



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS
GENERADOS POR EL GANADO VACUNO EN LA VAQUERÍA
101 PERTENECIENTE A LA EMPRESA PECUARIA “CAMILO
CIENFUEGOS” (PINAR DEL RÍO, CUBA)

Autor: Javier Hernández López

Tutores: Vicente Senosiáin Miquélez

Leonardo Aguilar Trujillo

Pamplona, 19 de Junio de 2014

Índice

Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	10
Índice de planos.....	13
1.Introducción.....	17
2.Diseño de la investigación.....	21
3.Marco teórico	25
3.1.La biomasa.....	25
3.1.1.Generalidades.....	25
3.1.2.Formas de conversión de la biomasa	25
3.1.3.Beneficios de la biomasa	26
3.2.El biogás	27
3.2.1.Generalidades.....	27
3.2.2.Historia del biogás	28
3.2.3.Beneficios del biogás	30
3.2.4.Situación actual de la tecnología de biogás.....	32
3.3.Producción de biogás.....	39
3.3.1.Digestión anaerobia	39
3.3.2.Factores que afectan a la producción de biogás	42
3.4.El biodigestor	48
3.5.Aprovechamiento del biogás.....	49
4.Caracterización de la Vaquería 101	55
4.1.Localización, clima, descripción y emplazamiento	55
4.1.1.Localización	55

4.1.2.Clima.....	58
4.1.3.Descripción y emplazamiento.....	58
4.2.Instalaciones.....	60
4.2.1.Establos.....	60
4.2.2.Sala de ordeño.....	62
4.2.3.Sala de refrigeración.....	63
4.2.4.Moledora de forraje.....	64
4.2.5.Casa del vaquero.....	64
4.2.6.Equipo para el baño de garrapaticida.....	65
4.2.7.Otros equipos.....	65
4.2.8.Resumen de equipos.....	65
4.3.Funcionamiento de la vaquería.....	66
4.3.1.Actividades.....	67
4.3.2.Diagrama de Gantt.....	67
5.Análisis del potencial de biogás.....	71
5.1.Levantamiento del potencial de biogás.....	71
5.1.1.Excreta generada.....	71
5.1.2.Cantidad de biomasa disponible.....	72
5.1.3.Volumen de biomasa disponible.....	72
5.1.4.Volumen de biomasa en el biodigestor.....	73
5.1.5.Volumen de biogás.....	73
5.1.6.Volumen total del biodigestor.....	74
5.2.Resultados del análisis.....	74
5.2.1.Excreta generada.....	74
5.2.2.Cantidad de agua necesaria.....	75

5.2.3.Cantidad de biomasa disponible.....	76
5.2.4.Volumen de biomasa disponible	76
5.2.5.Volumen de biomasa en el biodigestor	76
5.2.6.Volumen de biogás	76
5.2.7.Volumen total del biodigestor.....	76
6.Diseño del sistema de generación de biogás	79
6.1.Selección de la tecnología de generación de biogás.....	79
6.1.1.Tipos de biodigestor.....	79
6.1.2.Elección del tipo de biodigestor	84
6.2.Diseño del biodigestor.....	84
6.2.1.Partes del biodigestor	84
6.2.2.Dimensionamiento del sistema de generación de biogás.....	85
7.Elección de las tecnologías de aprovechamiento del biogás	95
7.1.Cocción de alimentos.....	95
7.1.1.Diseño y modificación de los quemadores	96
7.2.Iluminación	97
7.2.1.Ajuste de la lámpara	98
7.2.2.Problemas y precauciones.....	99
7.3.Generación de energía eléctrica.....	99
7.3.1.Generación con motores de combustión interna alternativos	101
7.3.2.Conversión de motores a biogás	102
7.3.3.Grupos electrógenos a biogás.....	103
7.3.4.Elección del equipo.....	105
8.Análisis de la demanda.....	109
8.1.Energía eléctrica	109

8.1.1.Levantamiento de cargas eléctricas	109
8.1.2.Demanda de biogás para energía eléctrica	113
8.2.Energía térmica.....	114
8.2.1.Demanda de biogás para cocinar	115
8.2.2.Demanda de biogás para iluminación.....	116
8.2.3.Resumen de los resultados	117
8.3.Conclusiones del análisis	118
9.Diseño del sistema de aprovechamiento del biogás.....	123
9.1.Elección de las formas de aprovechamiento	124
9.1.1.Prioridad de uso del biogás	124
9.1.2.Elección de las cargas eléctricas alimentadas por el grupo electrógeno a biogás	126
9.2.Aprovechamiento del biogás para los procesos térmicos.....	128
9.2.1.Cocina.....	128
9.2.2.Iluminación.....	129
9.3.Aprovechamiento del biogás para generación de electricidad	130
9.3.1.Parámetros de dimensionamiento	130
9.3.2.Elección del grupo electrógeno	132
9.3.3.Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno...	134
9.3.4.Caracterización del funcionamiento de la red eléctrica	138
9.3.5.Ahorro de electricidad	140
10.Descripción de los sistemas	143
10.1.Ubicación de la instalación.....	143
10.2.Sistema de generación de biogás	144
10.2.1.Cámara de carga	145
10.2.2.Biodigestores.....	145

10.2.3. Almacenamiento del efluente	146
10.2.4. Gasómetros	147
10.2.5. Quemadores	148
10.3. Alimentación de biogás a los procesos térmicos	149
10.3.1. Tuberías	149
10.3.2. Trampas de agua y pendientes de la tubería	150
10.3.3. Regulador de presión	151
10.4. Alimentación de biogás al grupo electrógeno	151
10.4.1. Filtro de Sulfuro de Hidrógeno	152
10.4.2. Tanque de combustible	153
10.5. Elementos de la cocina a biogás	154
10.6. Elementos de las lámparas de biogás	155
10.7. Elementos del grupo electrógeno	156
10.7.1. Líneas de inyección y de retorno	157
10.7.2. Sistema de escape	157
10.7.3. Cubierta	158
11. Análisis de viabilidad	161
11.1. Contexto económico	161
11.2. Inversión inicial	162
11.2.1. Sistema de generación del biogás	162
11.2.2. Sistema de aprovechamiento del biogás	164
11.2.3. Costes totales	165
11.3. Ahorro anual	165
11.4. Rentabilidad económica	166
11.5. Otras consideraciones	168

11.5.1.Aspectos favorables	168
11.5.2.Aspectos desfavorables.....	168
12.Conclusiones	173
Bibliografía	179
Anexo I: Biogás y biodigestores.....	183
I.1. Rendimiento de biogás según la especie animal.....	183
I.2. Comparación entre los tipos de biodigestor.....	184
I.3. Posibles problemas en una planta de biogás: Causas y soluciones	185
Anexo II: Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno a biogás ...	190
II.1 Rangos de potencia de un grupo electrógeno	190
Anexo III: Producción de electricidad en Cuba	193
III.1: Situación actual de la generación de electricidad y de la política energética en Cuba	193
III.2. Índices energéticos para estudios de factibilidad en Cuba.....	195

Índice de figuras

Figura 3.1: Mujer cocinando con biogás producido con estiércol animal en la India	34
Figura 3.2: Planta de biogás de 20 MW en Mecklenburg-Vorpommern (Alemania)	35
Figura 3.3: Bus urbano propulsado por biogás en Västerås (Suecia)	36
Figura 3.4: Biodigestor de cúpula fija en Guantánamo (Cuba)	37
Figura 3.5: Proceso de digestión anaerobia para la obtención de biogás	40
Figura 3.6: Papel para medir el pH de la muestra	43
Figura 3.7: Principales aplicaciones del biogás	49
Figura 4.1.: Mapa topográfico de Cuba	56
Figura 4.2.: Mapa de la provincia de Pinar del Río	57
Figura 4.3.: Municipio de Consolación del Sur	57
Figura 4.4.: Territorio perteneciente a la UEB “La Barbarita”	59
Figura 4.5.: Emplazamiento de la Vaquería 101	60
Figura 4.6: Plano de la Vaquería 101	61
Figura 4.7.: Motor eléctrico modelo AL-100L-4A	62
Figura 4.8.: Esquema del sistema de refrigeración de leche	63
Figura 4.9.: Moledora de forraje portátil con motor eléctrico	64
Figura 4.10: Diagrama de Gantt de los procesos diarios en la Vaquería 101	68
Figura 6.1: Biodigestor de cúpula fija	80
Figura 6.2: Etapas del proceso de producción de biogás en un digestor de cúpula fija	80
Figura 6.3: Biodigestor de cúpula flotante	82

Figura 6.4: Etapas del proceso de producción de biogás en un digester de cúpula flotante	83
Figura 6.5: Biodigestor de tipo Chino.....	84
Figura 6.6: Biodigestor de tipo Hindú.....	84
Figura 6.7: Partes del biodigestor de cúpula fija	85
Figura 6.8: Fórmulas para el dimensionamiento de la cámara de digestión.....	86
Figura 6.9: Cuello del biodigestor de cúpula fija.	89
Figura 6.10: Cámara de carga con sus diferentes partes.	91
Figura 6.11: Sistema de generación de biogás para la Vaquería 101.....	92
Figura 7.1: Cocinas de biogás de dos quemadores.....	96
Figura 7.2: Diferentes diseños de quemadores de biogás.....	97
Figura 7.3: Esquema de lámpara de biogás	98
Figura 7.4: Lámpara de biogás en Tailandia.	99
Figura 7.5: Motor de cuatro tiempos.	101
Figura 7.6: Grupo electrógeno a biogás de 3 kW.....	104
Figura 8.1: Modelo diario de demanda eléctrica en la Vaquería 101	112
Figura 8.2: Modelo de demanda eléctrica el día del baño de garrapaticida en la Vaquería 101	112
Figura 8.3: Esquema del biogás consumido para cubrir la demanda energética total en la Vaquería 101	117
Figura 8.4: Porcentajes del consumo de biogás de los diferentes procesos en la Vaquería 101	118
Figura 9.1: Uso del biogás producido en la Vaquería 101	125
Figura 9.2: Uso del biogás destinado a procesos eléctricos en la Vaquería 101	127

Figura 9.3: Modelo diario de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por el grupo electrógeno a biogás.....	128
Figura 9.4: Cargas agrupadas frente al rango de potencia del generador.....	137
Figura 9.5: Modelo diario de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por la red eléctrica en la Vaquería 101	140
Figura 9.6: Modelo de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por la red eléctrica el día del baño de garrapaticida en la Vaquería 101	140
Figura 10.1: Biodigestor de cúpula fija en proceso de construcción.....	146
Figura 10.2: Gasómetro de polietileno de bajo costo para almacenamiento de biogás.....	147
Figura 10.3: Esquema de quemador de la Vaquería 101	148
Figura 10.4: Trampa de agua en forma de T.....	150
Figura 10.5: Regulador de presión de gas.....	151
Figura 10.6: Filtro de sulfuro de hidrógeno para una planta de biogás	153
Figura 10.7: Cocina a biogás ISI Classic Double Burner de Rupak.....	154
Figura 10.8: Instalación de la cocina de biogás	155
Figura 10.9: Lámpara a biogás modelo KVIC Regular Indoor de Rupak.....	155
Figura 10.10: Grupo electrógeno modelo B4T-10000 Bioflex de Branco	156
Figura 10.11: Sistema de escape para ubicación exterior	158
Figura II.1: Rango de potencia standby.	191
Figura II.2: Rango de potencia primaria con tiempo de operación ilimitado	192
Figura II.3: Rango de potencia continua.	192

Índice de tablas

Tabla 3.1: Vías de transformación de la biomasa en energía.....	26
Tabla 3.2: Composición química del biogás.....	27
Tabla 3.3: Equivalencia energética de 1 m ³ de biogás.....	28
Tabla 3.4: Rendimiento teórico de algunos compuestos orgánicos (/g de material seco).....	41
Tabla 3.5: Rendimiento teórico de algunos materiales de fermentación (/g de material seco).....	42
Tabla 3.6: Relación C:N para diferentes tipos de biomasa.....	45
Tabla 3.7: Tiempo de retención hidráulico según temperatura.....	46
Tabla 3.8: Rangos óptimos de los factores que afectan a la producción de biogás.....	48
Tabla 3.9: Valor de combustión de algunos gases combustibles.....	51
Tabla 4.1: Valores promedio mensuales del clima en Pinar del Río.....	58
Tabla 4.2.: Resumen de Maquinaria.....	66
Tabla 4.3.: Resumen de Electrodomésticos.....	66
Tabla 5.1: Cantidad de excreta obtenida en cada una de las muestras realizadas en la Vaquería 101.....	75
Tabla 6.1: Dimensiones de cada biodigestor según el número de biodigestores en paralelo.....	88
Tabla 7.1: Comparación de tecnologías para la generación de electricidad con biogás.....	100
Tabla 8.1: Cargas eléctricas en la Vaquería 101.....	110
Tabla 8.2: Levantamiento de cargas por hora.....	111

Tabla 8.3: Biogás necesario diariamente para alimentar los equipos eléctricos de la Vaquería 101	114
Tabla 8.4: Índices de consumo de biogás según tipo de cocina y su uso en Cuba	116
Tabla 8.5: Resumen de demandas de energía en la Vaquería 101	117
Tabla 9.1: Biogás disponible para cada proceso de la Vaquería 101	125
Tabla 9.2: Especificaciones técnicas de la cocina a biogás.....	129
Tabla 9.3: Especificaciones técnicas de la cocina a biogás.....	129
Tabla 9.4: Especificaciones técnicas del grupo electrógeno a biogás	133
Tabla 9.5: Especificaciones del grupo electrógeno elegido.	136
Tabla 9.6: Rango de potencia del grupo electrógeno seleccionado	136
Tabla 9.7: Consumo eléctrico de las cargas alimentadas por la red eléctrica	139
Tabla 10.1: Pérdidas de presión en mm de columna de agua, por cada 10 m de tubería de PVC	150
Tabla 11.1: Costes de mano de obra para la construcción del sistema de generación de biogás.....	163
Tabla 11.2: Costes de materiales para la construcción del sistema de generación de biogás.....	164
Tabla 11.3: Coste de los elementos del sistema de aprovechamiento del biogás en la Vaquería 101	165
Tabla I.1: Rendimientos de biogás según la especie animal.....	183
Tabla I.2: Comparación entre el biodigestor de cúpula fija y cúpula flotante	184
Tabla I.3: Problemas, causas y soluciones de una planta de biogás de cúpula fija	189
Tabla III.1: Precio de los combustibles.....	195
Tabla III.2: Datos técnicos de combustibles	196
Tabla III.3: Equivalencias de diferentes combustibles	196

Tabla III.4: Bases para el cálculo del costo evitado de la electricidad consumida por el cliente final.197

Tabla III.5: Costo evitado de la electricidad consumida por el cliente final.198

Índice de planos

Plano N° 1	201
Plano N° 2	202
Plano N° 3	203

Introducción

1. Introducción

Dentro del modelo económico actual, el consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de la sociedad. El funcionamiento de dicho modelo lleva a un continuo crecimiento, y exige también una demanda creciente de energía. El concepto de "crisis energética" aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, si se siguiera dependiendo únicamente de ellas para abastecer la demanda energética se llegaría a un colapso del sistema, a no ser que el propio sistema pase a depender de las fuentes de energía "infinitas" que conocemos, como son las energías renovables. Por otro lado, las energías convencionales actuales como los derivados del petróleo o la combustión de carbón son fuentes muy importantes de contaminación. El uso masivo que se viene haciendo de ellas sigue ocasionando a día de hoy daños progresivos y en muchos casos irreversibles al medio ambiente, el aumento de los gases invernadero y la perforación de la capa de ozono, entre otros problemas.

El origen de todas las energías renovables son fuentes naturales como el sol, el agua, el viento y los residuos orgánicos, aunque sin duda el sol es el motor generador de todos los ciclos que dan origen a las demás fuentes. Las energías renovables se clasifican entonces según la fuente natural de la que proceden.

En economías de orientación agrícola, como las de los países centroamericanos, la tecnología del biogás se impone como una de las mejores alternativas dentro de las formas de conversión de biomasa, para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos, además de ser una solución para los problemas higiénico-ambientales que, en muchos casos, presentan los desechos orgánicos.

Dentro de Latinoamérica, Cuba es uno de los primeros países donde se introdujo la tecnología del biogás en las plantas de tratamiento de aguas negras, por lo que la tecnología del biogás ha sido aplicada e investigada desde la primera mitad del siglo XX. Con la creación de la Comisión Nacional de Energía en Cuba (1983) y sus filiales en las diferentes provincias se plantearon un grupo de medidas encaminadas al ahorro de energía y a la sustitución de los portadores energéticos convencionales, razón por la cual el biogás comenzó a replantearse de manera

generalizada para un grupo importante de empresas e instalaciones dispersadas por todo el país.

En la actualidad Cuba, con miles de plantas de biogás instaladas, exhibe un desarrollo en el conocimiento, uso, diseño y construcción de estas obras que le permite orientar los resultados obtenidos hacia la cooperación solidaria y la integración, en pos de una infraestructura encaminada a mantener los resultados alcanzados, capacitar a profesionales de todo el país, abaratar el costo de estas instalaciones haciéndolas accesibles a cualquier campesino, desarrollar nuevos y adecuados diseños, y establecer una política adecuada para la generalización de la tecnología del biogás de manera sostenible.

La Vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos, ubicada en la provincia cubana de Pinar del Río, no cuenta en la actualidad con un estudio del potencial de biomasa que produce el ganado de sus vaquerías, y no aprovecha el potencial de biogás que genera dicha biomasa para cubrir sus necesidades energéticas. En la provincia de Pinar del Río ya existe una significativa difusión de la tecnología, con más de 80 plantas de biogás instaladas y logrando buenos resultados, y la empresa Camilo Cienfuegos desea sumarse a ésta iniciativa y aplicar la tecnología del biogás a sus diversas vaquerías para así aprovechar sus numerosos beneficios.

Diseño de la investigación

2. Diseño de la investigación

Problema

En la Vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos no existe un aprovechamiento energético de la excreta producida por el ganado vacuno, que se desecha con el consiguiente daño ecológico. La energía necesaria para los diferentes aparatos y máquinas (máquinas de ordeño, refrigeración, bombas, iluminación, cocina) se toma de la red eléctrica, con lo que el funcionamiento de la granja no es sostenible.

Hipótesis

A partir de la determinación del potencial de biomasa generado por el ganado vacuno y el diseño de el/los biodigestores, podemos estimar el potencial de biogás y seleccionar la tecnología que permita el aprovechamiento del mismo para cubrir total o parcialmente las diferentes necesidades energéticas de la Vaquería 101 de la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos.

Objeto

Biomasa producida por el ganado vacuno de la Vaquería 101 de la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos.

Campo de acción

Aprovechamiento energético del biogás generado por la digestión anaerobia de los residuos sólidos generados en la Vaquería 101 de la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos.

Alcance

Son objetivos del presente proyecto:

- Revisar de las experiencias disponibles acerca de la generación de biogás en biodigestores de bajo costo, y el aprovechamiento del biogás para cubrir las necesidades energéticas que se dan en la Vaquería 101.

- Determinar el potencial de biomasa generado por el ganado vacuno de la Vaquería 101 .
- Diseñar el sistema de generación de biogás a partir de los residuos sólidos de la Vaquería 101, estimando el potencial de biogás existente.
- Seleccionar y caracterizar los equipos necesarios para aprovechar el biogás generado en la Vaquería 101 para:
 1. Cocción de alimentos
 2. Iluminación por medio de lámparas de biogás.
 3. Generación de energía eléctrica
- Estimar si se pueden cubrir las principales necesidades energéticas de la Vaquería 101, y en el caso de que así fuera, intentar dar otros usos secundarios al potencial de biogás sobrante.
- Evaluar la viabilidad del sistema propuesto.

No son objetivos del presente proyecto:

- Proporcionar la suficiente información para construir la planta de biogás diseñada.
- Diseño técnico de los sistemas de aprovechamiento del biogás elegidos.
- Estudiar usos de los productos secundarios del biodigestor (bioabono).

