del biogás producido actualmente en la granja será utilizada para suplir la demanda de algunas de las áreas de mayor consumo de la granja (ver anexo B).

Tabla 25. Necesidades energéticas de las áreas seleccionadas en la granja Porkys.

Área	Carga Kw
Engorde	2,3
Partos	7,2
Sala cuna	1,8
Gestación en corral	0,9
TOTAL	12,2

Fuente: Autores

El sistema de iluminación de las áreas tendrá las siguientes características:

- Carga total 15,7 Kw
 - Red de baja tensión área a 120 voltios
 - La planta eléctrica a utilizar será de 16 Kw
 - El cableado de distribución hacia las áreas será un cable THW # 8.
 - Las lámparas de las áreas son de 100 W
- Cálculo del flujo financiero neto de la utilización de biogás en la granja Porkys.**

Tabla 26. Total inversión fija granja Porkys.

CONCEPTO	AÑOS					
	0	1	2	3	4	5
Activos fijos tangible						
- Planta Cumins 16 kw	20.000.000					
- Filtro captación H ₂ S	50.000					
- Dispositivo de Secado	320.000					
- Medidor de Gas	50.000					
- Dispositivo Mezclador	100.000					
- Tubería y Accesorios	300.000					
-Subtotal	20.820.000					
Activos diferido	0					
Total inversión fija	20.820.000	0	0	0	0	0

Tabla 27. Factores utilizados en los costos de producción en la granja Porkys.

Factor	Mezcla biogás-acpm
Sustitución de acpm por Biogás	73%
Litros de ACPM/Kw-h	0,159
Costo litro ACPM	\$ 865
Horas diarias de generación	12
Horas/año	4380
Potencia generada (kw-h)	12
Kw-h/año	52560
Consumo de acpm (Lt./año)	8357
Vida útil planta eléctrica (años)	8
Vida útil tubería y accesorios (años)	10
Costo \$/kw-h (ESSA)	268,57

Tabla 28. Costos anuales de producción, granja Porkys, pesos del 2004.

COSTOS DE PRODUCCIÓN	
Costos Directos	Costo anual
Depreciación planta eléctrica	1.600.000
Reparación planta Eléctrica	400.000
Mantenimiento planta eléctrica	100.000
Mantenimiento filtro H ₂ S	10.000
Depreciación tubos y accesorios	30.000
Combustible ACPM	7.225.831
Subtotal	9.365.831
Gastos generales de producción	
Mano de obra indirecta	1.000.000
Subtotal	1.000.000
Total Costos de Producción	10.365.831
Total Costos Operacionales	10.365.831
Costo \$/kw-h	\$ 197,22

Al utilizar el biogás generado en la granja Porkys como combustible se obtiene una reducción del 26,57% en el costo por kw-h comparado con los costos actuales de la energía suministrada a través del sistema de interconexión de la región, ESSA. Es posible obtener una reducción del

37,69% en el costo del kw-h, si la planta opera durante las 24 horas diarias.

La variación del costo \$/kw-h en relación al porcentaje de reemplazo de biogás por acpm, se muestra en la figura 33. Como se observa, el mínimo porcentaje de reemplazo para el cual el costo por kw-h se hace igual al costo comercial equivale a 57,5%; por tanto, no es rentable reemplazos por debajo de este valor. Cabe anotar que estos valores se obtuvieron para un tiempo de operación de la planta de 12 horas diarias.

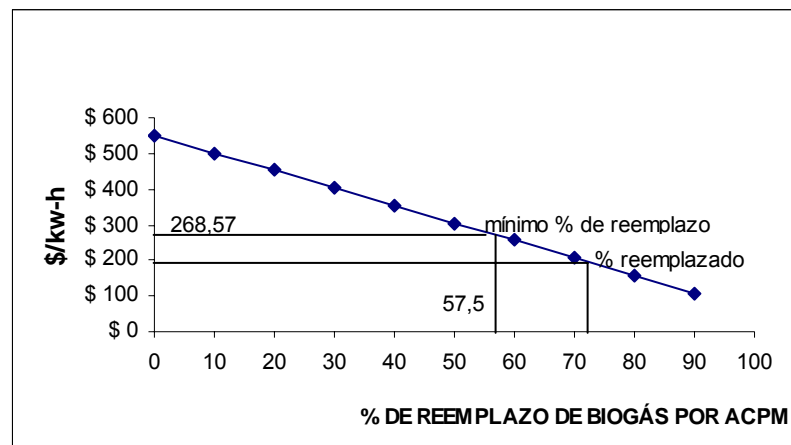


Figura 33. Variación del costo del Kw-h en función del % de reemplazo de acpm.

Tabla 29. Flujo neto de operación sin financiamiento y términos corrientes, granja Porkys.

CONCEPTO	AÑO				
	1	2	3	4	5
Total ingresos	14.116.039	16.784.027	19.559.006	22.593.442	25.887.335
Total costos operacionales	10.365.831	11.456.164	12.375.365	13.349.513	14.378.605
Utilidad operacional	3.750.208	5.327.863	7.183.640	9.243.929	11.508.730
Menos impuestos	0	0	0	0	0
Utilidad Neta	3.750.208	5.327.863	7.183.640	9.243.929	11.508.730
Más depreciación	1.630.000	1.630.000	1.630.000	1.630.000	1.630.000
Flujo neto de operación	5.380.208	7.357.863	9.213.640	11.273.929	13.538.730

Tabla 30. Flujo financiero neto del proyecto, sin financiamiento, pesos corriente; granja Porkys

CONCEPTO	AÑOS					
	0	1	2	3	4	5
Flujo neto de inversión	- 20.820.000	0	0	0	0	0
Flujo neto de operación		5.380.208	7.357.863	9.213.640	11.273.929	13.538.730
Flujo financiero neto del proyecto	- 20.820.000	5.380.208	7.357.863	9.213.640	11.273.929	13.538.730

- Cálculo VPN, TIR Y R^{BC}.

Como resultado de los cálculos se encontró un VPN del proyecto sin financiamiento de \$ 11.254.512; con $i = 12\%$. Este resultado indica que:

- Se puede aceptar el proyecto ($VPN > 0$)
- El dinero invertido en el proyecto ofrece un rendimiento superior al 12%
- El proyecto genera una riqueza adicional de \$ 11.254.512 en relación con la que se obtendría al invertir en una alternativa que produce el 12%

Para la utilización de biogás en una planta eléctrica diesel en la granja Porkys, la TIR sin financiamiento es del 28,84%. Esto significa que los dineros que se mantienen invertidos en el proyecto tienen una rentabilidad del 28,84% anual. Por otra parte como la TIR es mayor que la tasa de oportunidad se puede afirmar que el proyecto es factible financieramente.

A partir de los ingresos y de los costos operacionales (egresos) del proyecto, la relación beneficio-costo obtenida fue de 1,085. Esta relación indica que el proyecto es atractivo; además cada peso invertido genera un valor presente de 0,085 pesos de riqueza adicional en relación con otra inversión que produzca una rentabilidad igual a la tasa de oportunidad, del 12%.

Tabla 31. Variación del TIR con respecto a las horas de servicio, granja Porkys.

HORAS DE SERVICIO (horas)	TIR
6	-2,63
8	9,4
8,24	12
10	19,4
12	28,84
14	36,6
16	44,5
18	51,9
20	59,1
22	66
24	72,8

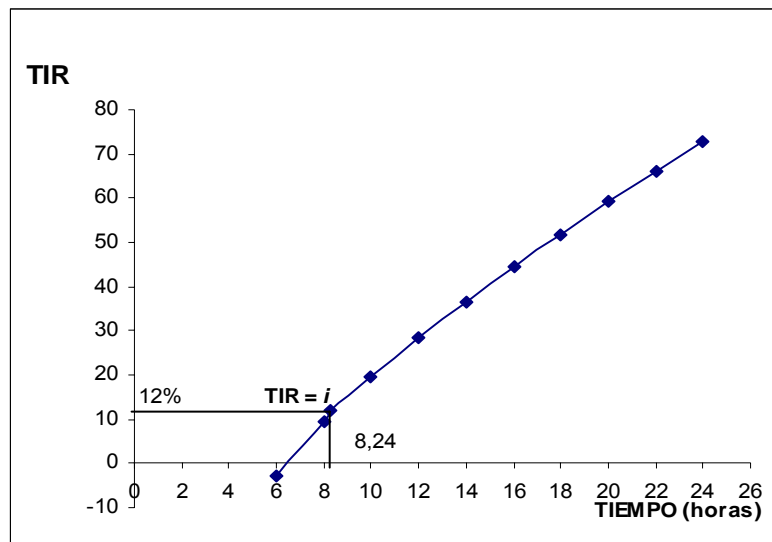


Figura 34. Análisis de sensibilidad granja Porkys.

El proyecto solamente es aceptable cuando la tasa interna de rendimiento (TIR) sea mayor a la tasa de oportunidad, por tanto únicamente será atractivo cuando el tiempo de servicio de la planta diesel sea superior a 8,24 horas.

Tabla 32. Resultados obtenidos de la evaluación económica en la granja Porkys, sin financiamiento, términos corrientes.

Parámetro	Valor
Porcentaje sustitución	73%
- Mínimo porcentaje sustitución	57,5
- Tiempo mínimo de operación (horas)	8,24
Costo \$/kw-h (12 horas de operación)	\$197,22
VPN [i=12%]	\$ 11.254.512
TIR	28,84 %
Relación beneficio-costos	1,066

5.3 ESTUDIO ECONÓMICO DE UTILIZACIÓN DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN EL SECTOR PORCÍCOLA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.

Cómo se expuso anteriormente el estudio económico depende de la capacidad de generación eléctrica de cada una de las porcícolas. Para determinar esta capacidad es necesario conocer el flujo de biogás, el cual es función de la producción de materia seca del estiércol de cerdo y éste a su vez, depende la capacidad de explotación porcina de cada granja.

A partir del convenio número 4152 – 08 celebrado el 18 de diciembre de 2002, entre la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga y la Asociación Colombiana de Porcicultores-Fondo Nacional de la Porcicultura, en el parágrafo 1 y parágrafo 2 del artículo tercero, se define la capacidad de una explotación porcina, con base a las unidades porcinas descritas en la tabla 33 de equivalencias de unidades porcinas:

Tabla 33. Equivalencias de unidades porcinas.

Estado	Equivalente UP
Precebo	0,5
Levante	1
Ceba o finalización	2
Reproductor	2,5
Hembra gestante	2,5
Hembra lactante	7
Hembra de reemplazo	3,5

Las categorías definidas para el cálculo de las equivalencias de unidades porcinas, están clasificadas de la siguiente forma:

- Precebo: Este grupo contempla los lechones de los 6,5 – 7,0 kilos hasta los 22 – 25 kilos.
- Levante: Cerdos de los 22 – 25 kilos hasta los 50 – 60 kilos
- Ceba o finalización: Cerdos de los 50 – 60 kilos hasta los 95 – 105 kilos
- Hembra gestante: Este grupo contempla las hembras en gestación
- Hembra lactante: Este grupo contempla hembras en lactancia con su camada hasta destete
- Hembra de reemplazo: Este grupo contempla las hembras de reemplazo, hembras vacías y hembras de descarte.

La unidad porcina UP, equivale a un cerdo en levante con un peso promedio de 50 kg de peso vivo (kpv). El número de unidad porcina de cada granja permite clasificarlas en tres categorías: granjas grandes, capacidad superior a 200 UP; granjas medianas, entre 50 – 199 UP y granjas pequeñas, menores a 50 UP.

A partir de investigaciones desarrolladas por Corantioquia, CORNARE y la asociación nacional de poricultores reportadas en el año de 1997, se determinaron las siguientes relaciones:

- Producción de materia seca [MS] = 0,75 kg por 100 kilogramos de peso vivo [kpv]
- Tasa de producción de biogás = 0,69 – 1,02 [m³/kg de MS].

Con base en lo anterior, la granja Porkys posee 2357 UP, resultado obtenido a partir del inventario realizado en esta granja; el cual puede observarse en el siguiente la tabla.

Tabla 34. Potencia de producción de biogás en la granja Porkys.

Estado	# animales	UP	kpv	MS	Emisiones m ³ biogás/hora
Precebo	611	305,50	15275	114,56	4,08
Levante	350	350	17500	131,25	4,68
Ceba o finalización	426	852	42600	319,50	11,38
Reproductor	3	7,5	375	2,81	0,10
Hembra gestante	180	450	22500	168,75	6,01
Hembra lactante	40	280	14000	105	3,74
Hembra de reemplazo	32	112	5600	42	1,50
TOTALES	1642	2357	117850	883,88	31,49

Para desarrollar la evaluación económica en el sector porcícola de Santander, se tomará como variable la unidad porcina, a partir de esta se calculará el biogás producido y la generación eléctrica en términos de kw-h. Se considerarán una granja pequeña (Granja 1), una mediana (granja 2), la granja Porkys y dos granjas grandes (Granja 3 y 4), con el objeto de evaluar la viabilidad económica de la utilización de biogás como combustible.