Marco teórico

3. Marco teórico

3.1. La biomasa

3.1.1. Generalidades

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. La biomasa es producida de forma cíclica y continua, y las fuentes que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, los residuos agrícolas como la leña y el carbón vegetal, así como los residuos animales.

3.1.2. Formas de conversión de la biomasa

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. Los procesos de conversión más relevantes pueden clasificarse en tres categorías:

- **Procesos físico-químicos:** En este grupo podemos nombrar la densificación (compactación de la biomasa en “briquetas” para facilitar su uso, almacenamiento y transporte).
- **Procesos termoquímicos:** Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. Algunos de ellos son la combustión (los más antiguos y comunes hasta hoy, utilizados para generar calor), la producción de carbón vegetal y la gasificación (para la producción de “gas pobre”).
- **Procesos bioquímicos:** Utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Los más importantes son la digestión anaerobia (digestión de la biomasa por bacterias en un ambiente sin oxígeno, dentro de un contenedor llamado digestor, para la producción de biogás), la producción de combustibles alcohólicos (etanol por la

fermentación de azúcares y metanol por la destilación de madera), y la producción de biodiesel (ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas).

En la siguiente tabla podemos ver las diferentes formas de conversión de la biomasa en relación con la procedencia:

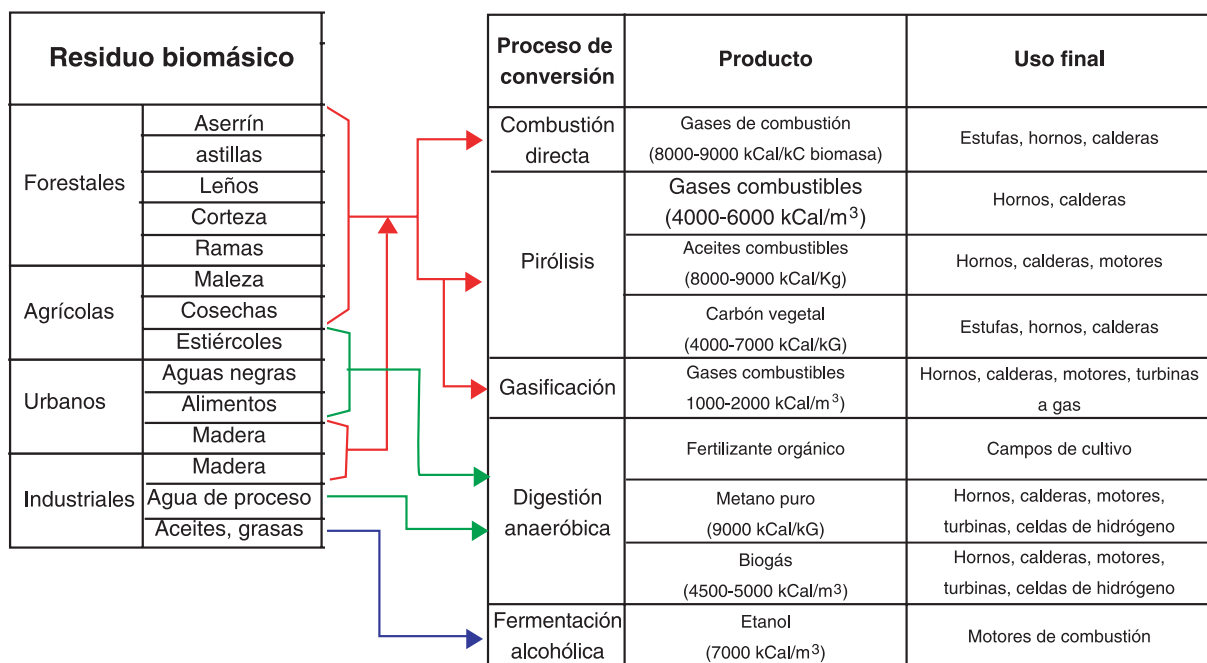


Tabla 3.1: Vías de transformación de la biomasa en energía. [5]

3.1.3. Beneficios de la biomasa

Las diferentes formas de biomasa pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura y logrando importantes beneficios ambientales. En 1995 el consumo energético mundial de biomasa suponía el 14% del consumo total de energía, y se prevé que esta cifra puede aumentar hasta un 22% en 2060, y hasta un 46% en 2100. Actualmente, el 90% de la biomasa se consume en países en vías de desarrollo y el 10% restante en el mundo industrializado.

Las comunidades rurales pueden ser, entonces, energéticamente autosuficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad.

3.2. El biogás

3.2.1. Generalidades

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de degradación de la materia orgánica (biomasa) mediante la acción de microorganismos y otros factores, en un ambiente anaerobio, es decir, en ausencia de oxígeno. A dicho proceso de degradación se le denomina digestión anaerobia.

El biogás está compuesto por alrededor de 60 % de gas metano (CH_4) y 40 % de dióxido de carbono (CO_2) con mínimas cantidades de otros compuestos. Sus valores límite se indican en la siguiente tabla:

Elemento	%
Metano (CH_4)	50-70
Dióxido de Carbono (CO_2)	30-50
Nitrógeno (N_2)	0,5-3
Acido Sulfhídrico(H_2S)	0,1-1
Vapor de Agua (H_2O)	Trazas

Tabla 3.2: Composición química del biogás. [2]

Esta composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones de operación de los reactores donde ocurre la transformación.

El metano contenido en el biogás hace que pueda ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos en cocinas adaptadas como para el alumbrado mediante lámparas adaptadas. Mezclas de biogás con aire en una relación 1:20 forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados. Sin embargo, únicamente puede utilizarse como combustible cuando la concentración de metano supera el 50%, ya que con concentraciones más bajas del mismo el biogás deja de ser inflamable [2].

El metano es un 20 % más ligero que el aire, incoloro e inodoro, tiene una temperatura de ignición en el rango de 650 - 750 °C, y combustiona con una llama azul clara libre de humo, que alcanza una temperatura de 870 °C [8].

Su Poder Calorífico Inferior (PCI) está entre 20.000 y 23.000 kJ/m³ (alrededor de 6 kWh/m³). En la *Tabla 3.3* podemos ver las equivalencias energéticas entre el biogás y algunos combustibles comerciales:

Fuente de energía	Equivalencia
Gasolina	0.75 litros
Keroseno	0,62 litros
Alcohol	1,10 litros
Gas Natural	0.76 m ³
Carbón vegetal	0.7 kg
Madera	1.3 kg

Tabla 3.3: Equivalencia energética de 1 m³ de biogás. [7]

Dado que el consumo específico de un grupo electrógeno a biogás suele estar entre 0,55 y 0,7 m³/kWh, un metro cúbico de biogás permite generar entre 1,4 y 1,8 kWh.

3.2.2. Historia del biogás

Las primeras menciones históricas al biogás datan del siglo XVII, cuando Van Helmont en 1630 y Shiley en 1667 descubrieron un tipo de gas inflamable al que se llamó “gas de los pantanos”, generado por la descomposición de materiales orgánicos. Alessandro Volta, en 1776, fue el primer investigador en describir científicamente la producción de gas combustible en lodos y sedimentos lacustres, concluyendo que las cantidades de gases generados dependían estrictamente de la cantidad de plantas podridas en el fondo [10].

Entre 1804 y 1810, Dalton, Henry y Davy expresaron la fórmula química del metano y demostraron que la naturaleza del “gas de los pantanos” en el experimento de Volta era idéntica al gas en las minas de carbón. El propio Davy ya producía metano en un laboratorio de la India en 1808 [1].

A finales del siglo XIX se empezó a prestar una mayor atención a los fenómenos de producción de biogás y fueron numerosos los científicos que se sumaron a las investigaciones de dichos fenómenos. En 1886, Omelianski comprobó la formación de metano a partir de estiércol de vacas, mientras que en 1888 Gayon obtuvo gas al mezclar estiércol y agua, a una temperatura de 35 °C. Soehngen describió en 1906 los primeros dos organismos que participaban en la formación de metano [10].

Las primeras instalaciones para la producción de biogás conocidas datan de la segunda mitad del siglo XIX. En 1859 se construyó el primer equipo de biogás en Bombay, India, dirigido al tratamiento de estiércol humano [4]. En 1896 las lámparas de alumbrado público de la localidad inglesa de Exeter eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos del sistema de cloacas de la ciudad [11].

Durante las Guerras Mundiales, las grandes potencias aumentaron considerablemente la inversión en el desarrollo de fuentes de energía. Debido a esto, en la Primera Guerra Mundial (1914-1918) las instalaciones para la obtención de metano en las haciendas y fincas a partir de estiércoles animales se extendieron por Inglaterra, mientras que en Alemania, el primer biodigestor conocido fue construido por Imhoff. Así mismo, en la Segunda Guerra Mundial (1939-1944), científicos alemanes e italianos desarrollaron vehículos propulsados con motores de biogás. Además, comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural en Europa, y en mayor medida en China e India, que se transforman en líderes mundiales en la materia [12].

Sin embargo, en los años próximos el avance de ésta tecnología se ve interrumpido, ya que las potencias mundiales comienzan a tener fácil acceso a los combustibles fósiles y dejan de considerar necesaria la inversión en fuentes de energía alternativas. No es hasta 1973, con la crisis energética por los altos precios del petróleo, que se volvió gradualmente a la investigación y extensión del biogás como fuente de energía viable para el mundo contemporáneo [2].

A partir de entonces y hasta la actualidad, el desarrollo de las tecnologías de biogás ha sido continuo y significativo, consolidándose como una fuente de energía sólida y bien conocida a nivel mundial. Los países generadores de tecnologías de biogás más importantes hoy en día son China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania [11].

3.2.3. Beneficios del biogás

Sociales

El uso del biogás proporciona al usuario independencia como consumidor energético y de fertilizantes químicos, con una integración total de los recursos aprovechables, dentro del ciclo productivo y social.

En zonas rurales subdesarrolladas principalmente, el uso del biogás mejora significativamente la calidad de vida de las familias. Sirve como combustible sustitutivo a la leña, y utilizándolo en la cocina se eliminan humos y otras sustancias perjudiciales para la salud, ahorra tiempo y facilita las tareas cotidianas contribuyendo a una vida rural más civilizada. Mejora considerablemente las condiciones higiénicas y sanitarias en la vivienda, reduciendo los malos olores provocados por los residuos y evitando la creación de unas condiciones favorables para la proliferación de enfermedades.

Por otro lado, la instalación de biodigestores permite la implementación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, y además crea nuevos puestos de trabajo en las comunidades para realizar labores de producción, mantenimiento, administración y transferencia de la tecnología.

Energéticos

El biogás, con un contenido de metano del 50 - 70%, puede utilizarse como combustible en cualquier aparato preparado para el funcionamiento con gas.

Es un combustible limpio que proporciona una llama libre de humo y hollín, y por tanto es adecuado para su uso en cocinas de gas, iluminación con lámparas adaptadas o utilización en motores de combustión interna, para equipos como grupos de generación eléctrica, vehículos, incubadoras, refrigeradores, calefacción, etc. También existen equipos de cogeneración de biogás, en los que se genera tanto electricidad como calor buscando la mayor eficiencia posible en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás.

Así pues, con el biogás podemos producir energía limpia y renovable, proporcionando independencia energética al consumidor y evitando la utilización de combustibles fósiles y de energía eléctrica proveniente de fuentes no renovables.

Medioambientales

Se trata de una tecnología limpia que no sólo no genera residuos, sino que su principal objetivo es el tratamiento responsable de éstos con el objetivo de generar materias primas.

Se reducen las de emisiones incontroladas de gases de efecto invernadero, principalmente CH₄ (que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO₂) y CO₂ por la sustitución de combustibles fósiles, y la contaminación del agua al evitar el vertido de residuos en ríos o lagos. Además se reduce el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) hasta en un 90% (dependiendo de las condiciones de diseño y operación)¹.

También se reduce la deforestación al sustituir a la madera como principal combustible para la cocción de los alimentos, especialmente en zonas rurales.

Económicos

Los biodigestores de bajo costo se caracterizan por ser económicamente viables en regiones subdesarrolladas que dispongan de materia prima suficiente. Este tipo de biodigestores se caracteriza por su mínimo coste de instalación y mantenimiento, ya que requiere exclusivamente de materiales locales y puede ser construido y supervisado por mano de obra local que haya recibido una formación previa.

La rentabilidad económica del biogás en España es de 0,046949 €/kWh². Teniendo en cuenta que un m³ de biogás equivale a alrededor de 1,6 kWh, el beneficio económico generado sería de 0,0751184 €/m³ de biogás.

Agricultura

Los lodos procedentes del biodigestor tras el proceso de fermentación son ricos en Amonio (NH₄₊), fósforo (P), potasio (K), y otros nutrientes fácilmente asimilables por las plantas. Esto hace que dicho efluente, llamado bioabono, pueda utilizarse como un fertilizante de calidad, limpio e inocuo, permitiendo incrementar en más de un 25 % el rendimiento de las cosechas o huertos, siendo mejor que otros

¹ Fuente: www.wikipedia.com, Noviembre 2012

² Fuente: Iberdrola, 2010

fertilizantes orgánicos como el compost. Sin embargo, se deberá controlar su utilización ya que, si el terreno ya se encontrara saturado de alguno de los nutrientes mencionados, la utilización del bioabono podría producir una sobresaturación de dicho nutriente que sería perjudicial para la cosecha.

En el control de plagas y enfermedades de cultivos, el líquido digerido puede utilizarse como biofertilizante con lo que se consigue una reducción de las poblaciones de insectos de más del 55 %. Mezclado con insecticida, el efecto es todavía mayor.

El biogás también puede utilizarse para la conservación de granos en cámaras inundadas por el gas, de manera que la atmósfera se hace irrespirable para los insectos, y en la fertilización de algas por burbujeo del gas en un estanque [13].

Ganadería

Los residuales del biogás son ricos en vitaminas, proteínas y otros micronutrientes orgánicos y se pueden emplear de modo directo en la alimentación de animales. Se utilizan para ganado porcino mezclado con alimento para cerdos; en piscicultura aumenta la capacidad de crianza de peces en un mismo volumen de agua, ya que el bioabono ya digerido no consume oxígeno del agua y además fomenta el crecimiento de fitoplancton; y como alimento para la crianza de lombrices, aumentando el rendimiento de las mismas.

3.2.4. Situación actual de la tecnología de biogás

Millones de plantas de biogás han sido instaladas durante las dos últimas décadas a lo largo de todo el mundo, financiadas y dirigidas por un gran número de programas nacionales e internacionales. La transferencia de conocimientos y capacidades no es solamente una operación Norte a Sur, sino también Sur a Sur, como la India, que promueve su tecnología en Camboya.

Los países generadores de tecnología más importantes en la actualidad son China, India, Alemania, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU. y Brasil.

China

China es el líder mundial en la aplicación de las tecnologías de digestión anaeróbica de la biomasa, en términos cuantitativos. A parte de los más de 7

millones de pequeñas plantas de biogás instaladas en comunidades rurales, existen además más de un millar de plantas de producción a gran escala que utilizan desechos industriales principalmente [13]. El principal propósito de las mismas es reducir los problemas de acumulación de residuos producidos por el gran número de industrias del país, y el gas se usa mayoritariamente para la cocción de alimentos, calefacción e iluminación. Solamente una pequeña parte de las plantas son destinadas a la producción de electricidad, siendo las plantas con capacidades superiores a 0,5 MW las únicas autorizadas a conectarse a la red [14].

Existen un gran número de programas de desarrollo y financiación funcionando en China, tanto a nivel nacional como internacional. El principal programa implementado por el gobierno chino es el *National Development and Research Commission* (NDRC), que estableció en 2005 unos ambiciosos objetivos globales para la energía limpia china hasta 2020. En cuanto al biogás, la producción nacional en 2005 era de 8 billones de m³, siendo el objetivo llegar a los 40 billones de m³ en 2020. Un estudio reciente de *New Energy Finance* predice el cumplimiento dichos objetivos en todos los campos, incluida la tecnología de biogás [REW, Enero 2007]. Por otro lado, uno de los principales programas internacionales implementados es el *Sino-German Project on Optimization of Efficient Biomass Utilization*, a cargo de la alemana GTZ, que pretende mejorar el estándar técnico y el rendimiento de plantas de biogás de mediana y gran escala, entre 2009 y 2013.

India

India es el otro gran productor asiático de biogás, con extensa experiencia en plantas de biogás siendo uno de los pioneros desde los tiempos de las primeras investigaciones en la tecnología. Más de 1,8 millones de digestores familiares fueron instalados en la década de los 90, pero alrededor de un tercio de los mismos no funcionaban en 2000. Aun así, más de 500.000 familias se abastecen actualmente de energía producida por biogás, en sustitución de combustibles domésticos tradicionales [14].



Figura 3.1: Mujer cocinando con biogás producido con estiércol animal en la India. [14]

También se está empezando a producir biogás a partir de los desechos industriales. Un gran número de granjas lecheras, que durante muchos años habían sido una fuente importante de contaminación para los ríos, está usando ahora la metanización para procesar el estiércol animal y otros desechos, y el biogás resultante se usa para generar energía. En la actualidad se han instalado también plantas para el uso de las aguas residuales de algunas destilerías.

Alemania

Alemania es la principal potencia europea en biogás, siendo la más importante a nivel mundial en cuanto a producción de electricidad y co-generación a gran escala. El gobierno impulsó el desarrollo de la tecnología con la introducción de una tarifa que garantizaba un precio base de 0,11 € por kWh generado (además de extras), para plantas de más de 150 kW.

En 2009 había más de 4.500 plantas de generación de electricidad con biogás instaladas, con una potencia instalada de más de 1.500 MW, utilizando tecnología avanzada y “know-how” específico. El tamaño de las plantas de generación ha crecido rápidamente, de una media de 60 kW en 1999 a 300 kW en 2009, debido al decrecimiento del coste específico de plantas más grandes. En la *Figura 3.4* podemos ver la planta de biogás de Mecklenburg-Vorpommern, la planta de mayor potencia en Europa.



Figura 3.2: Planta de biogás de 20 MW en Mecklenburg-Vorpommern (Alemania)

Hoy en día, la viabilidad de las plantas de biogás alemanas depende en gran medida del potencial de venta de energía calorífica además de electricidad, por lo que las plantas de co-generación (electricidad y calor) han sido ampliamente desarrolladas [14].

Otros países

Existen iniciativas interesantes en otros países como Suecia, donde se está usando en la producción de biogás también los subproductos de cultivos tales como el trigo y la alfalfa. En la ciudad sueca mayoritariamente agrícola de Västerås, se tratan desde 2005 los residuos procedentes de los cultivos en una planta de biogás a gran escala. Con el sistema integrado adaptado a la ciudad se consigue una producción de biocombustible equivalente a 2,3 millones de litros de petróleo al año para el transporte público, camiones de la basura y 500 vehículos particulares, generación de calor y electricidad, y un valioso fertilizante para las granjas locales. Este sistema servirá de modelo en Suecia, que tiene previsto independizarse completamente de los combustibles fósiles en los próximos 20-30 años³.

³ Fuente: Revista “Renewable Energy World”, Noviembre 2006



Figura 3.3: Bus urbano propulsado por biogás en Västerås (Suecia)

Los países industrializados europeos tienen algunos programas de divulgación para el uso de los biodigestores, y han construido plantas de biogás más grandes y con un control más elaborado. Estos países tienden más a usar los lodos de aguas residuales, los desechos municipales sólidos o las aguas orgánicas residuales de origen industrial. Por otro lado, el gas producido en los rellenos sanitarios está continuamente cobrando importancia principalmente en Austria, Francia, Finlandia, el Reino Unido y los Estados Unidos.

En el continente africano Kenya y Tanzania son los principales productores de biogás, que se usa tradicionalmente a pequeña y muy pequeña escala para proveer energía doméstica y abastecer instituciones sociales con combustible para cocinas, calefacción e iluminación.