Tabla 35. Potencial de generación a partir del número de unidad porcina.

GRANJA	UP	kpv	MS	m ³ biogás/h	kw-h
Granja 1	50	2500	18,75	0,67	0,56
Granja 2	200	10000	75	2,67	2,24
Granja 3	1500	75000	562,5	20,04	16,83
Granja Porkys	2357	117850	883,88	31,49	26,45
Granja 4	3000	150000	1125	40,08	33,67

La granja 1, correspondiente a una porcícola de 50 UP, tiene una capacidad de generación de 0,56 kw-h. Esta capacidad de generación es muy pequeña y por tanto no es justificable la inversión fija para el aprovechamiento del biogás para la generación eléctrica en esta granja, por tanto no se incluirá en el estudio económico. Como se puede observar para la granja Porkys, según su número de unidad porcícola (2357), se obtendría un flujo de biogás de 31,49 m³/h. Si comparamos este valor, con el flujo de biogás actualmente producido en la granja, podemos notar que es necesaria la instalación de dos nuevos biodigestores con el fin de aprovechar los 26,45 kw-h generados.

La evaluación económica se realizará considerando:

- Las granjas arriba mencionadas, implementarán el uso de biogás como combustible en una planta diesel para generación eléctrica y actualmente cuentan con biodigestores para el tratamiento de sus residuos.
- Las granjas implementarán el uso de biogás como combustible en una planta diesel para generación eléctrica y actualmente no cuentan con biodigestores, por tanto es necesario su construcción, instalación y puesta en marcha. El costo fijo de los biodigestores se determinó teniendo en cuenta que este depende en gran parte de la adecuación del terreno, partiendo de esto, el costo fijo supuesto para la instalación y puesta en marcha del biodigestor será de \$3.000.000.

Para el cálculo del flujo neto de operación fue necesario seleccionar la planta de generación diesel a utilizar para cada una de las granjas. Se

seleccionaron plantas diesel marca Cummins comercialmente conocidas que cumplan con las especificaciones de generación requeridas.

Tabla 36. Costo de las plantas utilizadas para la evaluación económica.

Granja	Capacidad de la planta	Costo
Granja 2	6 kw	\$ 7.000.000
Granja 3	20 kw	\$ 25.000.000
Granja Porkys	35 kw	\$ 28.000.000
Granja 4	40 kw	\$ 30.000.000

5.3.1 Resultados de la evaluación económica. La evaluación económica se realizó sin financiamiento y en términos corrientes para los casos arriba mencionados: granja con biodigestor y granja sin biodigestor.

Tabla 37. Total inversión fija, con biodigestor.

CONCEPTO	AÑO					
	0	1	2	3	4	5
Total inversión fija, Granja 2	7.820.000	0	0	0	0	0
Total inversión fija, granja 3	25.820.000	0	0	0	0	0
Total inversión fija, granja Porkys	28.820.000	0	0	0	0	0
Total inversión fija, granja 4	30.820.000	0	0	0	0	0

Tabla 38. Total inversión fija, sin biodigestor.

CONCEPTO	AÑO					
	0	1	2	3	4	5
Total inversión fija, Granja 2	10.820.000					
Total inversión fija, granja 3	28.820.000					
Total inversión fija, granja Porkys	31.820.000					
Total inversión fija, granja 4	33.820.000					

Tabla 39. Factores utilizados en los costos de producción.

Factor	Granja 2	Granja 3	Granja Porkys	Granja 4
Sustitución de acpm por Biogás	73	73%	73%	73%
Litros de ACPM/Kw-h	0,159	0	159	0
Costo litro ACPM	\$ 865	\$ 865	\$ 865	\$ 865
Horas diarias de generación	12	12	12	12
Horas/año	4380	4380	4380	4380
Potencia generada (kw-h)	2,24	16,83	26,45	33,67
Kw-h/año	9811,2	73715,4	115851	147474,6
Consumo de acpm (Lt./año)	1560	11721	18420	23448,4
Vida útil planta eléctrica (años)	8	8	8	8
Vida útil biodigestores	10	10	10	10
Vida útil tubería y accesorios (años)	10	10	10	10
Costo \$/kw-h (ESSA)	268,57	268,57	268,57	268,57

Tabla 40. Costos anuales de producción, con biodigestor.

Costos de Producción	Granja 2	Granja 3	Granja Porkys	Granja 4
Total Costos de Producción	3.448.822	13.674.228	19.706.936	24.214.478
Total Costos Operacionales	3.448.822	13.674.228	19.706.936	24.214.478
Costo \$/kw-h	\$ 351,52	\$ 185,50	\$ 170,11	\$ 164,19

Tabla 41. Costos anuales de producción, sin biodigestor

Costos de Producción	Granja 2	Granja 3	Granja Porkys	Granja 4
Total Costos de Producción	3.748.822	13.974.228	20.006.936	24.514.478
Total Costos Operacionales	3.748.822	13.974.228	20.006.936	24.514.478
Costo \$/kw-h	\$ 382,10	\$ 189,57	\$ 172,70	\$ 166,23

Tabla 42. Flujo neto de operación, con biodigestor.

CONCEPTO	AÑO				
	1	2	3	4	5
-Flujo neto de operación granja 2	-223.828	145.334	491.746	876.333	1.299.096
-Flujo neto de operación granja 3	8.153.517	10.927.178	13.529.905	16.419.460	19.595.844
-Flujo neto de operación granja Porkys	13.677.167	18.036.249	22.126.690	26.667.910	31.659.909
-Flujo neto de operación granja 4	17.822.776	23.371.747	28.578.747	34.359.574	40.714.228

Tabla 43. Flujo neto de operación, sin biodigestor.

CONCEPTO	AÑO				
	1	2	3	4	5
-Flujo neto de operación granja 2	-523.828	-154.666	191.746	576.333	999.096
-Flujo neto de operación granja 3	7.853.517	10.627.178	13.229.905	16.119.460	19.295.844
-Flujo neto de operación granja Porkys	13.377.167	17.736.249	21.826.690	26.367.910	31.359.909
-Flujo neto de operación granja 4	17.522.776	23.071.747	28.278.747	34.059.574	40.414.228

Tabla 44. Flujo financiero neto del proyecto, con biodigestor.

GRANJA	AÑOS					
	0	1	2	3	4	5
-Granja 2	-7.820.000	-223.828	145.334	491.746	876.333	1.299.096
-Granja 3	-25.820.000	8.153.517	10.927.178	13.529.905	16.419.460	19.595.844
-Granja Porkys	-28.820.000	13.677.167	18.036.249	22.126.690	26.667.910	31.659.909
-Granja 4	-30.820.000	17.822.776	23.371.747	28.578.747	34.359.574	40.714.228

Tabla 45. Flujo financiero neto del proyecto, sin biodigestor.

GRANJA	AÑOS					
	0	1	2	3	4	5
-Granja 2	-10.820.000	-523.828	-154.666	191.746	576.333	999.096
-Granja 3	-28.820.000	7.853.517	10.627.178	13.229.905	16.119.460	19.295.844
-Granja Porkys	-31.820.000	13.377.167	17.736.249	21.826.690	26.367.910	31.359.909
-Granja 4	-33.820.000	17.522.776	23.071.747	28.278.747	34.059.574	40.414.228

Tabla 46. Indicadores financieros, con biodigestor.

Factor	Granja 2	Granja 3	Granja Porkys	Granja 4
VPN	- 6.259.903	21.355.397	48.432.106	69.005.270
TIR	-21,92	36,88	58,36	71,26
Relación beneficio - costo	0,60	1,17	1,36	1,49

Tabla 47. Indicadores financieros, sin biodigestor.

Factor	Granja 2	Granja 3	Granja Porkys	Granja 4
VPN	-10.341.336	17.273.964	44.350.673	64.923.837
TIR	-0,048	30,6	51,4	64
Relación beneficio - costo	0,51	1,11	1,31	1,41

Teniendo en cuenta los indicadores financieros, reportados en la tablas 46 y 47; el proyecto no es viable económicamente para una granja mediana de 200 UP (granja 1). Es necesario calcular la mínima cantidad de unidades porcinas para que la implementación del uso de biogás como combustible sea rentable en una granja grande.

Tabla 48 Indicadores financieros en función del número de unidad porcina, granja con biodigestor (tiempo de operación 12 horas, reemplazo 73%).

UP	Kw-h	VPN	TIR	R ^{BC}
220	2,47	-5.540.814	-16,6	0,65
240	2,69	-4.852.989	-12,2	0,69
260	2,92	-4.133.899	-7,9	0,73
280	3,14	-3.446.074	-4,1	0,76
300	3,37	-2.726.984	-2,6	0,8
320	3,59	-2.039.159	2,9	0,83
340	3,82	-1.320.070	6,3	0,86
360	4,04	-632.245	9,3	0,89
380	4,26	55.580	12,2	0,92
400	4,49	774.670	15,2	0,95
420	4,71	1.462.495	17,9	0,98
440	4,94	2.181.585	20,7	1,002

Tabla 49 Indicadores financieros en función del número de unidad porcina, granja sin biodigestor (tiempo de operación 12 horas, reemplazo 73%).

UP	Kw-h	VPN	TIR	R ^{BC}
440	4,94	-1.899.848	5,9	0,88
460	5,16	-1.212.023	8,2	0,9
480	5,39	-492.934	10,5	0,92
500	5,61	194.891	12,6	0,94
520	5,84	913.981	14,7	0,97
540	6,06	1.601.806	16,8	0,98
560	6,28	2.289.631	18,7	1,004

Como se puede observar en las tablas 48 y 49; el mínimo número de unidad porcina para el cual la implementación del proyecto en el sector porcícola es rentable es de 440 UP, para granjas que cuentan con biodigestores y 560 UP, para granjas que requieren de la instalación del biodigestor para la producción de biogás. Para estos números de unidad porcícola, los indicadores financieros garantizan la factibilidad económica del proyecto. Para efectos del análisis de sensibilidad, la granja 5 corresponderá a una granja de 440 UP con biodigestor; y la granja 6 a una granja de 560 UP que no posee biodigestor.

5.3.2 Análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad se hace en función de la TIR ante cambios en el tiempo de operación de la planta diesel modificada. Los datos obtenidos en la tabla 50 son calculados para un nivel de reemplazo de biogás por diesel del 73%. Este análisis de sensibilidad me permite conocer el tiempo mínimo de funcionamiento para el cual la TIR se hace igual a la tasa de interés de oportunidad utilizada para el cálculo de los indicadores financieros ($i=12\%$).

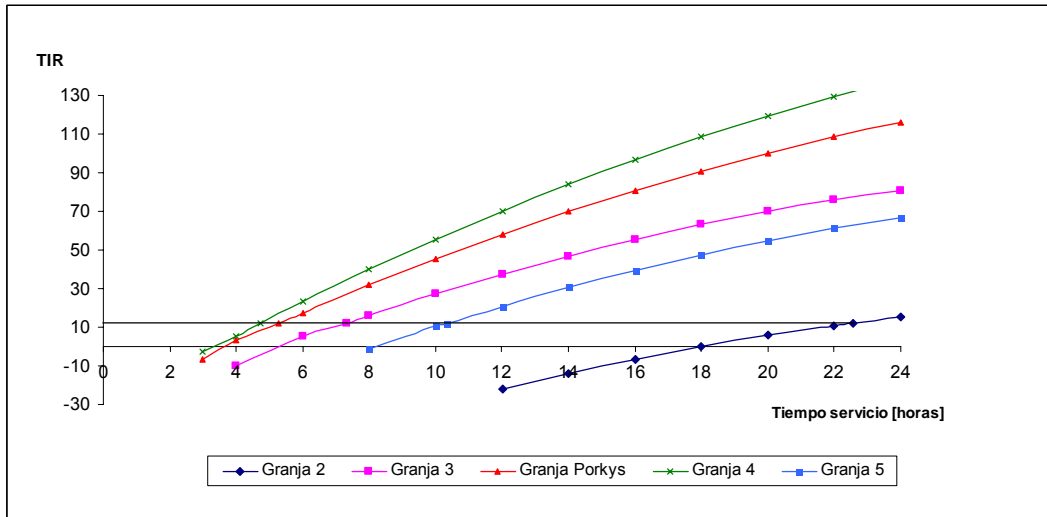


Figura 35. Análisis de sensibilidad para granjas con biodigestor.