Dentro de América, Brasil es uno de los países cuyo mercado de energía de la biomasa es más avanzado. El biocombustible es producido a partir de caña de azúcar en cientos de plantas de más de 1 MW. Dado el gran porcentaje de población rural tanto en este país como en todo Latinoamérica, los biodigestores familiares han sufrido también un importante crecimiento en las últimas décadas [14].

Cuba

Cuba está entre los países latinoamericanos de mayor potencial bioenergético aprovechable de residuales agropecuarios. El potencial de biogás en las

condiciones actuales está en el orden de 152.000 toneladas de combustible convencional por año, proveniente de unos 78 millones de m³ de vertidos y biodegradables que constituyen hoy en día, en su conjunto, una de las principales fuentes de descontaminación del país [11].

En la actualidad Cuba presenta una elevada dependencia energética de los combustibles fósiles. La mitad del petróleo que consume anualmente el país se destina a generar electricidad: Cuba consume 140,000 barriles diarios de productos refinados y 70,000 se destinan al sector eléctrico. Por ello, el aprovechamiento del potencial de biogás en el país puede contribuir notablemente a cambiar esta situación y trazar el camino hacia un sistema energético sostenible.

Se han llevado a cabo numerosas iniciativas para la difusión de la tecnología de biogás en Cuba, principalmente por parte de la Sociedad Cubana para la promoción y desarrollo de las Fuentes Renovables de Energía (Cubasolar), la Sociedad de Ingeniería Hidráulica de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción Cubana (UNAICC), así como a través de talleres y eventos promovidos al efecto. También se han puesto en marcha proyectos de colaboración que han permitido dar los primeros pasos en la infraestructura y cooperación nacional, buscando la integración con la acción participativa de los usuarios para ayudar a resolver las crisis ambientales y energéticas de los años venideros [2].

Al cierre del año 2006, existían en el país 620 biodigestores de diferentes tipos, de los cuales solamente funcionaban 262 [6].



Figura 3.4: Biodigestor de cúpula fija en Guantánamo (Cuba)

Los avances que se han logrado desde entonces permiten valorar la situación actual de la siguiente manera:

- Existen más de 700 unidades de biogás construidas por diferentes actores, de diferentes materiales, tipos y modelos.
- Más del 50 % de los dispositivos construidos no funcionan, y más del 95% de los que funcionan se emplean, exclusivamente, en la cocción de alimentos.
- La gran mayoría de las plantas construidas obedecen a proyectos de colaboración, donde no siempre prima el sentido de pertenencia.
- El mayor porcentaje de las plantas que funcionan y se mantienen por más de 5 años han sido subvencionadas por los propios usuarios, y son del tipo cúpula fija.

En 2009, la planta de mayor rendimiento en Cuba era la de la Empresa Pecuaria de Nazareno, la cual está formada por una batería de 5 digestores con una producción total de alrededor de 237,5 m³ de biogás [11].

En la Provincia de Pinar del Río existen en la actualidad alrededor de 80 plantas de biogás, que se encuentran ubicadas en pequeñas instalaciones de criadores particulares y en centros estatales que destinan el gas principalmente a la cocción de los alimentos y al alumbrado. El potencial de biogás existente en la provincia es de 1200 m³/día en el sector estatal y de 1331 m³/día en el sector particular o privado [15].

A través de un esfuerzo realizado entre el Centro de Estudios de Energía Renovable y Tecnologías Sostenibles, el Gobierno, el Partido, profesionales de diferentes entidades, y las sedes municipales, existe un programa en la provincia que consta de varias etapas:

- Escuela Itinerante de Energía Renovable ofreciendo cursos, conocimientos, materiales en soporte electrónico y asistencia técnica a productores individuales y comunidades.
- Levantamiento de las potencialidades producción de biogás.
- Elaboración de proyectos con incidencia en los municipios.
- Innovación y ayuda en la construcción de biodigestores rudimentarios para obtener energía térmica.
- Movimiento para solucionar las dificultades técnicas de los biodigestores instalados que no están en funcionamiento.

3.3. Producción de biogás

3.3.1. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , entre otros), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, entre otros) y compuestos de difícil degradación que constituyen el efluente.

Todos los materiales orgánicos que pueden ser empleados como ceno de fermentación están compuestos, en su mayor parte, por carbono (C) y nitrógeno (N). La relación entre ambos tiene gran influencia sobre la producción de biogás.

Al añadir agua aumenta la fluidez del material de fermentación, lo cual es importante para lograr un proceso de fermentación más eficiente y, por tanto, una mayor producción de biogás. En un ceno de fermentación líquido las bacterias de metano llegan con mayor facilidad al material de fermentación fresco, lo que acelera el proceso. Es importante que la proporción de agua sea la adecuada en función del tipo de materia orgánica utilizada⁴.

Etapas de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia puede dividirse en tres etapas: la hidrólisis, la formación de ácidos o acidogénesis y la producción de metano o metanogénesis, y en ellas participan cuatro grupos de bacterias: las hidrolíticas, las acidogénicas, las acetogénicas y las metanogénicas.

Las bacterias anaerobias responsables de la digestión no pueden sobrevivir con la más mínima traza de oxígeno. Así, debido al oxígeno presente en la mezcla de estiércol que alimenta al digestor, debe pasar un período de tiempo antes que la digestión efectivamente se realice. Durante este período inicial aerobio, las trazas de oxígeno se consumen por las bacterias afines al oxígeno. Después de que el oxígeno ha desaparecido completamente, el proceso de digestión puede comenzar. A medida que estos diferentes tipos de bacterias se van activando en el transcurso del proceso de digestión, los productos de un tipo de bacterias

⁴ Véase *Anexo I.1*.

proporcionan el alimento para otra población bacteriana. En el esquema siguiente se aprecian las diferentes fases del proceso:

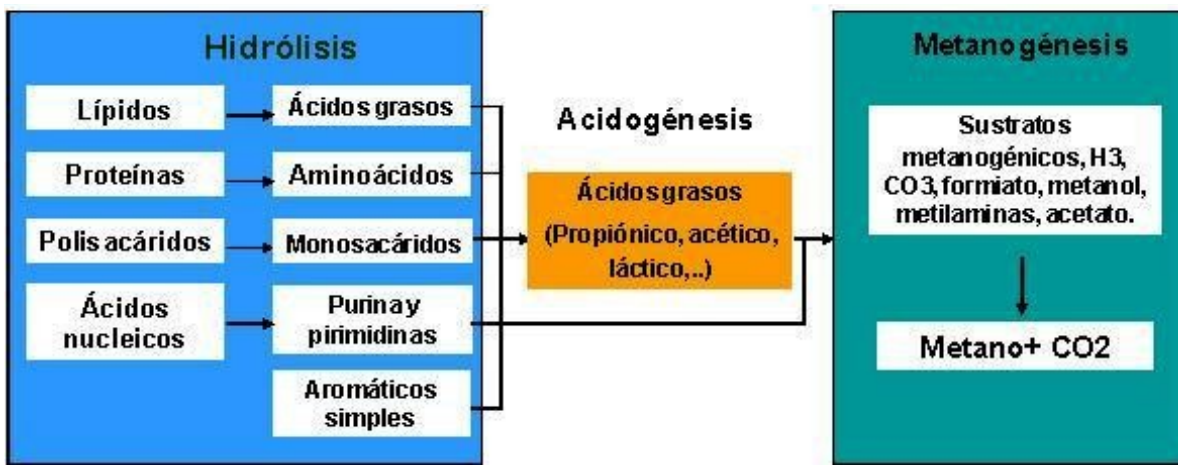


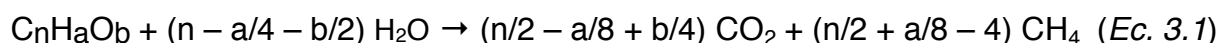
Figura 3.5: Proceso de digestión anaerobia para la obtención de biogás. [8]

- **Hidrólisis:** Un primer grupo de organismos se responsabiliza en hidrolizar los polímeros, proteínas y lípidos en unidades estructurales como ácidos grasos, monosacáridos, aminoácidos y compuestos relacionados. Se transforman los compuestos de mayor masa molecular en compuestos adecuados para su uso, como fuente de energía y tejido celular.
- **Acidogénesis:** Un segundo grupo de bacterias anaerobias (acidógenas), fermentan los productos descomponibles del primer grupo en ácidos orgánicos simples, de menor masa molecular, el más común de los cuales en la digestión anaerobia es el ácido acético.
- **Metanogénesis:** Las bacterias metanogénicas convierten los ácidos volátiles provenientes de la fase intermedia en el producto final, el biogás, formado principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). No todos los ácidos volátiles y compuestos orgánicos solubles se transforman en biogás; algunos pasan a formar parte del efluente.

Rendimiento del proceso de digestión anaerobia

Los materiales que se empleen para la fermentación a biogás son compuestos orgánicos diferentes, entonces, sus productividades no son iguales. La relación entre los compuestos orgánicos de materiales de la descomposición y su productividad es un factor importante para determinar el rendimiento del proceso

de producción del biogás. La ecuación estequiométrica de Boswel (1981) es aplicable en este caso [4]:



Aunque los tipos de materia orgánica son abundantes, sus principales componentes normalmente son carbohidratos, proteínas y lípidos.

	CH ₄	CO ₂
Carbohidratos	0,37	0,37
Proteínas	0,49	0,49
Lípidos	1,04	0,36

Tabla 3.4: Rendimiento teórico de algunos compuestos orgánicos (/g de material seco). [4]

Por lo tanto, la fórmula aplicada para el cálculo del rendimiento teórico es la siguiente:

- **Metano:**

$$D = 0,37 A + 0,49 B + 1,04 C \quad (Ec. 3.2.)$$

donde:

D: Rendimiento teórico de metano producido de un gramo del material de descomposición.

A: Cantidad de carbohidrato que contiene un gramo del material de fermentación (g).

B: Cantidad de proteína que contiene un gramo del material de fermentación (g).

C: Cantidad de lípido que contiene un gramo del material de descomposición (g).

- **Dióxido de carbono:**

$$E = 0,37A + 0,49B + 0,36C \quad (Ec. 3.3.)$$

donde:

E: Rendimiento teórico de CO₂ producido de un gramo de material.

A, B, C: Mismos elementos de la Ecuación 3.2.

En la tabla siguiente podemos ver los rendimientos de metano y dióxido de carbono de algunos de los materiales de fermentación más comunes.

	Componentes (g secos)			Rendimiento (L/g)	
	Carbohidratos	Proteínas	Lípidos	CH ₄	CO ₂
Jacintos acuáticos	0,607	0,117	0,039	0,322	0,296
Algas	0,596	0,097	0,027	0,396	0,278
Tallos de maíz	0,626	0,063	0,046	0,311	0,279
Pajas de trigo	0,637	0,030	0,023	0,276	0,260
Pajas de arroz	0,603	0,032	0,032	0,272	0,250
Estiércol humano	0,416	0,175	0,081	0,324	0,269
Estiércol de puerco	0,420	0,115	0,060	0,275	0,234
Estiércol aviar	0,470	0,088	0,046	0,265	0,233
Estiércol de perros	0,454	0,095	0,028	0,244	0,224
Estiércol de ganado	0,270	0,105	0,053	0,206	0,170

Tabla 3.5: Rendimiento teórico de algunos materiales de fermentación (/g de material seco). [4]

3.3.2. Factores que afectan a la producción de biogás

El pH (grado de acidez)

Los sistemas biológicos deben ser operados de forma que se favorezca el crecimiento de la población microbiana, y por tanto el pH del medio debe ser tal que permita el crecimiento óptimo de los microorganismos.

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones en acidez/alcalinidad de la mezcla del digestor, mientras que las acidogénicas resisten mejor estas variaciones. Para un funcionamiento óptimo, el valor de pH de la mezcla debe mantenerse dentro del rango de 6.6 a 7.6, esto es, de neutral a ligeramente alcalino [13].

Durante el proceso de digestión, se producen ácidos grasos volátiles (AGV) que, si no se controlan, pueden acumularse y provocar la disminución gradual del pH de la

mezcla, lo que puede inhibir los procesos bacterianos y enzimáticos. La resistencia al cambio del pH depende del equilibrio CO_2 - bicarbonato de la mezcla.

Por tanto, la regulación del pH en el rango deseado se logra agregando regularmente a la mezcla materiales alcalinos, tales como agua con cal o cenizas. Otro método consistiría en detener la alimentación del digestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV hasta que el pH vuelva a un nivel adecuado [8].

El grado de acidez de la mezcla puede ser determinado con bastante precisión con una prueba de papel de pH a una muestra del medio. Al mojar el papel con la muestra, éste adquirirá un color con el cual podremos saber el pH de la mezcla mirando en el círculo de referencia.



Figura 3.6: Papel para medir el pH de la muestra

Temperatura

La temperatura del proceso marca la actividad de las bacterias que digieren los residuos. Cuanto menor sea la temperatura, menor actividad tendrán éstas, y por tanto será necesario que residuo permanezca más tiempo en el interior del biodigestor. Para los digestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos.

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales:

- Psicrófilico: de 10 a 25 °C (temperatura ambiente).
- Mesófilico: de 30 a 40 °C.
- Termófilico: de 45 a 60 °C.

El rango de temperaturas a las que se desarrollan las bacterias metanogénicas, que son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor, es de 35 a 55 °C. La mayoría de autores coinciden en que la temperatura óptima para el crecimiento de las bacterias y la producción de metano estaría alrededor de los 30 - 35 °C, es decir, en el rango mesofílico.

La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogás es mayor que la mesofílica, por lo que los biodigestores termofílicos pueden ser de menor volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general. Sin embargo, existen pocas especies bacterianas capaces de crecer en ese rango de temperaturas y, además, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales.

Teniendo en cuenta estos rangos de temperatura, lo más importante es determinar la necesidad de un sistema de calefacción externo o un sistema de enfriamiento en función del clima del lugar en el que el biodigestor va a ser situado. Para el clima cubano, con una temperatura promedio de 25 °C, algunos autores aplican un factor de corrección de 1,3 para el cálculo del volumen necesario de digestión, aunque casi todos los biodigestores funcionan en los límites de temperatura mesófilas. Por tanto, la digestión ocurre cerca de su temperatura óptima (35 °C), y no es necesario instalar un sistema complementario para regular la temperatura de operación [1].

Nutrientes

Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren principalmente de nitrógeno entre otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. El carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células, y la relación carbono - nitrógeno de la mezcla es un parámetro importante para conseguir una adecuada digestión de la materia orgánica [1].

Las bacterias utilizan el carbono con una rapidez 30 veces mayor que el nitrógeno. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las bacterias metanogénicas, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, si hay demasiado carbono en la biomasa el proceso se hace lento y tiende a acidificarse. Por otro lado, si hay demasiado nitrógeno éste se perderá como amoníaco, elevando el pH e inhibiendo así la actividad bacteriana [8].

Los materiales con diferentes relaciones de C:N difieren en gran medida en la producción de biogás. En la *Tabla 3.5.* se dan las relaciones C:N para algunos tipos de biomasa:

Tipo de biomasa	Relación C:N
Cerdo	3:1 - 9:1
Vacuno	10:1 - 20:1
Gallina	5:1 - 8:1
Humano	8:1
Vegetales	35:1

Tabla 3.6: Relación C:N para diferentes tipos de biomasa. [13]

Se considera que la relación molar óptima C:N está entre 10:1 y 30:1.

Además de esto, las bacterias también requieren de una cantidad de fósforo en una relación molar aproximada N:P de 5:1, y metales alcalinos y alcalinotérreos (Na, K, Ca, Mg) en pequeñas proporciones, así como pequeñas concentraciones de Fe, Ni, S, Zn, Cu, etc. Estos compuestos suelen encontrarse en todos los residuos orgánicos utilizados como biomasa [16].

Toxicidad

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones afectan la digestión, disminuyendo los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, es importante mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos. Por ejemplo en alimentos para el ganado con elevado contenido de proteína, un desbalance debido a altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de Amonio (NH_4^+). Las bacterias metanogénicas pueden tolerar una concentración de Amonio de alrededor de 1500-3000 ppm, aunque lo ideal es mantener dicha concentración en unas 80 ppm.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al digestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas. Además, algunos

estudios (Rodríguez, 1996) han revelado una reducción de la producción de biogás cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos [13].

Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo que permanece la biomasa en el digestor. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención hidráulico se define como el cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. Este factor está íntimamente ligado a la temperatura del proceso. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención, que será necesario para que las bacterias, que tienen una menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

A continuación se presenta la variación del tiempo de retención según la temperatura media de la región:

Región característica	Temperatura media (°C)	TRH (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Tabla 3.7: Tiempo de retención hidráulico según temperatura. [7]

Según los datos de la *Tabla 3.6* y sabiendo que la temperatura media en Cuba es de 25 °C, el TRH del biodigestor de este proyecto sería de unos 25 días.

Moncayo Romero (2008) afirma que la relación entre el TRH (días) y la temperatura de proceso (°C) puede aproximarse según la siguiente fórmula obtenida a partir de datos experimentales:

$$TRH = -51,27 \cdot \ln(T) + 206,72 \quad (Ec. 3.4.)$$

donde T es la temperatura de operación del digestor, dada en °C.

Sustituyendo en la *Ec. 3.4.* una temperatura de operación óptima de 35 °C obtendríamos un TRH de 25 días, que coincide con el obtenido anteriormente.

Por otro lado, J. A. Guardado (2007), basándose en la biomasa disponible en Cuba, indica un tiempo de retención aconsejable para ganado vacuno de 40 días. En esta referencia no se especifica el TRH según el tipo de clima, sino solamente según la especie animal. Sin embargo, dado que la referencia consultada es de

procedencia cubana, se presupone que los datos están basados en el clima de Cuba.

Dado que este último valor del TRH supone una desviación considerable respecto a los otros dos autores, para llegar a un compromiso entre los datos disponibles tomamos el TRH promedio de los comentados anteriormente:

$$TRH = \frac{\sum TRH_i}{n} = \frac{25+25+40}{3} = 30 \quad (Ec. 3.5.)$$

Por tanto, el tiempo de retención hidráulico que consideraremos adecuado para el tipo de clima y tipo de biomasa de la Vaquería 101 será de 30 días.

Además, para garantizar un funcionamiento óptimo del biodigestor para cualquier época del año es conveniente aplicar a dicho valor un factor de corrección de 1,3 [1]. Teniendo esto en cuenta, el tiempo de retención hidráulico será de 39 días.

Concentración de materia seca

Un contenido insuficiente de agua en la mezcla alimentada al biodigestor ocasiona que las bacterias y otros microorganismos no obtengan el entorno apropiado para poder llegar con facilidad al material de fermentación fresco, y la cantidad de biogás producido se reduce. Si la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción de biogás es limitada.

Este parámetro es calculado como la materia seca total que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de biodigestor. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de material sólido seco debe estar entre el 5 y 10 % en la mayoría de los casos.

En el *Anexo 1.1*. se da la relación Excreta-Agua adecuada para diferentes especies de ganado.

En el caso del estiércol fresco de ganado vacuno, contiene alrededor de 16 % de material sólido y 84 % de agua, y como vemos en el *Anexo 1* se recomienda mezclar en proporción 1:1 con agua. Entonces, la mezcla para introducir en una el biodigestor tiene 8 % de material sólido y 92 % de agua, y por tanto ya está dentro del rango requerido por el biodigestor [1].

Resumen de rangos óptimos de los factores

En la *Tabla 3.7.* se resumen los rangos de valores óptimos de los diferentes factores que afectan a la producción de biogás comentados:

Factor	Rango óptimo
pH	6,6 - 7,6
Temperatura (°C)	30 - 35
Relación C:N	10:1 - 30:1
Amonio (ppm)	80
TRH (días)	30
Relación Excreta:Agua	1:1

Tabla 3.8: Rangos óptimos de los factores que afectan a la producción de biogás

3.4. El biodigestor

El biodigestor es el sistema mediante el cual se consigue producir el biogás y el bioabono de manera controlada, proporcionando a las bacterias que habitan en el estiércol unas condiciones favorables para que lleven a cabo la digestión anaerobia del mismo. También se le conoce como: digestor anaeróbico, reactor anaeróbico, reactor biológico o simplemente digestor.

Un biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua. La mezcla resultante permanece en el digestor un determinado tiempo, durante el cual ocurre el proceso digestión anaerobia y la producción de biogás.

Posee un conducto de entrada a través del cual se suministra la mezcla de materia orgánica y agua, y un conducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana (bioabono) abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan *afluente* y *efluente* respectivamente.

El biogás producido se extrae del digestor a través de una conducción por tubería o manguera. Este conducto es el que lleva el biogás hasta los diferentes sistemas de aprovechamiento del mismo (lámparas, cocinas, motores, etc.), y puede incluir diversos sistemas de seguridad y control (válvulas, depósito, filtros, etc.).

3.5. Aprovechamiento del biogás

En este apartado se describe el proceso de combustión del biogás, como forma principal de aprovechamiento del mismo para diferentes aplicaciones. De estas aplicaciones, las que se utilizarán en el presente proyecto se describirán más adelante, una vez caracterizadas las instalaciones de la Vaquería 101 y definidas sus necesidades energéticas.

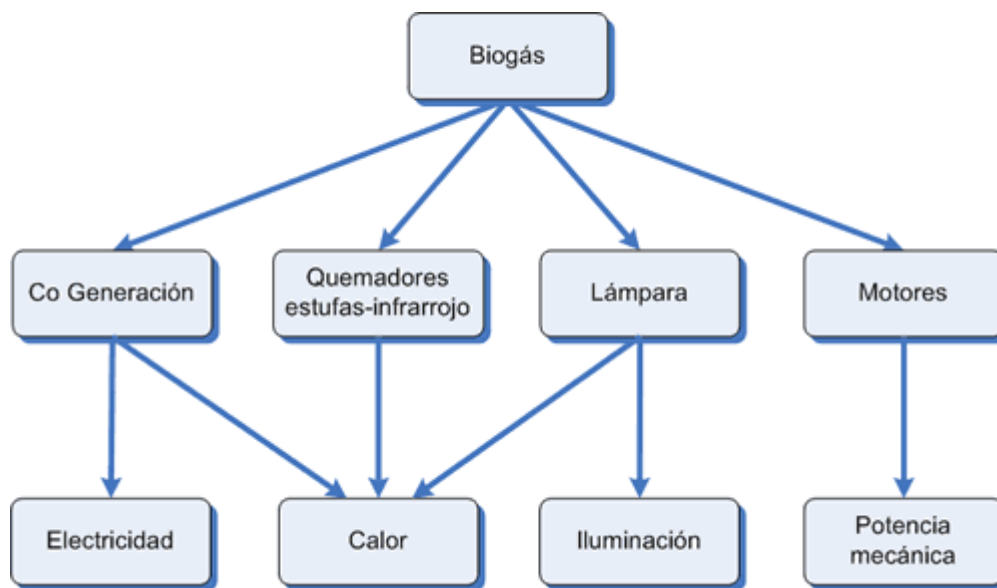


Figura 3.7: Principales aplicaciones del biogás

Combustión del biogás

Las aplicaciones del biogás se centran en aprovechar el contenido en metano del biogás para utilizarlo como combustible. Por ello se describen primero las reacciones químicas que ocurren en el proceso de combustión, así como las proporciones de los gases que intervienen.

Mezclado con aire, el biogás puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos, descomponiéndose principalmente en CO_2 y H_2O . Las reacciones químicas que ocurren en su combustión son las siguientes:



Por la *Ecuación 3.6*, sabemos que para la combustión completa de 1 m³ de metano son necesarios 2 m³ de oxígeno. Dado que el contenido en metano del biogás es de alrededor del 60 %, el volumen de oxígeno necesario para quemar 1 m³ de biogás es de:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de biogás} \times 0,6 \times 2 = 1,2 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno.}$$

Por lo tanto, ya que, idealmente, el porcentaje de oxígeno en el aire es del 21 % aproximadamente, el volumen de aire necesario para quemar 1 m³ de biogás es de:

$$1,2 \text{ m}^3 \text{ de oxígeno} / 0,21 = 5,7 \text{ m}^3 \text{ de aire.}$$

Necesitaremos 5,7 m³ de aire para la combustión de 1 m³ de biogás. Sin embargo, debemos tener en cuenta que hemos tomado el caso ideal, y que en el caso real necesitaríamos un exceso de aire para la combustión completa del biogás.

Comparado con otros gases, la cantidad de aire necesaria para la combustión completa del biogás es más pequeña. Por ejemplo, para quemar 1 m³ de butano necesitamos 30,9 m³ de aire, y para 1 m³ de propano necesitamos 23,4 m³ de aire. Por eso, al utilizar el biogás en aplicaciones de gas convencionales necesitaremos inyecciones de biogás mayores[14].

La cantidad de energía desprendida en la combustión del metano es relativamente inferior a la de otros gases combustibles como los ya mencionados (propano y butano). En *Tabla 3.8*. podemos observar los valores de combustión de éstos y otros gases combustibles.

Reacciones químicas	Valor de combustión (KJ/m ³)	
	Alto	Bajo
$\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 = \text{CO}_2$	12,644	12,644
$\text{H}_2 + 0,5 \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	12,753	10,794
$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	39,842	35,906
$\text{C}_2\text{H}_2 + 3,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	70,351	64,397
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 = 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	101,270	93,244
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5 \text{O}_2 = 4 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$	133,886	123,469
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	58,502	56,488
$\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	63,438	59,482
$\text{H}_2\text{S} + 1,5 \text{O}_2 = \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	25,364	23,383

Tabla 3.9: Valor de combustión de algunos gases combustibles [4]

Caracterización de la Vaquería 101

4. Caracterización de la Vaquería 101

En este apartado se pretende describir detalladamente la Vaquería 101, con el fin de poder conocerla a fondo y así facilitar su estudio en apartados posteriores. Se procederá describiendo la ubicación de la vaquería, las características del ganado,. También se analizarán las instalaciones que contiene, así como la maquinaria con la que cuentan dichas instalaciones. Por último se detallará el funcionamiento de la vaquería, describiendo los procesos que tienen lugar en un día normal y la duración de los mismos.

Debido a la imposibilidad de viajar a la Vaquería 101, por su ubicación aislada y la dificultad de encontrar un medio de transporte hasta ella, no se ha podido realizar un estudio de la misma con la precisión deseada. Un estudio sobre el terreno habría posibilitado caracterizar de forma más rigurosa las instalaciones, los equipos y los procesos que tienen lugar en la vaquería, pudiendo así diseñar un sistema lo más adecuado posible a la realidad.

4.1. Localización, clima, descripción y emplazamiento

4.1.1. Localización

Cuba es un país insular del Caribe, asentado en un archipiélago del mar de las Antillas. Su isla principal, conocida como Isla de Cuba, es la más grande de las Antillas Mayores y tiene origen orogénico. También forman parte del archipiélago la Isla de la Juventud y una multitud de cayos o pequeñas islas que rodean a las antes mencionadas. Su superficie total es de 110.860 km² y su población de 11.242.628 habitantes (en 2009), con una densidad de población de 102,3 hab./km². Al norte se encuentran Estados Unidos y Bahamas, al oeste México, al sur las Islas Caimán y Jamaica, y al sudeste la isla La Española.

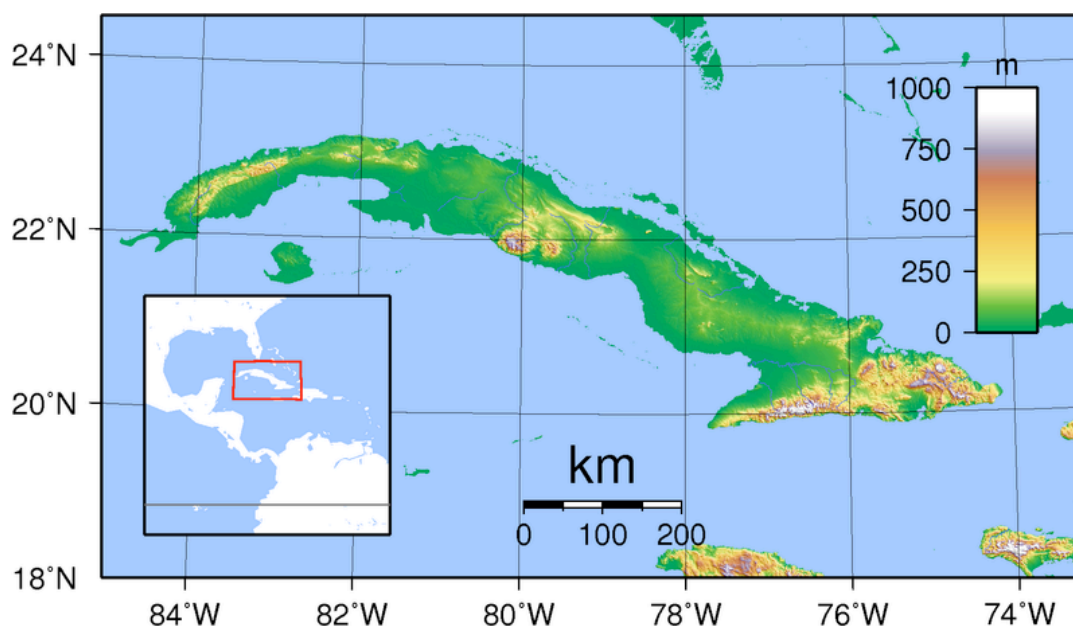


Figura 4.1.: Mapa topográfico de Cuba

Cuba se divide en 15 provincias y un municipio especial (Isla de la Juventud) de subordinación nacional. Las provincias, a su vez, se subdividen en municipios para un total de 168 municipios. La capital del país es la ciudad de La Habana, que constituye en sí misma una provincia.

La provincia de Pinar del Río se encuentra en el extremo occidental de la isla y del archipiélago. Esta provincia tiene una extensión superficial de 8.884,51 km² donde habitan 591.931 personas según el censo de 2011, siendo un 37% población rural. Se subdivide en 11 municipios y su capital es la ciudad de Pinar del Río.



Figura 4.2.: Mapa de la provincia de Pinar del Río

El municipio pinareño de Consolación del Sur se encuentra a unos 23 km al este de la capital (Pinar del Río). Ocupa el segundo lugar de la provincia tanto en extensión (1.111,9 km²) como en población (88.950 habitantes), y su altitud máxima es de 65 msnm.

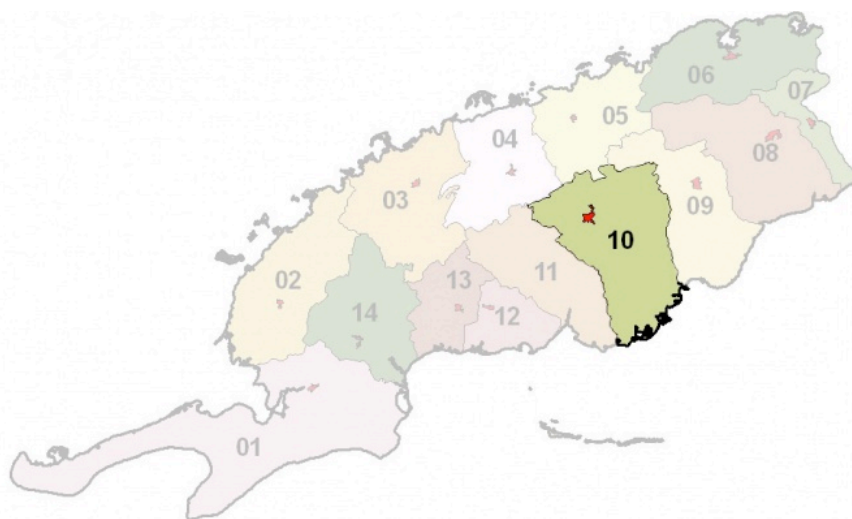


Figura 4.3.: Municipio de Consolación del Sur.⁵

⁵ Fuente: www.ecured.cu

4.1.2. Clima

El clima en Cuba es predominantemente tropical. Los valores medios anuales van desde los 24 °C en las llanuras, hasta 34 °C y más en las costas orientales, reportándose magnitudes inferiores a 20 °C en las mayores altitudes.

El invierno va de noviembre a abril y es la temporada menos calurosa, mientras que el verano ocupa los meses de mayo a octubre, más calurosos. Las temperaturas máximas y mínimas absolutas registradas son de 38,8 °C (Jucarito, Abril de 1999) y 0,6 °C (Bainoa, Febrero de 1996). Como es típico en los climas tropicales, la variación diaria de la temperatura es mayor que la anual.

La humedad relativa media es alta, con promedios cercanos al 90%. Los máximos diarios, generalmente superiores al 95%, ocurren a la salida del sol, mientras que los mínimos descienden, al mediodía, hasta 50-60% en el interior del territorio. Las zonas más húmedas son las regiones occidental y central, junto con los principales núcleos montañosos.






	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dic
 Temperatura Media	21	23	22	25	26	27	26	26	25	26	22	20
 Temperatura Máxima Media	27	28	28	31	31	32	32	32	31	30	27	26
 Temperatura Mínima Media	16	17	17	20	21	23	22	22	22	22	17	16
 Promedio de Días con Precipitación	5	4	3	3	6	7	8	5	3	11	0	0
 Promedio de Días con Precipitación de Nieve	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.1: Valores promedio mensuales del clima en Pinar del Río⁶

4.1.3. Descripción y emplazamiento

Dentro del municipio de Consolación del Sur se encuentra la empresa genética pecuaria “Camilo Cienfuegos”. Es una de las mayores empresas pecuarias de Cuba y uno de los principales renglones económicos de la región, con una producción de más de 7 millones de litros de leche al año. La empresa se subdivide en 10 Unidades Empresariales Básicas (UEB), cada una de las cuales cuenta con un territorio para su explotación.

⁶ Fuente: www.zonaclima.com

La UEB “La Barbarita” está situada entre las poblaciones de Herradura y Paso Real de San Diego, limitando al norte con la Autopista Este-Oeste. Dicha UEB cuenta con una serie de vaquerías en su territorio, todas ellas con igual configuración y funcionamiento. Una de dichas vaquerías es la Vaquería 101, en la cual se centra el presente proyecto.



Figura 4.4.: Territorio perteneciente a la UEB “La Barbarita”

La Vaquería 101 ocupa una parcela de 7.500 m² aproximadamente, y se puede acceder a ella a través de la red de caminos que conecta las diferentes vaquerías de “La Barbarita”.

Para la producción de leche, la vaquería cuenta con un potencial de ganado vacuno de 180 vacas de las razas Siboney y Mestizo Siboney.



Figura 4.5.: Emplazamiento de la Vaquería 101⁷

4.2. Instalaciones

En este apartado se describirán las diferentes instalaciones con las que cuenta la Vaquería 101 para realizar el proceso productivo. Se caracterizarán los edificios que forman la vaquería, su función y los equipos existentes, con el fin de conocerlos a fondo y así poder basarnos en ellos para diseñar el sistema de aprovechamiento del biogás, en apartados posteriores.

4.2.1. Establos

En la vaquería estabulan las vacas en diferentes naves, agrupando aquéllas que se encuentren en igual estado, y que por tanto requieran un tratamiento similar. Así, las 180 vacas de la Vaquería 101 se dividen en tres grupos, según su estado productivo:

- **Vacas productoras de leche:** Son las vacas que se encuentran en estado de producción de leche, y que por tanto se pueden ordeñar normalmente. Las vacas siguen produciendo leche hasta unos 10 meses después del parto.
- **Vacas en estado de gestación avanzada:** Son las vacas que se encuentran en estado de preñez de 7 u 8 meses, es decir, en la última fase de gestación

⁷ Fuente: Google Earth

(9 meses). Una vez ocurrido el parto, dichas vacas se transformarán en productoras de leche y se las trasladará a los establos para vacas productoras.

- **Vacas pendientes, gestantes o vacías:** Aquellas vacas que no pueden producir leche, bien porque su edad es avanzada, porque se encuentran en una fase temprana de gestación, o porque su etapa de producción de leche ha pasado y deben ser inseminadas nuevamente. Las vacas que se encuentren en edad avanzada serán trasladadas a otra instalación para ser sacrificadas; las que se encuentran en fase de gestación pasarán a los establos para vacas en gestación avanzada una vez cumplan los 7 meses; las vacías permanecerán en el este mismo grupo una vez inseminadas.

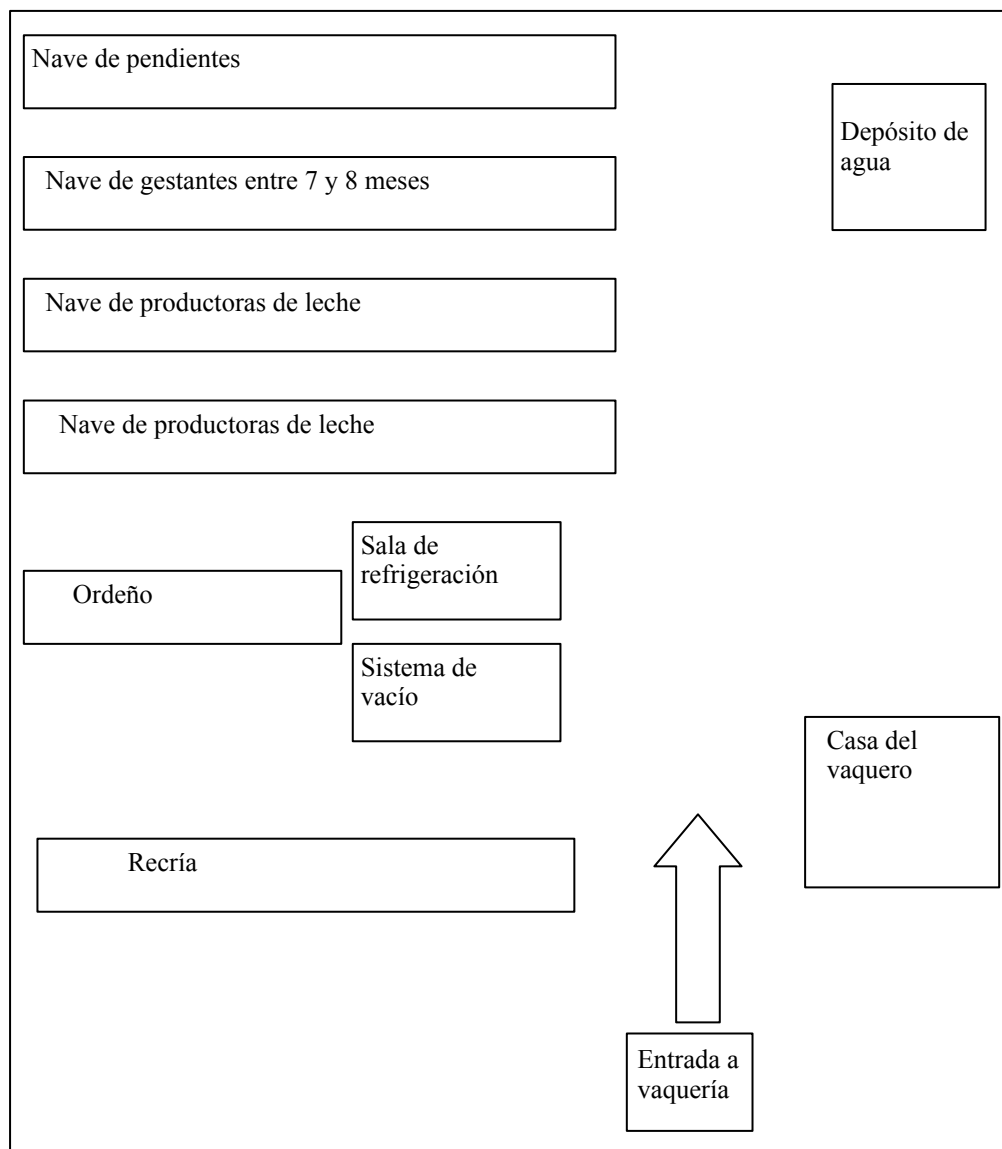


Figura 4.6: Plano de la Vaquería 101

Para la estabulación separada de cada grupo, la vaquería cuenta con 4 naves de 500 m² cada una: 2 naves para vacas productoras, 1 para vacas en gestación avanzada, y 1 para vacas pendientes, gestantes o vacías.