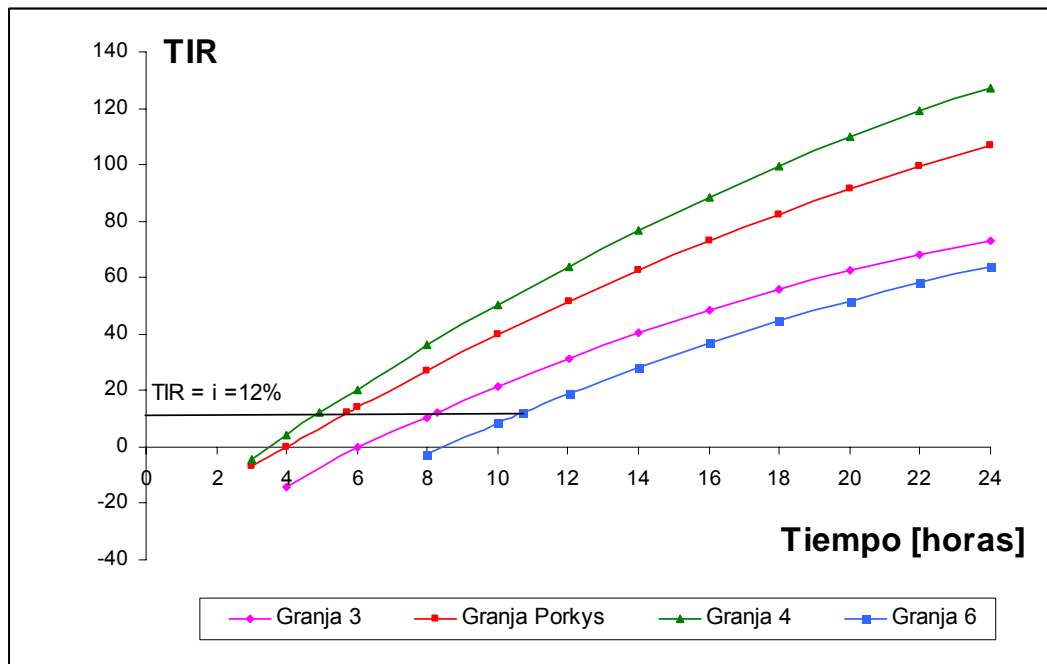


Figura 36. Análisis de sensibilidad para granjas sin biodigestor.

Tabla 50. Tiempo mínimo de operación para el cual el TIR = i.

Granja	Kw-h	Tiempo mínimo de operación [h]	
		con biodigestor	sin biodigestor
Granja 2	2,24	22,56	-
Granja 3	16,83	7,32	8,28
Granja Porkys	26,45	5,27	5,71
Granja 4	33,67	4,72	4,94
Granja 5	4,94	10,34	-
Granja 6	6,28	-	10,67

Para la granja 2 el tiempo mínimo de operación era mayor a 24 horas, por tanto no se incluyó en el análisis de sensibilidad para el caso de la granja sin biodigestor.

5.3.3 Análisis de resultados.

5.3.3.1 Costos por kw-h.

Tabla 51. Costos del kw-h para cada una de las granjas de estudio.

Granja	Kw-h	\$/kw-h		% reducción del costo kw-h ^a	
		con biodigestor	sin biodigestor	con biodigestor	Sin biodigestor
Granja 2	2,24	\$ 351,52	\$382,10	-30,89	-42,3
Granja 3	16,83	\$ 185,50	\$189,57	30,9	29,4
Granja Porkys	26,45	\$ 170,11	\$172,70	36,7	35,7
Granja 4	33,67	\$ 164,19	\$166,23	38,9	38,1
Granja 5	4,94	\$ 234,53	-	12,7	-
Granja 6	6,28	-	\$ 224,73	-	16,3

^a El % de reducción del costo del kw-h, se hace al compararse con el costo de producción del kw-h con el suministrado por la Electrificadora de Santander (\$268,57).

Los datos reportados en la tabla 51, fueron obtenidos para un tiempo de operación de la planta diesel de 12 horas; se observa, que para la granja 2, el costo del kw-h es mayor comparado con el costo del kw-h, suministrado por la empresa de abastecimiento de la región, confirmando

que para granjas medianas (granjas entre 50 y 199 UP), el proyecto económicamente no es viable. Como es de esperarse entre mayor capacidad de explotación porcina tenga la granja, mayor es el porcentaje de reducción, alcanzándose hasta una reducción del 38,1% para granjas sin biodigestor y 38,9% para granjas con biodigestor. Para las granjas 5 y 6 las cuales representa el mínimo número de unidad porcina que debe poseer una granja para que el proyecto sea rentable en términos económicos el porcentaje de reducción en el costo fue de 12,7% y 16,3% respectivamente.

5.3.3.2 Porcentaje de reemplazo de biogás por acpm. El porcentaje mínimo de reemplazo de biogás es aquel en el cual el costo de producción del kw-h se hace igual a costo del kw-h proporciona por ESSA. Este valor se determinó para un tiempo de operación de la planta diesel de 12 horas.

Tabla 52. Porcentaje de reemplazo mínimo de biogás por acpm.

Granja	Kw-h	% mínimo de reemplazo	
		con biodigestor	sin biodigestor
Granja 2	2,24	88,90	-
Granja 3	16,83	55,09	55,9
Granja Porkys	26,45	52,04	52,5
Granja 4	33,67	50,84	51,2
Granja 5	4,94	65,08	-
Granja 6	6,28	-	63,1

Para la granja 2 no se cálculo el porcentaje mínimo de reemplazo para una granja sin biodigestor ya que el porcentaje mínimo de reemplazo calculado para esta granja con biodigestor es superior al porcentaje de reemplazo obtenido en las pruebas piloto desarrolladas en la granja (73%), nuevamente podemos concluir que para está granja (200UP), el proyecto no es factible ni técnica ni económicamente. Cuando nos

referimos a granjas grandes (granja Porkys, granja 3, granja 4), es necesario reemplazar como mínimo el 56% del acpm por biogás. El mínimo reemplazo permitido para las granjas 5 y 6 es del 66%