Además existe una quinta nave de dimensiones similares a las anteriores, destinada a la recría. En ella se estabulan los terneros recién nacidos hasta que cumplen 7-10 días. Una vez pasado dicho periodo los terneros son trasladados a otra granja para su cría.

Cada una de las 5 naves cuenta con un bombillo de 11W alimentado fotovoltaicamente, y se desearía instalar además una lámpara de biogás en cada una de ellas.

4.2.2. Sala de ordeño

Esta nave está habilitada par poder realizar diariamente el ordeño mecánico de las vacas en estado de producción de leche. Para que el traslado del ganado sea lo más sencillo posible, este edificio se encuentra junto a las naves para vacas productoras.

Para realizar el ordeño mecánico, la sala de ordeño cuenta con un equipo formado por un motor eléctrico que mueve una bomba de vacío mediante una transmisión de poleas y correa. Dicho equipo se encuentra en un cuarto contiguo a la propia sala de ordeño, denominado como “sala de generación de vacío”. El equipo de ordeño mecánico se encarga de producir el vacío para extraer la leche de la vaca, y de impulsar la leche por los conductos directamente hasta la cuba de refrigeración, situada en otro cuarto contiguo denominado “sala de refrigeración”.



Figura 4.7.: Motor eléctrico modelo AL-100L-4A

El motor eléctrico, del tipo AL-100L-4A, entrega una potencia de 2,2 kW (3 CV) y funciona a 1.720 rpm. Está conectado en estrella a la red eléctrica, y presenta una corriente de 9 A a 220 V y carga completa.

Por otro lado la bomba de vacío, del modelo BV-06, trasiega un caudal máximo de 54 m³/h, gira a 1.200 rpm y genera una potencia de 2,2 kW.

Además, la sala de ordeño cuenta con 2 bombillos de 11 W alimentados fotovoltaicamente y se desearían añadir 2 lámparas de biogás, una en la propia sala de ordeño y otra en la sala de generación de vacío.

4.2.3. Sala de refrigeración

En esta sala se produce el enfriamiento de la leche obtenida en el ordeño, para su adecuada conservación hasta ser recogida y transportada a otra instalación para su envasado. Dado que la leche es enviada directamente desde la sala de ordeño, la sala de refrigeración está situada junto a la sala de ordeño para facilitar el proceso.

El almacenamiento de la leche se realiza en 2 cubas de frío, una con una capacidad de 1000 L y la otra de 500 L. El enfriamiento de la leche en las cubas se consigue por medio de un sistema de refrigeración por compresión, con un compresor eléctrico de 3,5 kW de potencia.

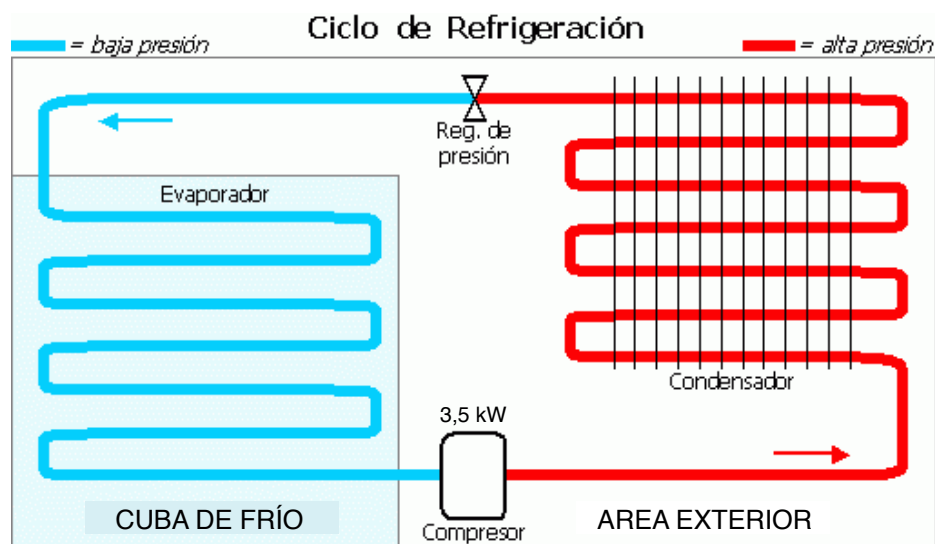


Figura 4.8.: Esquema del sistema de refrigeración de leche.

Además, en la sala de refrigeración se desea instalar 2 lámparas de biogás.

4.2.4. Moledora de forraje

Este equipo se utiliza para picar o triturar cierta cantidad de forraje y obtener un sustrato válido para servir como complemento en la alimentación del ganado. Está formado por una trituradora y un motor eléctrico de 5,5 kW que la mueve.



Figura 4.9.: Moledora de forraje portátil con motor eléctrico

4.2.5. Casa del vaquero

Se trata de una vivienda para 4 personas, en la que vive el vaquero (encargado del cuidado diario de la vaquería) junto con su familia. La casa se encuentra en el interior de la finca, y cuenta con los siguientes equipos eléctricos:

- 1 televisor de 48 W.
- 1 equipo de música de 20 W.
- 1 frigorífico de 37,5 W.
- 1 ventilador de 55 W.
- 6 lámparas de 20 W cada una.

Por otro lado, la vivienda cuenta con una cocina a gas que se pretende modificar para que pueda funcionar con el biogás generado. Dicha cocina se utilizará diariamente para preparar el desayuno, comida y cena para los 4 miembros de la familia.

En cuanto a la iluminación, además de las lámparas eléctricas ya instaladas se desea instalar una lámpara de biogás.

4.2.6. Equipo para el baño de garrapaticida

Para evitar la común proliferación de garrapatas en las vacas de la Vaquería 101, una vez al mes se somete a la totalidad del ganado a un baño de agua con un producto garrapaticida. En dicho proceso se rocía con una manguera la solución garrapaticida sobre el ganado, utilizando una electrobomba de 7,5 kW de potencia para impulsar dicha solución. El proceso suele durar unas 3-4 horas, en las que la electrobomba funciona continuamente.

4.2.7. Otros equipos

La vaquería cuenta además con otros equipos y servicios que son alimentados mediante placas fotovoltaicas. Debido a que estos equipos ya presentan un funcionamiento sostenible mediante una fuente de energía renovable, no será necesario utilizar el sistema de aprovechamiento de biogás para alimentarlos y únicamente se nombrarán sin describir en detalle sus características y funcionamiento. Estos equipos son:

- Un sistema de calentadores solares destinado a calentar agua para la limpieza tecnológica de los sistemas.
- Una cerca eléctrica que sólo se activa cuando el ganado se encuentra pastando. Se alimenta mediante paneles solares y presenta un consumo de 14 kWh/año.
- Un tanque de almacenamiento de agua elevado, que funciona mediante una electrobomba solar.

4.2.8. Resumen de equipos

En las siguientes tablas se muestran los equipos eléctricos descritos en los apartados anteriores, incluyendo el número de cada uno de ellos y su potencia. Se han dividido en dos tipos: Maquinaria para los equipos que intervienen en el proceso productivo de la vaquería, y Electrodomésticos para los equipos que dan servicio a la casa del vaquero. Cabe destacar además que el rango de potencia de los equipos de cada tipo es diferente.

Maquinaria			
Equipo	Cantidad	Potencia (kW)	Potencia (hp)
Motor ordeño mecánico	1	2,2	3
Compresor refrigeración	1	3,5	4,8
Motor moladora de forraje	1	5,5	7,5
Electrobomba baño garrapaticida	1	7,5	10,2
Total		18,7	25,5

Tabla 4.2.: Resumen de Maquinaria

Electrodomésticos		
Equipo	Cantidad	Potencia (W)
Televisor	1	48
Equipo de música	1	20
Frigorífico	1	37,5
Ventilador	1	55
Lámpara	6	20
Total		280,5

Tabla 4.3.: Resumen de Electrodomésticos

4.3. Funcionamiento de la vaquería

En este apartado se describen las actividades que se realizan un día normal en la vaquería, en las cuales se utiliza la maquinaria caracterizada anteriormente. Conocer el periodo que ocupa cada una de las actividades a lo largo del día es importante, ya que será esto lo que permitirá hallar la demanda de energía eléctrica en la vaquería, para así caracterizar el sistema de generación de electricidad a partir del biogás.

4.3.1. Actividades

Ordeño

Se realizan dos ordeños a lo largo del día, y cada uno de ellos dura 2 horas. Antes de cada ordeño se realiza la limpieza tecnológica con agua caliente (ver apartado 4.2.7.).

- **Primer ordeño:** De 3:30 a 5:30.
- **Segundo ordeño:** De 15:30 a 17:30.

Moler forraje

Cada día se dedica una hora, entre las 9:30 y las 10:30, a moler forraje para darlo como alimento al ganado.

Refrigeración

El sistema de refrigeración de la leche funciona de forma continua durante 20,5 horas al día, desde las 15:30 hasta las 12:00 del día siguiente. Esto es así porque la leche se recoge de los tanques refrigerador cada día a las 11:00 para ser transportada, y por tanto los tanques quedan vacíos hasta el siguiente ordeño, a las 15:30.

Uso de electrodomésticos

Se considera que las personas en la casa del vaquero deben poder utilizar los electrodomésticos a cualquier hora del día. Por tanto, el suministro eléctrico a la vivienda debe ser continuo a lo largo de las 24 horas del día.

Baño de garrapaticida

Este proceso se realiza solamente una vez al mes, y dura aproximadamente 3 horas.

4.3.2. Diagrama de Gantt

El diagrama siguiente representa esquemáticamente la duración de cada uno de los procesos ya explicados. Se puede observar cómo los procesos se solapan en diferentes momentos del día, hecho importante que se deberá tener en cuenta a la hora de calcular la demanda de energía eléctrica.

Caracterización de la Vaquería 101

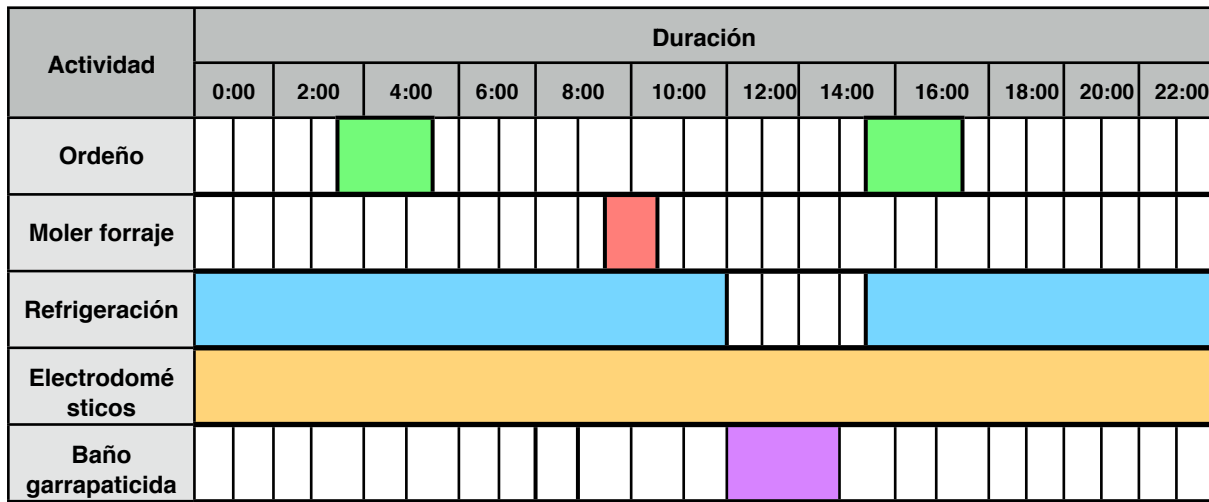


Figura 4.10: Diagrama de Gantt de los procesos diarios en la Vaquería 101

Análisis del potencial de biogás

5. Análisis del potencial de biogás

En este apartado se evaluará la cantidad de biogás y de biomasa que es posible obtener a partir de la excreta generada por el ganado vacuno de la Vaquería 101. Para ello, se procederá primero a describir el proceso y los cálculos necesarios para llegar a conocer el volumen de biogás a partir del levantamiento de la excreta generada diariamente, para posteriormente evaluar los resultados obtenidos con dicho proceso aplicado a las muestras obtenidas en la vaquería a lo largo de varios días. La metodología seguida para realizar el análisis será la propuesta por el autor J. A. Guardado [1].

5.1. Levantamiento del potencial de biogás

En este apartado procedemos a realizar el levantamiento de la excreta generada por el ganado vacuno en la Vaquería 101. Con estos datos obtendremos el potencial de producción de biogás a partir de la excreta.

5.1.1. Excreta generada

En este apartado se recoge y pesa la excreta generada por el ganado vacuno a lo largo de varios días escogidos de forma aleatoria. La recogida y pesaje son realizadas por los propios operarios de la vaquería, utilizando recipientes, palas y una balanza.

Se decidió que fueran los propios operarios de la vaquería quienes realizaran el levantamiento con el objetivo de que el proceso fuese lo más cercano posible a la realidad, ya que serán esos mismos operarios quienes se encargarán de dicha tarea una vez que la instalación ya se encuentre construida y en funcionamiento.

Como vemos en la *Ecuación 4.1*, con las muestras disponibles obtenemos el promedio de excreta diaria, y por tanto el potencial de biomasa diario de la vaquería:

$$C_e = \frac{\sum E_d}{Nd} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde:

Ce: Cantidad de excreta promedio diaria (kg)

Ed: Excreta diaria generada por las vacas (kg)

Nd: Número de días pesados

5.1.2. Cantidad de biomasa disponible

Ahora que ya tenemos el promedio de la cantidad de excreta generada en un día en la vaquería, debemos obtener la cantidad de agua que debemos añadir para que la digestión anaerobia de la mezcla excreta-agua que entrará al biodigestor se produzca de la manera más eficiente posible, según el tipo de materia orgánica utilizada (Ver apartado 3.2.3).

La biomasa disponible es la cantidad de dicha mezcla de la que dispondremos a diario, y se obtendrá sumando las cantidades de excreta y agua (*Ecuación 4.2*).

$$Cbd = Ce + C_{H_2O} \quad (Ec. 4.2)$$

donde:

Cbd: Cantidad de biomasa disponible (kg/día)

Ce: Cantidad de excreta diaria (kg)

C_{H₂O}: Cantidad de agua necesaria (kg)

Mirando el *Anexo 1* sabemos que la proporción de excreta-agua adecuada en caso del ganado vacuno es de 1:1. Por lo tanto, por cada parte de excreta será necesaria otra parte de agua:

$$Ce = C_{H_2O}$$

5.1.3. Volumen de biomasa disponible

Dado que la densidad de la mezcla es conocida, utilizaremos la *Ecuación 4.3* para el cálculo del volumen que ocupa la biomasa disponible.

$$Vb = \frac{Cbd}{\rho} \quad (Ec. 4.3)$$

donde

V_b : Volumen de la biomasa disponible (m^3)

C_{bd} : Cantidad de biomasa disponible (kg)

ρ : Densidad de la mezcla (kg/m^3)

La excreta procedente de ganado vacuno está formada por un 16 % de materia orgánica seca y un 84 % de agua [Fuente: Guardado, 2007]. La mezcla excreta-agua en una proporción 1:1 tiene entonces un 8 % de materia orgánica seca y un 92 % de agua. Por lo tanto, dada la gran proporción de agua, se considera que la mezcla posee una densidad igual a la del agua, es decir, de $1000 kg/m^3$ [Fuente: Carballo, Arteaga, Márquez; 2006].

5.1.4. Volumen de biomasa en el biodigestor

Dado que la biomasa disponible que introduciremos en el biodigestor a diario deberá permanecer dentro de él un determinado tiempo de retención (ver apartado 3.2.4.), ésta se irá acumulando dentro del biodigestor a lo largo de dicho tiempo de retención. Una vez cumplido el tiempo de retención⁸, al seguir introduciendo nueva mezcla en el biodigestor, la biomasa ya digerida deberá salir por la cámara de compensación al depósito de descarga, y así el volumen de biomasa dentro de la cámara de digestión permanecerá constante. Éste volumen de biomasa dentro del biodigestor se calcula con la *Ecuación 4.4*.

$$V_{bb} = V_b \cdot Tr \quad (Ec. 4.4)$$

donde:

V_{bb} : Volumen de la biomasa en el biodigestor (m^3)

V_b : Volumen de la biomasa disponible (m^3)

Tr : Tiempo de retención (días)

5.1.5. Volumen de biogás

Se procede al cálculo del volumen de biogás que produce la cantidad de biomasa disponible, a lo largo del tiempo de retención especificado, que se obtiene a partir de la *Ecuación 4.5*. Éste valor será el volumen de biogás que se producirá en el biodigestor cada día.

⁸ Véase *Apartado 3.3.2*.

$$V_{bg} = C_{bd} \cdot \lambda \quad (Ec. 4.5)$$

donde:

V_{bg} : Volumen de biogás (m^3)

C_{bd} : Cantidad de biomasa disponible (kg)

λ : Producción específica de biogás⁹ (m^3/kg)

5.1.6. Volumen total del biodigestor

El volumen interno del biodigestor ha de albergar tanto el volumen de la mezcla líquida en proceso de fermentación como el del biogás que se produzca a diario a consecuencia de dicha fermentación. Por tanto, el volumen interno del biodigestor es la suma de ambos volúmenes, como vemos en la *Ecuación 4.6*.

$$V_{tot} = V_{bb} + V_{bg} \quad (Ec. 4.6)$$

donde:

V_{tot} : Volumen total del biodigestor (m^3)

V_{bb} : Volumen de biomasa en el biodigestor (m^3)

V_{bg} : Volumen de biogás (m^3)

5.2. Resultados del análisis

5.2.1. Excreta generada

En la *Tabla 5.1* se muestra la cantidad de excreta diaria recogida en cada una de las cinco muestras realizadas en cinco días aleatorios en la Vaquería 101.

⁹ Véase *Anexo I.1*.

Número de muestra	Cantidad de excreta (kg/día)
1	1212
2	920
3	1165
4	993
5	1195

Tabla 5.1: Cantidad de excreta obtenida en cada una de las muestras realizadas en la Vaquería 101

Una vez obtenidos estos datos calculamos el promedio de la cantidad de excreta diaria generada (C_e), tal y como se muestra en la *Ecuación 4.1*.

$$C_e = \frac{\sum Ed}{Nd}$$

$$C_e = \frac{1212+920+1165+993+1195}{5} = 1097 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{día}}$$

Con el fin de comparar los resultados con la bibliografía consultada, calculamos también la cantidad de excreta generada por cada animal (C_{ea}). Como en la Vaquería 101 existen 180 cabezas de ganado vacuno, tendremos:

$$C_{ea} = \frac{1097 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{día}}}{180 \text{ animales}} = 6,1 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{animal} \cdot \text{día}}$$

Por lo tanto, comparando con los datos expuestos en el *Anexo I.1.*, vemos que los resultados obtenidos se corresponderían en mayor medida con la excreta generada por el ganado vacuno pequeño.

5.2.2. Cantidad de agua necesaria

$$C_{H_2O} = C_e = 1097 \frac{\text{kg de agua}}{\text{día}}$$

5.2.3. Cantidad de biomasa disponible

$$C_{bd} = C_e + C_{H_2O}$$

$$C_{bd} = 1097 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{día}} + 1097 \frac{\text{kg de agua}}{\text{día}} = 2194 \frac{\text{kg de biomasa}}{\text{día}}$$

5.2.4. Volumen de biomasa disponible

$$V_b = \frac{C_{bd}}{\rho}$$

$$V_b = \frac{2194 \frac{\text{kg de biomasa}}{\text{día}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2,194 \frac{\text{m}^3 \text{ de biomasa}}{\text{día}}$$

5.2.5. Volumen de biomasa en el biodigestor

$$V_{bb} = V_b \cdot Tr$$

$$V_{bb} = 2,194 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{día}} \cdot 39 \text{ días} = 85,566 \approx 85,6 \text{ m}^3$$

5.2.6. Volumen de biogás

$$V_{bg} = C_{bd} \cdot \lambda$$

$$V_{bg} = 1097 \frac{\text{kg de excreta}}{\text{día}} \cdot 0,04 = 43,88 \approx 43,9 \text{ m}^3$$

5.2.7. Volumen total del biodigestor

$$V_{tot} = V_{bb} + V_{bg}$$

$$V_{tot} = 85,6 \text{ m}^3 \text{ de biomasa} + 43,9 \text{ m}^3 \text{ de biogás} = 129,5 \approx 130 \text{ m}^3$$

Diseño del sistema de generación de biogás

6. Diseño del sistema de generación de biogás

Una vez conocido el potencial de biogás existente en la Vaquería 101 se puede proceder a diseñar el sistema con el que se generará dicho biogás a partir de la excreta del ganado vacuno. Se seleccionará la tecnología de generación de biogás que se considere más adecuada para este caso y se utilizarán los resultados obtenidos del levantamiento del potencial de biogás para dimensionar el sistema.

6.1. Selección de la tecnología de generación de biogás

Como se vio en el *Apartado 3.4.*, el sistema utilizado para generar el biogás se denomina biodigestor. Existen diferentes tipos de biodigestores, por lo que para tomar la decisión del tipo que se utilizará en la Vaquería 101 se describen en primer lugar las principales alternativas aplicables en este caso, señalando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. Una vez hecho esto se valorará cuál es la opción más adecuada.

6.1.1. Tipos de biodigestor

Para el caso de la Vaquería 101 se considerarán como principales alternativas los dos tipos de biodigestor más extendidos en países en vías de desarrollo, como son el biodigestor de cúpula fija (modelo Chino), y el de cúpula flotante (modelo Hindú). Más del 80 % de las plantas de biogás difundidas en el mundo pertenecen a estos dos tipos de diseño, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos que posteriormente se difundieron de forma masiva [14].

Aunque no se tendrá en cuenta como alternativa en este estudio merece la pena nombrar también, por su relativa difusión en países latinoamericanos, el biodigestor de polietileno tubular de bajo costo.

- **Modelo Chino o de cúpula fija**

Un digester de cúpula fija se caracteriza principalmente por poseer un depósito de gas fijo, sin ninguna parte móvil, que se asienta sobre el digester, como se ve en la *Figura 6.1*:

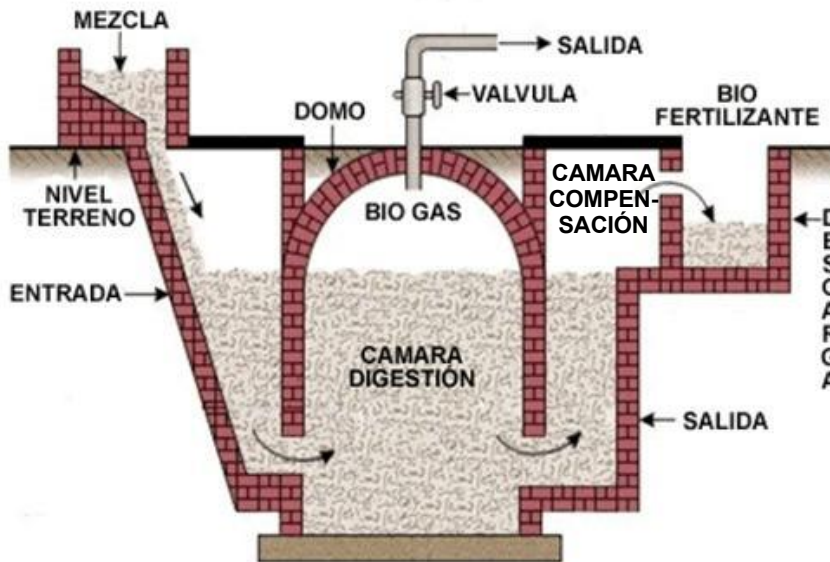


Figura 6.1: Biodigestor de cúpula fija.

El gas producido se almacena en el depósito, en la parte superior de la cámara de digestión. A medida que el gas se va produciendo, éste va ejerciendo una presión creciente en las paredes del biodigestor y la superficie del material de fermentación. Para compensar el aumento de presión, el digester posee un depósito contiguo llamado cámara de compensación. La diferencia de peso entre el material de fermentación de la cámara de digestión y de la cámara de compensación se encarga de regular el aumento de la presión. En la la figura siguiente se observa el funcionamiento del proceso:

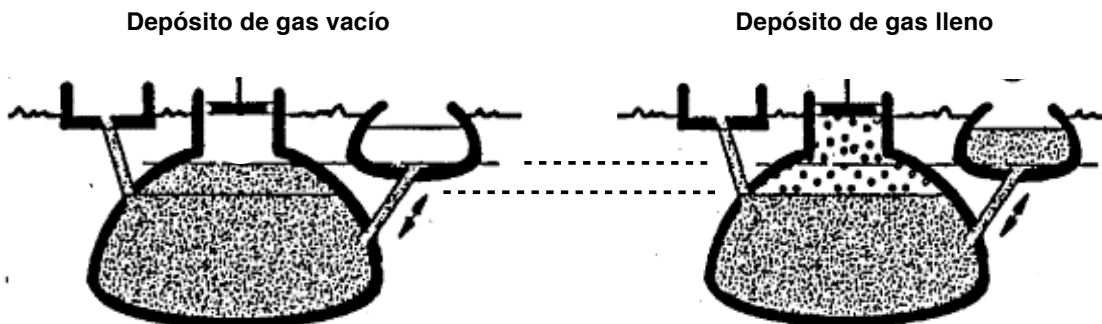


Figura 6.2: Etapas del proceso de producción de biogás en un digester de cúpula fija. [14]

Ventajas

Los costos asociados a un digestor de cúpula fija son relativamente pequeños. Es un diseño más simple ya que no existen partes móviles. Tampoco existen partes metálicas poco resistentes a la corrosión, por lo que puede esperarse una vida útil larga (20 años o más).

La planta se construye bajo tierra, consiguiendo protección de daños físicos y ahorro de espacio. También se consigue un mayor aislamiento térmico, con lo que se protege al digestor de las bajas temperaturas durante la noche o en meses fríos. Las variaciones de temperatura día/noche no influyen de manera significativa en los procesos bacteriológicos.

Inconvenientes

Su construcción es complicada y requiere una intensa labor de mano de obra, por lo que requiere de supervisión técnica cualificada. La cúpula fija debe soportar una gran presión de gas, por lo que no debe presentar grietas ni partes débiles. Se recomienda pintar la cúpula con una pintura sintética impermeable.

Las variaciones de presión del gas dificultan su utilización. En sistemas que requieran una presión de gas constante, como en motores, deberá instalarse un regulador de presión en el conducto de biogás.

La *Figura 6.5.* es una imagen de un biodigestor real de cúpula fija.

- **Modelo Hindú o de cúpula flotante**

Las plantas de cúpula flotante consisten en un digestor subterráneo y un depósito de gas móvil llamado campana. A continuación se puede ver una ilustración del mismo:

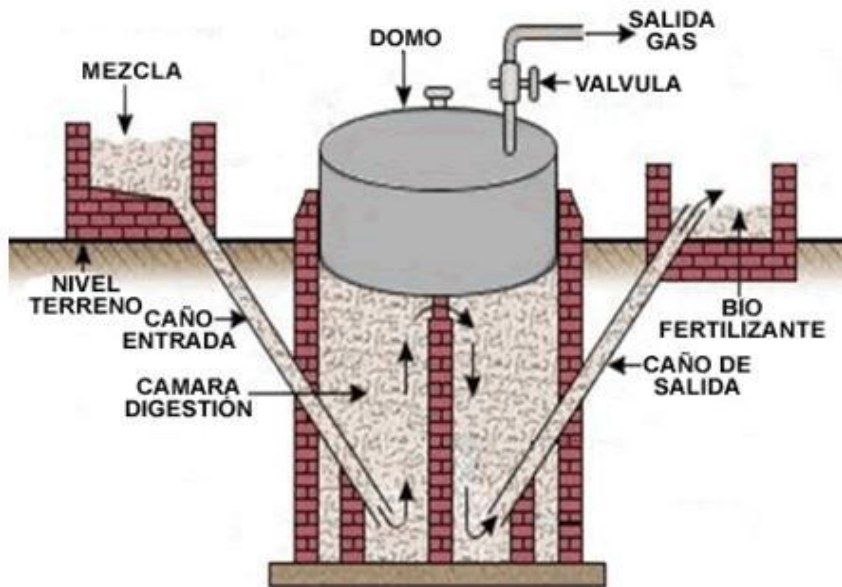


Figura 6.3: Biodigestor de cúpula flotante.

La campana flota directamente sobre el material de fermentación o, en algunos diseños, sobre una capa de agua intermedia. El gas es almacenado en la propia campana, que sube o baja según la cantidad de gas existente, con lo que la presión interna del biodigestor se mantiene constante. La campana suele estar fabricada en metal o fibra de vidrio, y se necesita un poste guía o unos raíles laterales para guiar su movimiento.

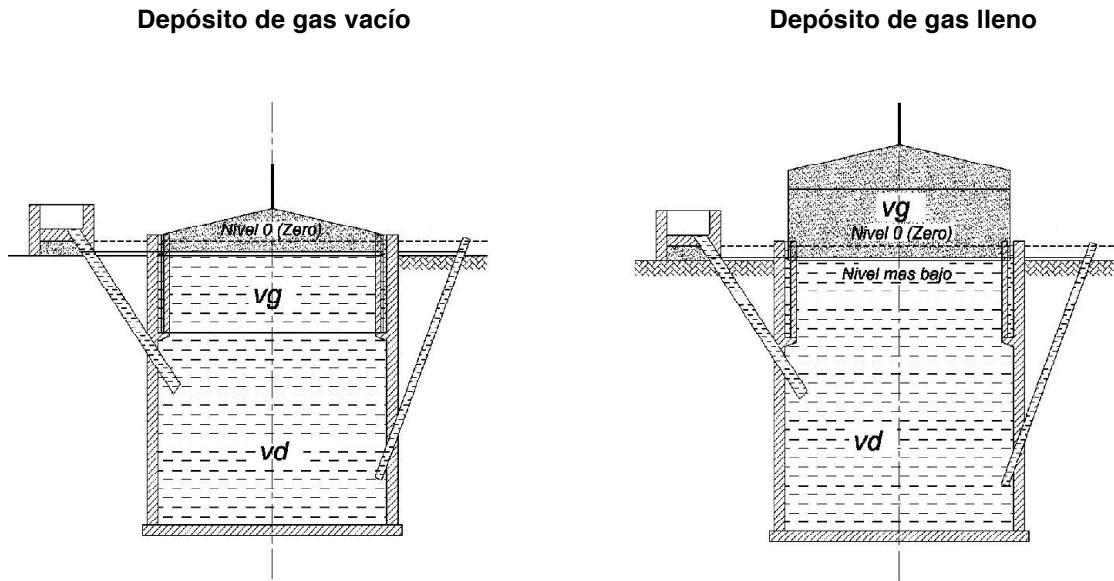


Figura 6.4: Etapas del proceso de producción de biogás en un digestor de cúpula flotante.[4]

Ventajas

El funcionamiento es muy simple y fácil de comprender, además de que el volumen de gas almacenado es visible directamente. La presión es constante, determinada por el peso de la campana, lo cual facilita la utilización del biogás en los diferentes sistemas de aprovechamiento.

La construcción de la planta es relativamente sencilla, y los errores de construcción no llevan a problemas importantes en la operación y cantidad de gas producido.

Inconvenientes

Los costes del material de la campana metálica son elevados, además de que el metal es susceptible de corrosión. Debido a esto, las plantas de cúpula flotante tienen una vida mas corta que las de cúpula fija y mayores costes de mantenimiento.

En la *Figura 6.6*. tenemos una imagen de un biodigestor real de cúpula flotante.



Figura 6.5: Biodigestor de tipo Chino



Figura 6.6: Biodigestor de tipo Hindú

[6]

6.1.2. Elección del tipo de biodigestor

Para tomar la decisión del tipo e biodigestor se tienen en cuenta los criterios establecidos por la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos. Estos criterios son:

- Mínimos costos de construcción
- Máxima vida útil de la instalación

Basándonos en estos criterios y apoyándonos en la tabla comparativa que se encuentra en el *Anexo 1.2.*, se considera que el tipo de biodigestor más adecuado y que cumplirá mejor con los deseos de la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos será el **biodigestor de cúpula fija**.

6.2. Diseño del biodigestor

En este apartado se exponen las partes principales del biodigestor seleccionado, y se obtienen las dimensiones de cada una de las partes explicando la metodología utilizada para el cálculo de las mismas.

6.2.1. Partes del biodigestor

En la *Figura 4.3* tenemos una imagen detallada del biodigestor de cúpula fija con sus partes.

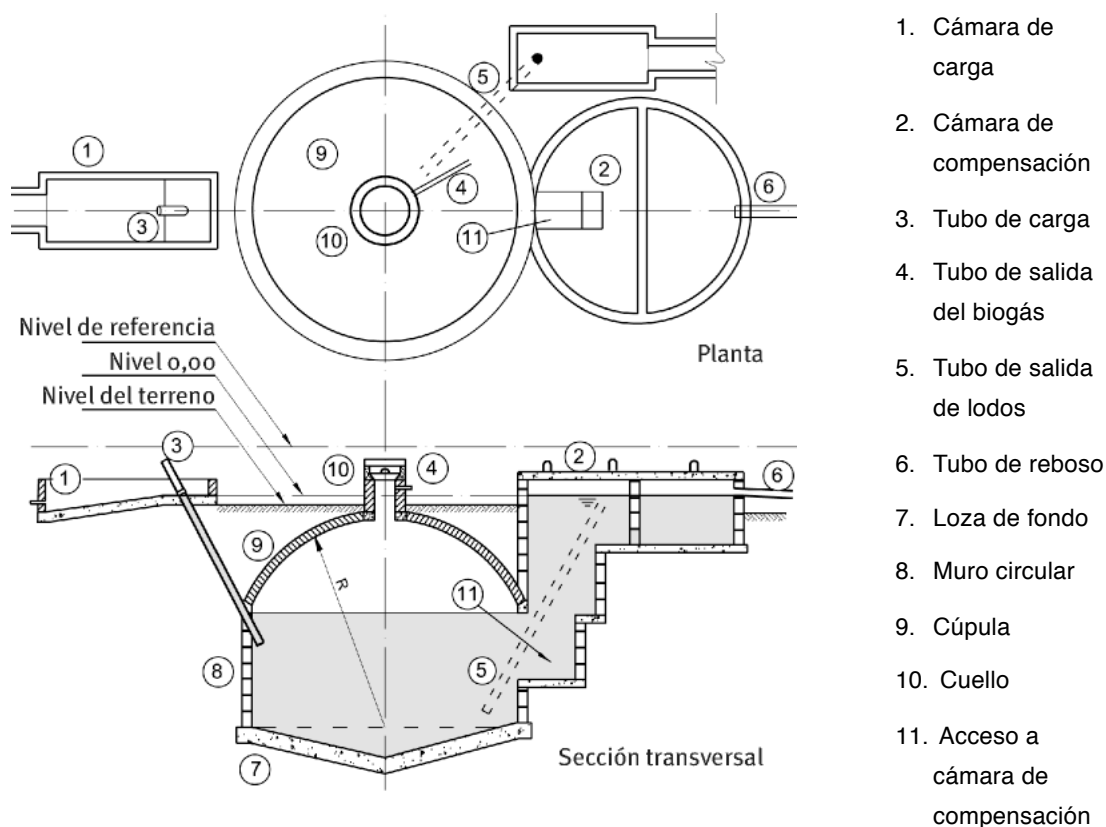


Figura 6.7: Partes del biodigestor de cúpula fija. [1]

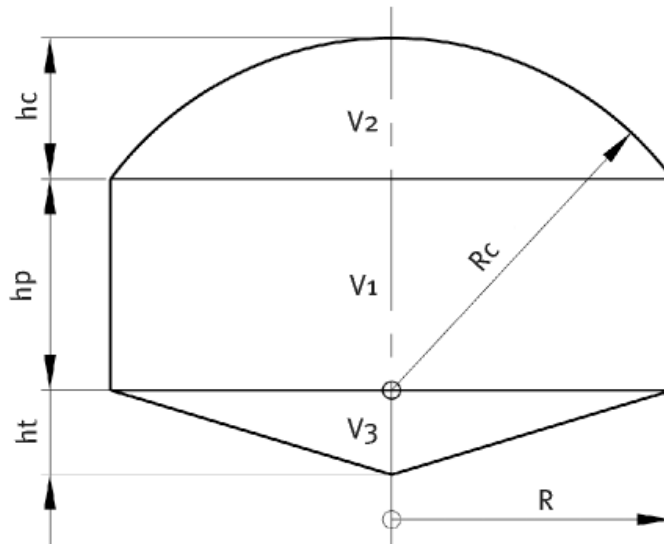
6.2.2. Dimensionamiento del sistema de generación de biogás

El cálculo de las dimensiones de las diferentes partes del biodigestor se realiza según la metodología planteada por J.A. Guardado [1], utilizando los resultados obtenidos en el levantamiento del potencial de biomasa de la vaquería¹⁰.

Cámara de digestión

La parte principal del biodigestor, que marcará el dimensionamiento del resto de partes, es la cámara de digestión. Las fórmulas fundamentales que se emplean para el dimensionamiento de la cámara de digestión del biodigestor de cúpula fija se exponen en la *Figura 4.4*. Para facilitar el cálculo, se divide el volumen de la cámara de digestión en tres partes: un segmento esférico, un cilindro y un cono.

¹⁰ Véase Apartado 5.4.



<ul style="list-style-type: none"> • Radio básico: $R = \sqrt[3]{V_{tot} / (\pi \cdot 1,121)}$ • Unidad proporcional: $U = R/4$ • Proporciones: $Rc = 5 \cdot U$ $D = 8 \cdot U$ $hc = 2 \cdot U$ $hp = 3 \cdot U$ $ht = 0,15 \cdot D$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen del digestor: $V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3 = R^3 \cdot \pi \cdot 1,121$ • Volúmenes parciales: Cilindro: $V_1 = R^2 \cdot hp \cdot \pi$ Segmento esférico: $V_2 = hc^2 \cdot \pi \cdot [Rc - (hc/3)]$ Cono base: $V_3 = R^2 \cdot \pi \cdot (ht/3)$
<p>donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> U: Unidad básica R: Radio básico Rc: Radio de la cúpula D: Diámetro del cilindro 	<ul style="list-style-type: none"> hc: Altura de la cúpula hp: Altura de la pared ht: Altura del cono base

Figura 6.8: Fórmulas para el dimensionamiento de la cámara de digestión.

Los pasos que se deben seguir para el empleo de las fórmulas descritas en la Figura 4.4 son los siguientes:

1. Se calcula el volumen total (V_{tot}), como se explica en el apartado 4.2.6.
2. Se calcula el radio básico del volumen predefinido (R).
3. Se calcula la unidad básica, en metros ($U = R/4$).

4. Se determinan las proporciones (R_c , D , h_c , h_p , h_t).

Número de biodigestores

Según el volumen de biomasa y de biogás que se obtenga, es posible que al diseñar el sistema de generación con un solo biodigestor las dimensiones de éste sean excesivas, haciendo que ocupe mucho espacio y que los procedimientos para su construcción y operación se compliquen notablemente. Actualmente se considera que los biodigestores de más de 100 m^3 requieren tecnologías de generación de biogás más complejas que las elegidas en el presente diseño, ya que un volumen tan grande de la cámara de digestión hace que no sea posible alcanzar las condiciones de operación adecuadas para que se produzca la digestión anaerobia en los biodigestores de cúpula fija .