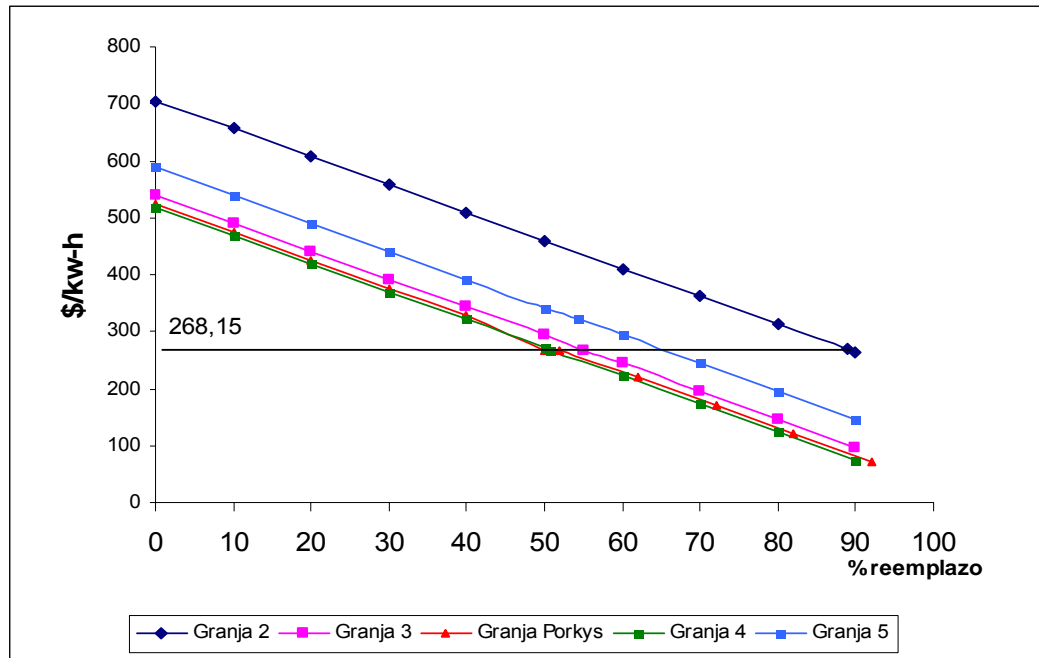


Figura 37. Variación en el costo del kw-h respecto al % reemplazo de biogás por diesel, para granjas con biodigestor.

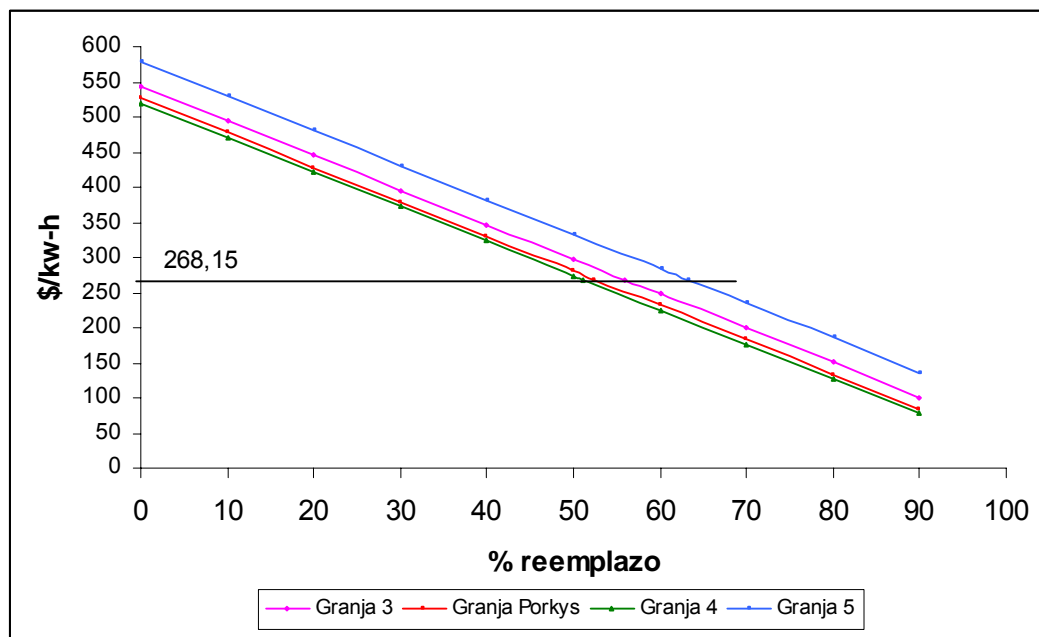


Figura 38. Variación en el costo del kw-h respecto al % reemplazo de biogás por diesel, para granjas sin biodigestor.

5.4. INCIDENCIA DEL PROYECTO EN SU ENTORNO.

La implementación y operación de este proyecto genera algunos efectos sobre el sector de poricultores de Santander, efectos de tipo económico, social, ecológico y tecnológico.

5.4.1 Efectos del proyecto sobre el medio ambiente.

El metano es uno de los constituyentes principales al inventario mundial de gases con efecto invernadero (GEI) a los cuales se atribuye en gran medida el cambio de clima observado en nuestro planeta. En Colombia, la aportación de este gas al inventario nacional de emisiones del año 1990 fue del 3,2%; esta se originó principalmente en la actividad agropecuaria (79%), debido a la fermentación entérica y al manejo de estiércol y, en menor proporción, en el uso de combustibles (14%) y manejo de residuos (7%)³⁶.

Para justificar el proyecto desde el punto de vista ambiental se calcularon las toneladas de CO₂ equivalentes capturadas; éste es el resultado de la diferencia entre las toneladas de CO₂ equivalentes de la planta de biogás si fuera emitido a la atmósfera, expresado en función de la concentración de CH₄ y CO₂; y las toneladas de CO₂ equivalentes emitidas por la planta diesel modificada al sistema de combustible dual biogás-acpm, calculadas a partir de los factores de emisión reportados en la tabla 23. Las toneladas de metano emitidas son expresadas en toneladas de CO₂ equivalentes partiendo de su GWP (21).

En la tabla 53, se realizó el cálculo de la captura de CO₂ expresada en toneladas por año para diferentes números de unidad porcícola. Según

³⁶ Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, 1999. IDEAM. Bogotá, 1999

los datos reportados en esta tabla, la utilización de biogás como combustible en plantas diesel me permite una reducción del 93,32 % respecto a las emisiones de CO₂ equivalentes, producidas si el biogás no fuera utilizado.

Actualmente es posible comercializar las toneladas anuales de CO₂ capturas a través de los bonos de carbono establecidos en el protocolo de Kyoto. Cada tonelada anual de CO₂ captura tiene un valor comercial de de tres dólares; a partir de esto y teniendo en cuenta la producción de biogás por cada unidad porcina, la captura de emisiones de CO₂ representa para el sector porcícola un ingreso adicional de \$10.653 pesos anuales por cada unidad porcina.

Otros beneficios ambientales de la implementación de programas para el manejo de los residuos de las porcícolas, mediante la instalación de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales son la reducción de los olores ofensivos y la proliferación de moscas, igualmente la disminución en el crecimiento de microorganismos potencialmente patógenos en el suelo para los animales y el hombre y la producción del gas, llamado biogás, combustible el cual representa una fuente alternativa de energía debido a su contenido en gas metano.

UP	Kw-h	TON CO2 EQUIVALENTES PRODUCTO DEL BIOGÁS				TON CO2 EQUIVALENTES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN			TONELADAS CAPTURADAS DE CO2	PESOS OBTENIDOS POR LAS TON. DE CO ₂ CAPTURADO
		Ton CH4	Ton CO2 equivalentes	Ton CO2	Ton totales	Ton CO2	Ton CH4	Ton CO2 equivalentes		
1000	11,22	62,23	1306,84	84,29	1391,13	85,93	0,33	6,96	1299,55	\$ 10.664.211
2000	22,44	124,46	2613,69	168,58	2782,27	171,86	0,66	13,91	361,36	\$ 2.965.309
3000	33,67	186,69	3920,53	252,87	4173,40	257,79	0,99	20,87	542,03	\$ 4.447.964
4000	44,89	248,92	5227,37	337,16	5564,53	343,72	1,33	27,83	722,71	\$ 5.930.618
5000	56,11	311,15	6534,21	421,45	6955,66	429,65	1,66	34,78	903,39	\$ 7.413.273
6000	67,33	373,38	7841,06	505,74	8346,80	515,59	1,99	41,74	1084,07	\$ 8.895.928
7000	78,55	435,61	9147,90	590,03	9737,93	601,52	2,32	48,70	1264,75	\$ 10.378.582
8000	89,78	497,84	10454,74	674,32	11129,06	687,45	2,65	55,66	1445,43	\$ 11.861.237
9000	101,00	560,08	11761,59	758,61	12520,20	773,38	2,98	62,61	1626,10	\$ 13.343.892
10000	112,22	622,31	13068,43	842,90	13911,33	859,31	3,31	69,57	1806,78	\$ 14.826.546
11000	123,44	684,54	14375,27	927,19	15302,46	945,24	3,64	76,53	1987,46	\$ 16.309.201
12000	134,66	746,77	15682,11	1011,48	16693,59	1031,17	3,98	83,48	2168,14	\$ 17.791.855
13000	145,88	809,00	16988,96	1095,77	18084,73	1117,10	4,31	90,44	2348,82	\$ 19.274.510
14000	157,11	871,23	18295,80	1180,06	19475,86	1203,03	4,64	97,40	2529,50	\$ 20.757.165
15000	168,33	933,46	19602,64	1264,35	20866,99	1288,96	4,97	104,35	2710,17	\$ 22.239.819
16000	179,55	995,69	20909,49	1348,64	22258,13	1374,89	5,30	111,31	2890,85	\$ 23.722.474
18000	201,99	1120,15	23523,17	1517,22	25040,39	1546,76	5,96	125,22	3252,21	\$ 26.687.783
19000	213,22	1182,38	24830,01	1601,51	26431,52	1632,69	6,29	132,18	3432,89	\$ 28.170.438
20000	224,44	1244,61	26136,86	1685,80	27822,66	1718,62	6,63	139,14	3613,56	\$ 29.653.092

Tabla 53. Toneladas de CO₂ equivalentes capturadas anualmente en función de la unidad porcina.

6. CONCLUSIONES

c

A partir de la producción de biogás es posible determinar el potencial de generación teniendo en cuenta el valor del consumo específico de biogás por kw-h. Para el caso de la granja Porkys, granja donde se desarrollaron las pruebas piloto, se midió un flujo de biogás promedio de 15,10 m³/h el cual puede generar 12,7 kw-h.

Para la granja Porkys, el costo del kw-h para 12 horas de operación y un porcentaje de reemplazo de biogás por acpm del 73%; representa una reducción del 26,57% respecto al costo del kw-h suministrado por la empresa de distribución de la región, ESSA. El mínimo porcentaje de reemplazo para el cual el costo del kw-h producido a partir de biogás se hace igual al costo del kw-h comercial fue de 57,5%.

A partir del análisis de sensibilidad, el tiempo mínimo de operación de la planta diesel para el cual la TIR se hace igual a la tasa de interés de oportunidad fue de 8,24 horas, en el caso específico de la granja Porkys.

Conociendo que la capacidad de explotación porcina de una porcícola se mide con base en el número de unidades porcinas, la implementación del proyecto en el sector porcícola de Santander es rentable desde el punto de vista económico para granjas que posean una capacidad mayor a 440 unidades porcinas; esto para el caso en el que la granja posea biodigestor para el tratamiento de sus residuos. En el caso contrario, es decir, en el que sea necesario la instalación y puesta en marcha del biodigestor el número de unidades porcinas mínimas para el cual el proyecto es rentable es de 560.

Para una granja con 440 y 560 UP, el mínimo porcentaje de reemplazo de biogás por acpm para un tiempo de operación de 12 horas es de 65,08 y 63,1 respectivamente. El tiempo mínimo de operación para el cual el proyecto es viable económicamente es de 10,34 para 440 UP y 10,67 para 560 UP.

La utilización de biogás como combustible en plantas diesel permite una reducción de las emisiones de CO en un 68,5%, las de HC en un 66,6 % y un aumento del 45,6 % en las emisiones de CO₂; estos valores determinados respecto a las emisiones expresadas en kg/kw-h de la planta operada con solo acpm.

La implementación de esta tecnología en el sector porcícola permite una reducción en toneladas anuales de CO₂ del 93,32 % comparada con las emisiones de CO₂ equivalentes, producidas si el biogás fuera venteado directamente a la atmósfera.

A través del comercio de bonos de carbono es posible obtener anualmente una utilidad adicional de \$10.653 peso por cada unidad porcina, este ingreso puede ser utilizado para la inversión fija inicial del proyecto.

7. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de las pruebas piloto, se utilizó para el secado del biogás un lecho de sílica gel, pero éste método es poco eficiente considerando que el tiempo de operación para que el proyecto sea rentable es de mínimo cuatro horas; por tanto se recomienda utilizar otros métodos que puedan ser utilizados en operación continua para generar electricidad a partir de biogás.

Utilizar diferentes mezcladores aire-biogás para la modificación de la planta diesel con el objeto de determinar sus parámetros de operación y compararlos con los obtenidos con el mezclador tipo en T, utilizado en el proyecto.

Evaluar el proyecto, utilizando otras fuentes potenciales de generación de biogás tales como tratamiento de aguas residuales y tratamiento de residuos sólidos.

Realizar las pruebas piloto utilizando una planta comercial de diferente marca, con una capacidad de operación continua, con el fin de determinar los parámetros de operación y por tanto su eficiencia.