Una solución a este problema consiste en utilizar varios biodigestores en paralelo. Cada uno de ellos tendrá las mismas dimensiones, y la suma de sus volúmenes será igual al volumen total de digestión.

A la hora de decidir el número de biodigestores en paralelo se debe tener en cuenta además el hecho de que cuanto mayor sea el número de los mismos, mayor será la probabilidad de que el sistema falle por una avería en cualquiera de los biodigestores, y mayor la dificultad de detección de la misma. También se necesitará un sistema de control y de tuberías más complicado, y la superficie total que ocupará la instalación será mayor. Por todo ello, se deduce que el número de biodigestores debe ser el mínimo posible que asegure el correcto funcionamiento de la instalación.

Se concluye, por tanto, que el número de biodigestores de nuestro sistema deberá ser el mínimo que permita un volumen de la cámara de digestión inferior a 100 m^3 .

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones que se obtienen para cada biodigestor según el número de biodigestores elegido, sabiendo que el volumen total de digestión ¹¹ debe ser de 130 m^3 .

¹¹ Véase *Apartado 5.2.7*.

Número de biodigestores	Volumen de cada biodigestor (m ³)	Radio del biodigestor (m)	Altura del biodigestor (m)
1	130	3,33	5,16
2	65	2,64	4,10
3	43	2,30	3,57
4	32,5	2,10	3,25
5	26	1,95	3,02

Tabla 6.1: Dimensiones de cada biodigestor según el número de biodigestores en paralelo

Basándonos en esta tabla se deduce que para que los criterios expuestos se cumplan, el sistema deberá estar formado por **2 biodigestores en paralelo**.

En el *Plano N° 1* se muestran las dimensiones finales de la cámara de digestión de cada uno de los dos biodigestores.

Tanque de compensación

La cámara de compensación o tanque de compensación tiene forma cilíndrica y un volumen equivalente al volumen de gas contenido en la cúpula esférica de la cámara de digestión (V_2):

$$V_{tc} = V_2 = h_c^2 \cdot \pi \cdot \left[R_c - \frac{h_c}{3} \right] = 15,65 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 4.10.})$$

Esto es así porque el volumen de mezcla que pasa al tanque es el que desaloja el biogás al formarse, el cual se acumula en la cúpula esférica de la cámara de digestión.

El radio del tanque de compensación se toma igual al de la cámara de digestión (R). La altura se calcula mediante la *Ecuación 4.11*, sustituyendo el volumen de la cúpula esférica calculado en la *Ecuación 4.10*. y añadiendo un margen de seguridad de 20 cm de altura.

$$h = \frac{V_{tc}}{\pi \cdot R^2} + 0,2 = 0,92 \approx 1 \text{ m} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

donde:

h : Altura del tanque de compensación (m)

V_{tc} : Volumen del tanque de compensación (m^3)

R : Radio de la cámara de digestión (m)

Las dimensiones finales del tanque de compensación pueden observarse en el *Plano N° 1*.

Cuello

El cuello del biodigestor tiene como función permitir el acceso o visión al interior del biodigestor, a la vez que en él se coloca la tubería que recoge el biogás acumulado en el interior de la cúpula. Conecta, por tanto, la cámara de digestión que se encuentra bajo tierra con la superficie.

Se apoya en la parte superior de la cúpula, y está constituido por un muro cilíndrico y una tapa que proporciona un cierre hermético. De la parte alta del muro cilíndrico sale el tubo de extracción de biogás, que lo conduce hasta los sistemas de aprovechamiento.

Dado que el cuello debe permitir el acceso al interior del biodigestor, se considera que el diámetro mínimo suficiente para que una persona pueda pasar por la abertura sin problemas es de 0,5 m. En este caso, dado el tamaño del digestor, el diámetro de la abertura será de 0,6 m.

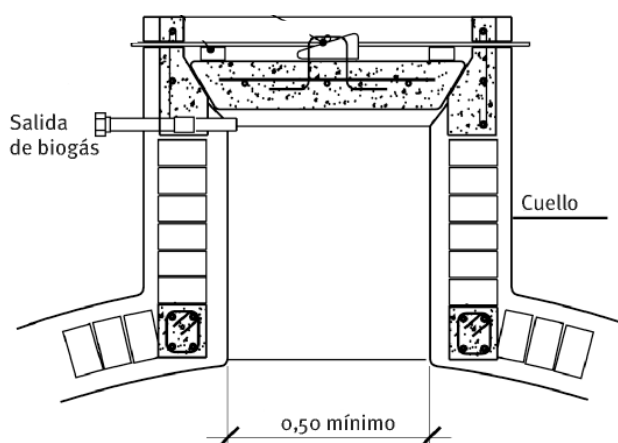


Figura 6.9: Cuello del biodigestor de cúpula fija.

En el *Plano N° 1* se aprecian las medidas finales del cuello del biodigestor.

Cámara de carga

La cámara de carga está formada por dos partes principales:

- Tanque de mezcla, en el cual se realiza la mezcla excreta-agua que introducimos al biodigestor diariamente.
- Desarenador, que tiene la función de evitar que materiales inertes (piedras, palos, etc.) que pueda arrastrar el sustrato entren al biodigestor.

El tanque de mezcla, en cualquier tipo de planta con alimentación semicontinua, debe tener un volumen interno un poco mayor que el volumen de carga diario, entre 10-20 %. Dicho volumen de carga diario será el volumen de biomasa disponible¹².

Se debe construir el suelo del desarenador con una pequeña inclinación hacia el lado opuesto del tubo de carga, por donde los materiales inertes puedan bajar hasta el fondo por gravedad. En el fondo es conveniente dejar una abertura para evacuar estos materiales.

Por lo general, el tubo que comunica el desarenador con el biodigestor es de PVC y tiene un diámetro que varía entre 10 y 15 cm, en dependencia del tamaño de la planta. El extremo que penetra en el biodigestor debe estar a una cierta altura del fondo, para evitar que el material sedimentado lo obstruya. Si el tamaño de la planta lo justifica, pueden emplearse dos tubos de carga.

Como en este tanque es donde se efectúa la mezcla de excreta con agua, se requiere colocar un sistema para tapar el tubo de descarga (que conecta la cámara de carga con el desarenador) y el de evacuación de sedimentos mientras se esté realizando la mezcla.

Todas las características descritas se muestran en la *Figura 4.6*.

¹² Véase *Apartado 4.2.3*.

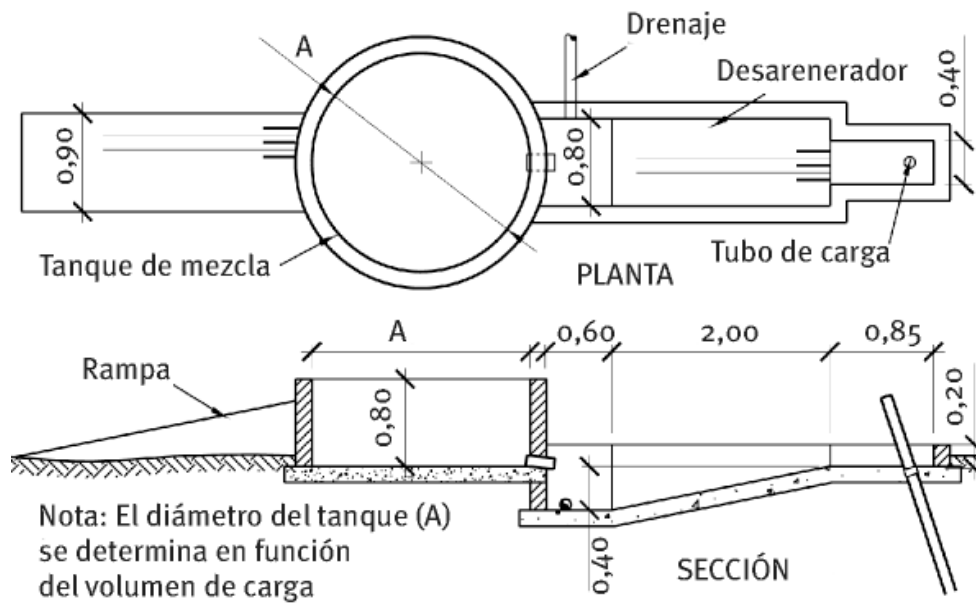


Figura 6.10: Cámara de carga con sus diferentes partes.

Por tanto, para el cálculo del volumen del tanque de mezcla tomaremos un margen de seguridad del 15 % respecto al volumen de carga, como se muestra en la *Ecuación 4.8*.

$$V_{tm} = 1,15 \cdot V_b = 2,52 \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 4.8})$$

donde

V_{tm} : Volumen del tanque de mezcla (m^3)

V_b : Volumen de biomasa disponible (m^3)

Una vez obtenido el volumen del tanque procedemos a hallar el diámetro del mismo utilizando la *Ecuación 4.9*, teniendo en cuenta que la altura del tanque será de 0,80 m.

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{tm}}{0,8 \cdot \pi}} = 2 \text{ m} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

donde

A : Diámetro del tanque de mezcla (m^3)

V_b : Volumen de biomasa disponible (m^3)

Por otro lado, dado que la cámara de carga debe alimentar a los dos biodigestores del sistema, se deberá dividir en dos el caudal de la mezcla antes de que entre en los biodigestores. Para ello se coloca en el último tramo del desarenador una pared divisoria y dos tubos de carga, uno en cada división, que alimentarán cada uno a un biodigestor. Ambos tubos tendrán un diámetro de 10 cm, y el extremo que entra en la cámara de digestión estará a 1 m de altura sobre el fondo.

El tubo de descarga será de 10 cm de diámetro y el de evacuación de sedimentos de 5 cm. Para cerrarlos en el momento de fabricar la mezcla, se coloca una compuerta corredera en cada uno de ellos. La compuerta se sube para abrir el paso de la mezcla, y se baja para cerrarlo.

Las dimensiones finales de la cámara de carga se muestran en el *Plano N° 2*.

Sistema completo

En conclusión, el sistema de generación de biogás estará formado por dos biodigestores en paralelo, cada uno de ellos con la cámara de compensación correspondiente. La cámara de carga, sin embargo, será común a ambos biodigestores. En la *Figura 6.11*. se puede ver una imagen del sistema diseñado:

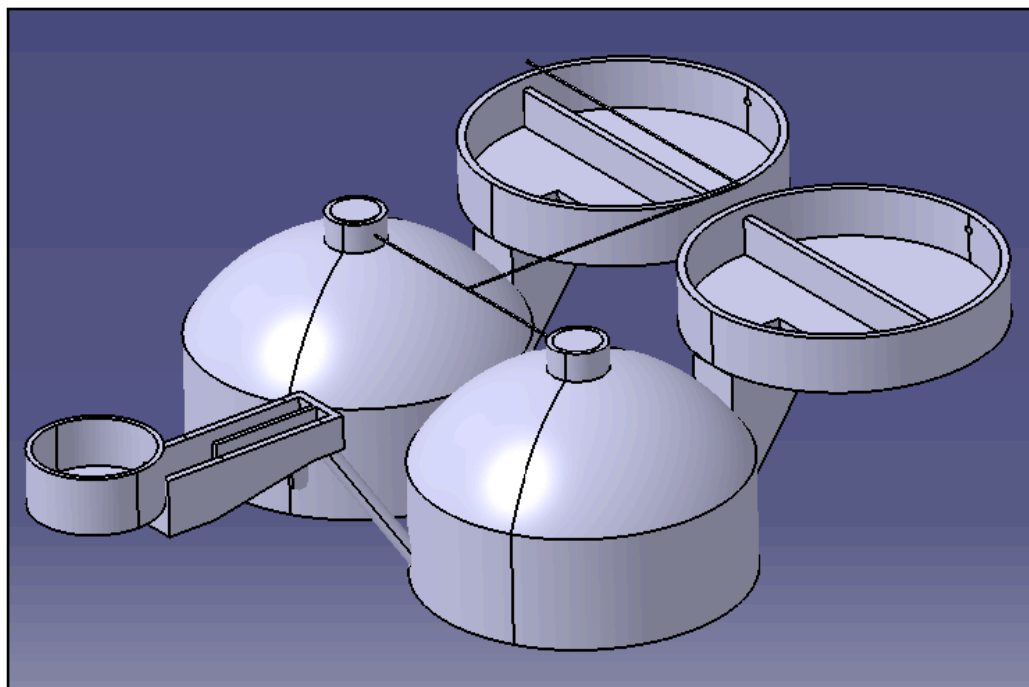


Figura 6.11: Sistema de generación de biogás para la Vaquería 101

Las dimensiones del sistema completo se muestran en el *Plano N° 3*.

Elección de las tecnologías de aprovechamiento del biogás

7. Elección de las tecnologías de aprovechamiento del biogás

En el *Apartado 4.2.* se han descrito las diferentes actividades de la vaquería, así como los equipos que se utilizan para realizar estas actividades. Con esta información se puede apreciar que en la vaquería existirán diferentes necesidades energéticas, las cuales requerirán diferentes formas de utilización del biogás para ser cubiertas. Concretamente, se puede afirmar tras el análisis de estas actividades que las formas de utilización del biogás requeridas serán tres:

- Cocción de alimentos
- Iluminación
- Generación de energía eléctrica

Por tanto, en este punto se necesitará seleccionar y describir las tecnologías adecuadas para cada uno de estos usos del biogás. Esto nos permitirá, en apartados posteriores, analizar la energía que cada uno de los equipos demandará utilizando estas tecnologías.

7.1. Cocción de alimentos

El uso del biogás en las cocinas constituye una tecnología limpia, que no produce hollín, ni suciedades en ollas, los gases no son nocivos a los ojos y su combustión no perjudica a los pulmones. La ignición es fácil y el control de la chispa resulta cómodo. La efectividad puede llegar al 60 % en cocinas bien operadas. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos y su fácil modificación para el uso con biogás hace promisoría e interesante su utilización a gran escala.

Las cocinas deben satisfacer ciertos requerimientos de utilidad y seguridad, que pueden cambiar considerablemente de una región a otra, por lo que no existe un quemador de biogás estandarizado. El tipo de cocina de biogás más utilizado es el de dos quemadores:



Figura 7.1: Cocinas de biogás de dos quemadores. [14]

7.1.1. Diseño y modificación de los quemadores

En los países en vías de desarrollo, el principal prerequisite es la disponibilidad de quemadores específicamente diseñados para biogás o modificados de los disponibles en el mercado. Las relativamente grandes diferencias en el biogás entre diferentes plantas, o incluso en la misma planta (presión de gas, temperatura, valor calórico, etc.) deben ser tenidas en cuenta a la hora del diseño. Debido a esto, la modificación de cocinas comerciales es una tarea más bien experimental. En relación con los quemadores más comunes, como son los de propano/butano, debemos tener en cuenta que:

- El gas propano/butano tiene un valor calórico al menos tres veces mayor que el biogás, como puede verse en la *Tabla 3.8*. Esto implica que la cocción con biogás es más lenta.
- La velocidad de propagación de la llama es de 43 cm/seg, la mitad que el gas propano/butano. La llama tiende a escaparse de los quemadores.
- La conversión a biogás siempre resulta en menores valores de eficiencia.

El objetivo de las variaciones debe ser el obtener una llama estable y compacta, que cubra adecuadamente las cazuelas utilizadas en la cocina. En la *Figura 3.16* se pueden ver diferentes diseños de quemadores de biogás.

Las modificaciones entonces deben incluir:

- Aumentar la sección del inyector en un factor de 2-4 para aumentar el caudal de gas.
- Modificar la geometría del paso de aire exterior.
- Aumentar el tamaño de las aberturas del quemador.
- La presión de utilización debe estar en 75-150 mm de columna de agua.

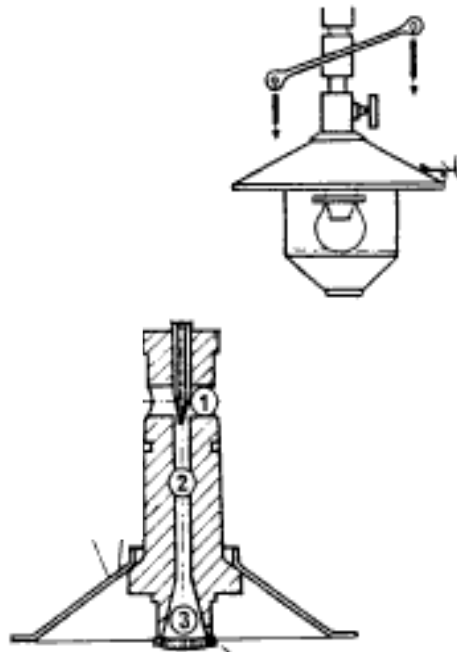


Figura 7.2: Diferentes diseños de quemadores de biogás.

7.2. Iluminación

Las lámparas de biogás son especialmente útiles en zonas sin acceso a electricidad, ya que la iluminación es una necesidad básica en la vivienda. No obstante, su bajo consumo permite utilizarlas en cualquier recinto con una planta de biogás instalada para sustituir a las lámparas eléctricas, con un bajo costo económico y de gas.

Las lámparas de biogás presentan una eficiencia de alrededor del 3 %. Como resultado de la baja eficiencia, mucha energía se disipará en forma de calor y la lámpara alcanzará altas temperaturas. La llama de biogás es de color azul y no ilumina bien, por lo que para una correcta iluminación se requerirá el uso de mantillas, como en las lámparas de gas licuado o petróleo. Así, cuando la llama calienta el metal especial de la mantilla a temperaturas superiores a los 1000 °C, éste se pone incandescente produciendo luz blanca. La luz es direccionada por el panel reflector, y el cristal protector previene la pérdida de calor [14].



1. Aguja de inyección de biogás
2. Tubo mezclador
3. Punto de llama con mantilla

Figura 7.3: Esquema de lámpara de biogás. [14]

El consumo de las lámparas es de 0,10 a 0,15 m³/hora para una iluminación equivalente a una bombilla incandescente de unos 60 W, aunque este valor puede variar entre los 25 y los 100 W. Para ello se requiere una presión de entre 70 y 85 mm de columna de agua. Al aumentar la presión el brillo es mayor, pero también crece el consumo de biogás [1].

7.2.1. Ajuste de la lámpara

El control de las lámparas de biogás se realiza ajustando el paso de gas y aire. El objetivo es conseguir un brillo uniforme y estable, con un leve murmullo constante producido por el flujo ardiente de biogás.

Para un ajuste correcto se debe hacer que el cuerpo incandescente (mantilla) quede rodeado por el núcleo de la llama (parte más caliente) en régimen de consumo mínimo. Si la mantilla es muy grande se producirán puntos oscuros, y si la llama es muy grande el consumo de gas será demasiado. Es importante que la mezcla de gas y aire sea completa al llegar a la mantilla, y que el espacio de aire que la rodea se caliente lo suficiente.

Para comprobar el correcto funcionamiento, se debe colocar el cristal de la lámpara y esperar de 2 a 5 minutos hasta que se alcance la temperatura normal de operación.



Figura 7.4: Lámpara de biogás en Tailandia.

7.2.2. Problemas y precauciones

El punto más delicado y peligroso de la lámpara es la mantilla. Tiene una corta duración y debe reemplazarse con relativa frecuencia.

Dado que el metal especial de la mantilla alcanza muy altas temperaturas, si ocurre un accidente pueda producirse un incendio, por lo que las lámparas deben ser manipuladas con cuidado.

Se debe tener un buen control de la presión de gas (especialmente con digestores de cúpula fija), ya que si es muy baja la mantilla no arderá, pero si es demasiado alta (por encima de 300 mm de columna de agua), ésta puede explotar.