Teniendo que la concentración en parte por millón del sulfhídrico en el biogás producido a partir del tratamiento anaerobio del estiércol de cerdo es tan bajo (3 ppm), se recomienda utilizar para su remoción la esponja de hierro, ya que, puede ser un método de mayor accesibilidad representando una alternativa más económica para el sector porcícola.

BIBLIOGRAFÍA

ANEROUSIS, J. P. AND S. K. WHITMAN. "Iron Sponge: Still a Top Option for Sour Gas Sweetening." Oil and Gas Journal February 18,1985: 71-76.

BACA, URBINA GABRIEL. Evaluación de proyectos. 4ª. Edición. McGraw-Hill, México, 2001. 216 p.

BIOGAS DIGEST (Volume I – IV). GATE-GTZ, Alemania. 1999

CONTRERAS BUITRAGO, MARCO ELÍAS. Formulación y evaluación de proyectos. Bogotá. Universidad nacional abierta y a distancia. 1998, 491 p.

INVENTARIO NACIONAL DE FUENTES Y SUMIDEROS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, 1999. IDEAM. Bogotá, 1999

JIMÉNEZ, PÉREZ MANUEL Y TÉLLEZ, MORET JULIO. Manual del Usuario de plantas diesel. Ed. UIS, 1980

KOHL Y NEILSEN. Gas purification. Texas, 1997

LUNA ESPITIA, JUAN PABLO. Sistema de generación eléctrica a partir de biogás: estudio de caso del relleno sanitario "El Carrasco" de la ciudad de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2002.

MITZLAFF , KLAUS VON Engine for Biogas. Gate-gtz. Alemania, 1988

MUCHE H, ZIMMERMANN, H. La purificación del biogás. GATE-GTZ, Alemania, 1984.

SASSE, L. La planta de biogás. GATE-GTZ. Alemania, 1984

TAPHORN, D. SulfaTreat-410HP Estimated Performance Sheet quoted for S. Zicari. SulfaTreat, St. Louis, MO.

TAYLOR, D. K. "Natural Gas Desulfurization (Parts 1-4)." Oil and Gas Journal. (November 5, 19, and December 3, 10), 1956: 4 p.

WALSHAW. T.D. Diesel Engines Design. Ed. George Newnes limited. London, 1953.

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

WERNER U, STÖHR U, HEES N. Biogas plants in animal husbandry. GATE-GTZ, Alemania, 1989

Websites:

<http://www.geocities.com/institutoingefor/cursos/curso01/biogas4.html>.

Curso de biogás.

<http://www.u-nord.de/PDF/bi/001en.pdf>. Planning and construction of biogas plants for solid waste digestion in agriculture.

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

<http://www.biogasworks.com>. Biogas Works. Web page maintained by Resource Development Associates, Washington D.C.

<http://www.undp.org/see/energy/policy/ch-8.htm>. Energy as an Instrument for socio-economics development. Chapter 8, Community biogas plants supply rural energy and water: The Pura Village case study

<http://habitat.g.upm.es/bpes/ceh2/bpes13.html>. Diferentes experiencias en material de energía (España)

http://www.bio-tec.net/palmar_stelena.html. PIEDRAHITA, Emilio; CONIL Philippe. Experiencia de 5 años en la biodigestión y utilización de los efluentes de una extractora de aceite de palma en la región de Tumaco, Colombia

<http://www.cipav.gov.co>. Utilización del Biogás para generación de electricidad.

<http://www.fundacion-ica.org.mx/Experiencias.parte1.htm>. Situación actual del manejo integral de los residuos sólidos en México.

<http://www.ing.unne.edu.ar/pub/biomasa.pdf> Biogás y Biomas

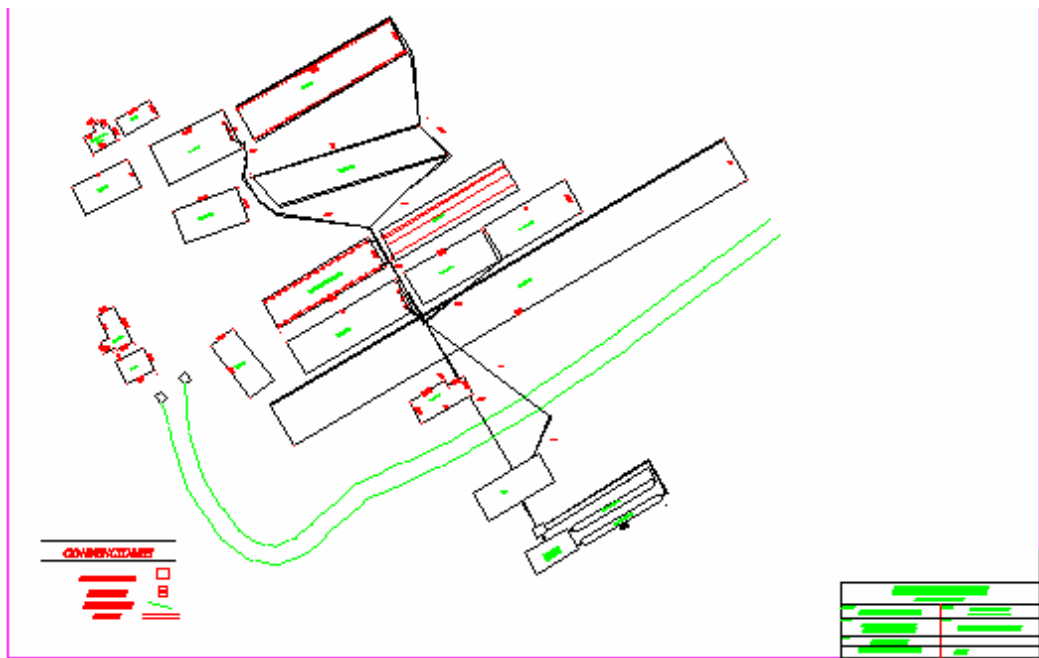
<http://www.sina.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpp6199/rcpp.htm>. Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos del tratamiento residuos agrícolas con producción de biogás

<http://www.fendinal.org.co>. Página Web. Federación nacional de distribuidores derivados del petróleo FENDIPETROLEO.

<http://www.creg.gov.co>. Página Web. Comisión de regulación de energía y gas C.R.E.G

ANEXO A

Plano de distribución de las áreas de la granja Porkys



ANEXO B.

Plano de distribución en la granja Porkys, de la electricidad generada a partir de biogás en el planta diesel.