7.3. Generación de energía eléctrica

La generación de electricidad, utilizando biogás, es una posibilidad real y altamente documentada. Son muchas las alternativas posibles para generar electricidad empleando el biogás como combustible: motores de combustión interna, celdas de combustible, turbinas de gas y de vapor, etc. De entre este abanico de posibilidades habrá que escoger la tecnología que se considere más

apropiada para la generación de electricidad con biogás. La siguiente tabla muestra una comparación entre las posibles tecnologías:

	MACI C.DIESEL	MACI C.OTTO	TURBINA DE VAPOR	TURBINA DE GAS		MICRO- TURBINA	PILA DE COMBUSTI BLE
				Ciclo Simple	Ciclo Combinado		
η eléctrico (PCI)	30-50%	25-45%	30-42%	25-40%	40-60%	20-30%	40-70%
Rango P (MW)	0,01-30	0,15-5	---	3-200		0,025-0,25	0,2-2
Espacio requerido (m ² /kW)	0,02	0,02-0,03	<0,01	0,002-0,06		0,014-0,14	0,06-0,4
Coste instalación (€/kWe)	780-1480	780-1480	780-950	670-860		480-1240	>2850
Coste OM (€/kWh)	0,005-0,008	0,007-0,015	0,004	0,002-0,008		0,002-0,01	0,003-0,015
Disponibilidad	90-95%	92-97%	≈100%	90-98%		90-98%	>95%
Entre puestas pto.	Anual	Anual	>50000	30000-50000		5000- 40000	10000- 40000
tiempo arranque	10s	10s	1h-1día	10min-1h		60s	3h-2días
Presión combustible (bar)	<0,35	0,07-3	---	8,5-35		3-7	0,04-3
Combustible	Gasoil, aceites residuales	GN, biogás, propano	Todos	GN, biogás, propano, aceites destilados		GN, biogás, propano, aceites destilados	H2, GN, propano
Ruido	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Alto (requiere edificio cerrado)		Moderado (requiere edificio cerrado)	Bajo (no requiere aislamiento)
NOx (kg/MWh)	1,36-15	1-12,7	0,82	0,14-1,82		0,18-1	0,009
Uso para calor recuperado	AC, vapor BP, "district heating"	AC, vapor BP, "district heating"	Vapor BP-AP, "district heating"	Calor directo, AC, vapor BP-AP, "district heating"		Calor directo, AC, vapor BP	AC, vapor BP
Temperatura aprovechable (°C)	82-480	150-260	---	260-595		205-345	60-370

Tabla 7.1: Comparación de tecnologías para la generación de electricidad con biogás¹³

Una definición muy ajustada de tecnología apropiada sería: Aquella que responde adecuadamente a las necesidades sociales y ecológicas de las personas, que es descentralizada y a pequeña escala, manejable, que emplea fuentes renovables de energía, que es de bajo coste, que fomenta el empleo, que está basada en la comunidad y en relaciones humanas no autoritarias y no jerárquicas, que libera a las personas de cargas alienantes, permitiéndolas ser más creativas y participar en la comunidad, profundizando así la democracia. Esta extensa definición es en la mayoría de los casos imposible de cubrir, por lo que se buscará la tecnología que aúne la mayor cantidad de características implícitas en la definición.

¹³ Fuente: Review of Combined Heat and Power Technologies, 1999

Debido a su autonomía, compatibilidad y accesibilidad se considera que la tecnología más apropiada para los proyectos rurales de generación de electricidad con biogás es el **motor alternativo de combustión interna**.

7.3.1. Generación con motores de combustión interna alternativos

El biogás puede ser empleado como combustible en motores de combustión interna con el cometido de generar energía eléctrica. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, pero una desventaja es su baja velocidad de encendido. Sólo se registra una ligera disminución de la potencia y el motor trabaja algo más caliente que con el combustible líquido.

Los equipos de generación de energía eléctrica pueden haber sido diseñados para funcionar con biogás como combustible, o pueden estar pensados para funcionar con un combustible diferente. Este último grupo englobaría a los motores a gas, gasolina o diesel, los cuales pueden ser modificados para funcionar con biogás, añadiéndoles posteriormente un generador eléctrico. En cuanto a los equipos diseñados para funcionar específicamente con biogás, se puede encontrar en el mercado grupos electrógenos con motor integrado a biogás.

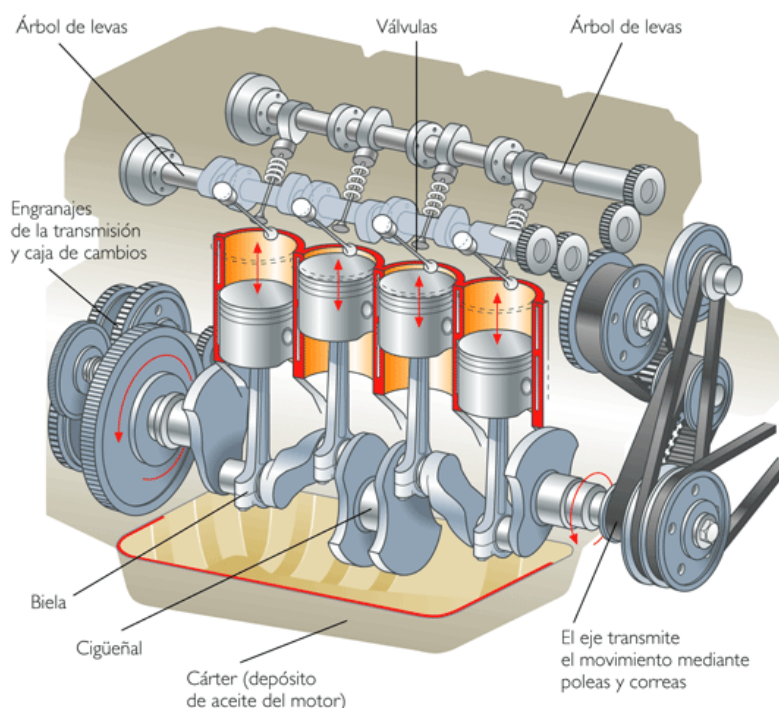


Figura 7.5: Motor de cuatro tiempos.

7.3.2. Conversión de motores a biogás

- **Motores de gasolina:** Los motores de combustión a gasolina pueden funcionar con biogás con una merma de la potencia máxima de entre un 20 y un 30%. Para ello se les realiza una simple adaptación, que consiste en colocar entre el filtro del aire y el carburador una “T” por donde se suministra el biogás al sistema. Al ser alimentado con biogás directamente al colector de admisión, el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión. Es por ello que se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrada por el generador. Para el caso de cargas variables, el flujo de gas hacia el motor se debe regular con un sistema de control especialmente diseñado, que garantice que el flujo del gas que se inyecte en el motor pueda responder a las diferentes demandas de potencia debido a las variaciones de carga eléctrica, provocada por el constante entrar y salir de cargas.
- **Motores diesel:** Los motores a diesel pueden operar con una sustitución del diesel por biogás de hasta un 70% con un consumo de diesel del 30% restante. Al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo el motor no sufre ninguna alteración. En estos motores la mezcla de diesel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor. Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el gobernador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diesel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga. Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diesel, una vez arrancado el mismo se realiza la transferencia de biogás gradualmente hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás por diesel porque puede dañar el motor.
- **Motores a gas:** En los motores de combustión a gas el combustible utilizado es generalmente gas natural. El gas natural es un hidrocarburo compuesto

principalmente por metano (CH₄) y su poder calorífico es muy parecido al de los combustibles derivados del petróleo. Para que un motor pueda funcionar con gas natural debe de ser de explosión con encendido por chispa (Ciclo Otto). El proceso de combustión es muy similar al de un motor de gasolina y tan solo se diferencia del mismo en la tecnología de admisión del combustible. El aire aspirado por el motor se mezcla en el colector de admisión con el gas natural por efecto venturi o por inyección. La mezcla es introducida en el cilindro por la válvula de admisión para posteriormente ser comprimida y explosionada tras saltar la chispa en la bujía. Las modificación que se deben realizar al motor para utilizarlo en la generación de electricidad empleando biogás como combustible consiste en modificar levemente la presión de inyección del gas. El porcentaje de sustitución de biogás por gas es del 100%, pudiéndose realizar una conexión de la tubería de biogás al sistema de modo que el equipo pueda operar con ambos combustibles si se cree conveniente.

7.3.3. Grupos electrógenos a biogás

Los beneficios que conllevan la generación de biogás y su uso para generar energía han propiciado el desarrollo de esta tecnología. De esta forma han aparecido en el mercado empresas que ofertan grupos electrógenos preparados para funcionar exclusivamente con biogás. Un grupo electrógeno a biogás es una maquina que, a través de un motor de combustión interna cuyo combustible es biogás, mueve un generador eléctrico. El motor que se encarga de transformar la energía química contenida en el biogás en energía mecánica que hará girar el alternador. Al ser el combustible biogás, los motores que se emplean son de ciclo Otto y son estructuralmente similares a los motores a gas natural. Por su parte, el generador eléctrico se encarga de producir la energía eléctrica de salida a partir de la energía mecánica del motor. Generalmente se trata de alternadores autorregulados y sin escobillas, los cuales van acoplados de manera precisa al motor. Dado que el consumo específico de un grupo electrógeno a biogás suele estar entre 0,55 y 0,7 m³/kWh, un metro cúbico de biogás permite generar entre 1,4 y 1,8 kWh.



Figura 7.6: Grupo electrógeno a biogás de 3 kW.

Como principales ventajas de los grupos electrógenos a biogás se puede decir que disponen de alternadores robustos y preparados para soportar las vibraciones que ocasiona la combustión de biogás, así como de motores de bajas revoluciones que aumentan la vida útil del mismo. Además, al tratarse de grupos electrógenos, contarán con un sistema de regulación del motor que permitirá trabajar con cargas variables. El regulador del motor es un dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante del motor con relación a los requisitos de carga. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del alternador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida.

Se trata de motores adecuados para biogás por lo que se evita realizar modificaciones que en los anteriores motores eran necesarias. Para un correcto funcionamiento de estos grupos electrógenos, el biogás deberá ser suministrado a una determinada presión que puede estar en el orden de 10-100 mbar. Desafortunadamente, la exclusividad de esta tecnología la lleva a ser más cara.

7.3.4. Elección del equipo

El **grupo electrógeno a biogás** se considera el equipo más adecuado para la generación de electricidad en el presente proyecto. El motivo principal que impulsa a esta elección es que se trata de la tecnología que más se adecua al combustible que se va a emplear y al funcionamiento con carga variable. Además, la vida útil del equipo será presumiblemente mayor que en otras tecnologías por encontrarse adecuado a funcionar con biogás y se contará con una garantía por parte de la empresa que suministra el equipo, cosa que se pierde en el caso de emplear un equipo que se modifique para el empleo de biogás.

Análisis de la demanda

8. Análisis de la demanda

La caracterización de la Vaquería 101 ha permitido conocer a fondo las características y el funcionamiento de los equipos utilizados en la misma. Sin embargo, para seleccionar y dimensionar el sistema de aprovechamiento del biogás, será necesario analizar estos equipos en términos de demanda energética, tanto eléctrica como térmica, para posteriormente estimar la cantidad de biogás que necesitará el sistema para cubrir dicha demanda. En este apartado se realiza dicho análisis.

8.1. Energía eléctrica

El sistema eléctrico cubano brinda servicios a la totalidad de la esfera productiva estatal, es decir, a las compañías productivas que son propiedad del Estado. Entre estas compañías se encuentra la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos, que por tanto no tiene que pagar a ninguna empresa privada por el suministro de electricidad. En lo que concierne al presente proyecto, esto significa que la empresa no dispone de facturas eléctricas que se puedan analizar para averiguar el consumo mensual ni los picos de potencia en la Vaquería 101.

Por consiguiente, la manera elegida de estudiar la demanda eléctrica de la vaquería será analizando los datos disponibles de potencia y horas de funcionamiento de cada uno de los equipos eléctricos¹⁴, para así obtener su consumo teórico diario y elaborar un modelo de potencia requerida a lo largo del día.

8.1.1. Levantamiento de cargas eléctricas

Un levantamiento de cargas permite obtener el consumo de las instalaciones a lo largo del día y se lleva a cabo teniendo en cuenta la potencia demandada por cada una de las máquinas de las instalaciones y la franja horaria en la que operan las mismas.

Obsérvese que el levantamiento se incluye el baño de garrapaticida a pesar de que solamente se realiza un día cada mes. Así se podrá decidir si se tiene en

¹⁴ Véase *Apartado 4.2.8*.

cuenta a la hora de dimensionar el sistema de aprovechamiento asegurando que éste sea capaz de afrontar el aumento de consumo durante ese día, o si por el contrario no se tendrá en cuenta y se utilizará otra fuente de energía para esta tarea.

Equipo	Cantidad	Potencia (kW)	Horas diarias	Consumo diario (kWh/día)
Motor ordeño mecánico	1	2,2	4,0	8,8
Compresor refrigeración	1	3,5	20,5	71,8
Motor moladora de forraje	1	5,5	1,0	5,5
Electrobomba baño garrapaticida	1	7,5	3,0	22,5
Electrodomésticos	1	0,3	24,0	6,7
TOTAL		19,0		115,3

Tabla 8.1: Cargas eléctricas en la Vaquería 101

Conociendo la franja horaria de funcionamiento de cada uno de los equipos, se elabora un modelo de demanda diario partiendo de una tabla en la que se muestra la simultaneidad de los procesos a lo largo del día.

Hora	Ordeño (kW)	Refrigerador (kW)	Moladora (kW)	Garrapaticida (kW)	Electrodomésticos (kW)	Potencia Total (kW)
00:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
00:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
01:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
01:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
02:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
02:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
03:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
03:30	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
04:00	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
04:30	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
05:00	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
05:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
06:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
06:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
07:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
07:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
08:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
08:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
09:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8

Hora	Ordeño (kW)	Refrigerador (kW)	Moledora (kW)	Garrapaticida (kW)	Electrodomésticos (kW)	Potencia Total (kW)
09:30	0	3,5	5,5	0	0,3	9,3
10:00	0	3,5	5,5	0	0,3	9,3
10:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
11:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
11:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
12:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
12:30	0	0	0	7,5	0,3	7,8
13:00	0	0	0	7,5	0,3	7,8
13:30	0	0	0	7,5	0,3	7,8
14:00	0	0	0	7,5	0,3	7,8
14:30	0	0	0	7,5	0,3	7,8
15:00	0	0	0	7,5	0,3	7,8
15:30	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
16:00	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
16:30	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
17:00	2,2	3,5	0	0	0,3	6,0
17:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
18:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
18:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
19:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
19:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
20:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
20:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
21:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
21:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
22:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
22:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8
23:00	0	3,5	0	0	0,3	3,8
23:30	0	3,5	0	0	0,3	3,8

Tabla 8.2: Levantamiento de cargas por hora

Esta información permite obtener la potencia máxima de las cargas de la vaquería y el consumo de energía diario. Las siguientes gráficas permite visualizar mejor dicha información, tanto para el día en que se realiza el baño de garrapaticida como para el resto de días del mes.

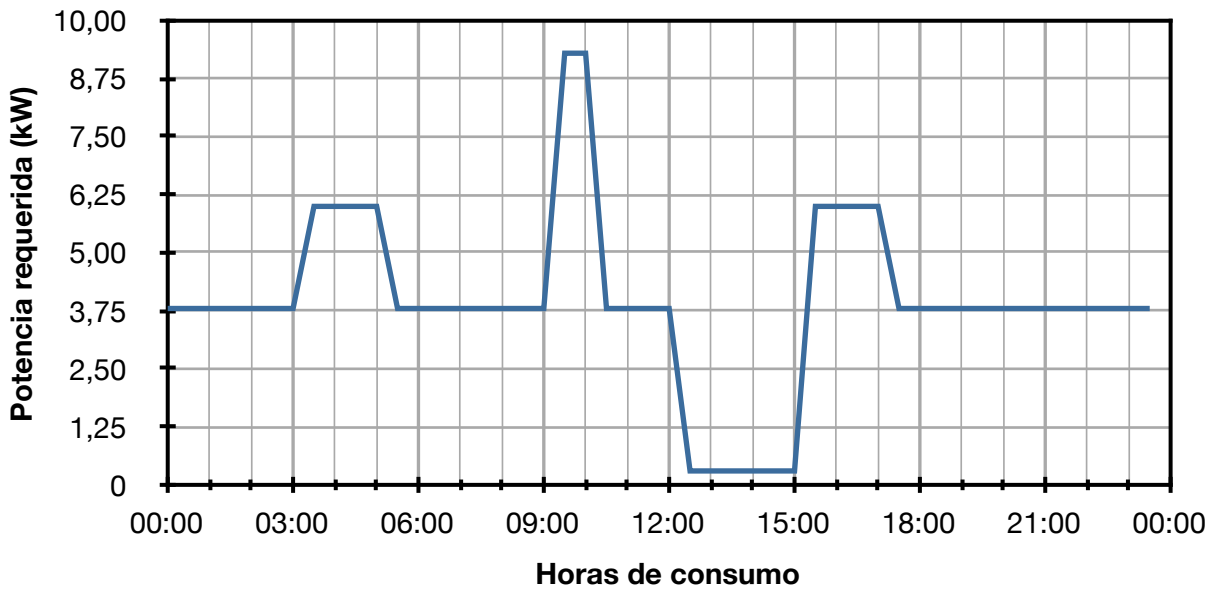


Figura 8.1: Modelo diario de demanda eléctrica en la Vaquería 101

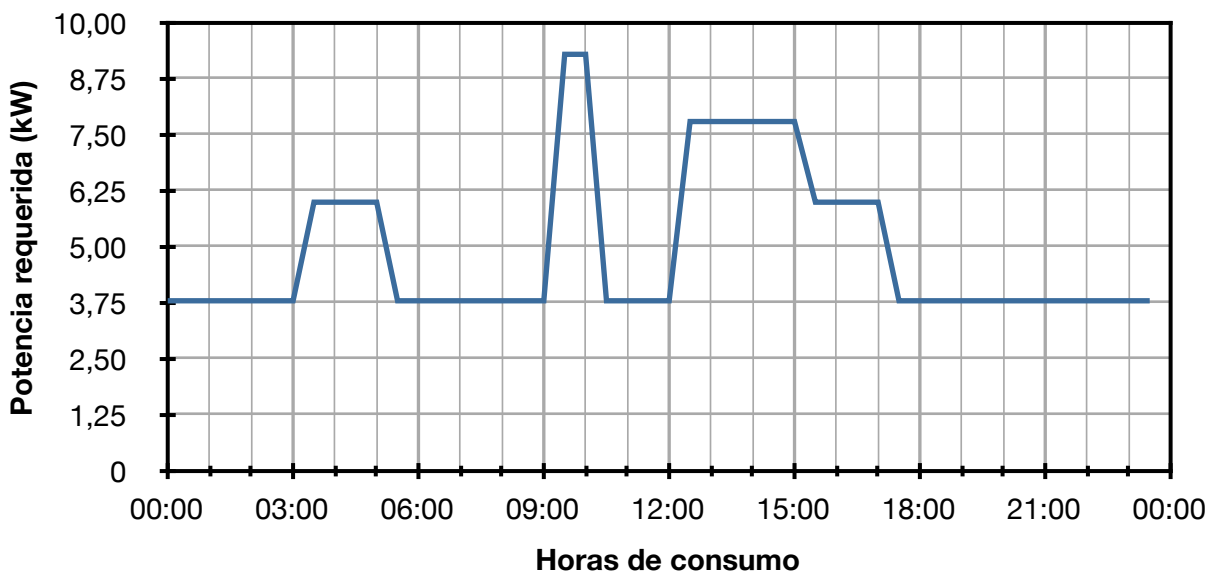


Figura 8.2: Modelo de demanda eléctrica el día del baño de garrapaticida en la Vaquería 101

Las conclusiones que se obtienen analizando el levantamiento de cargas son las siguientes:

- El pico de potencia máxima que puede llegar a demandar la vaquería es de 9,3 kW y se da durante una hora, entre las 9:30 y las 10:30.
- El consumo diario de las cargas en la vaquería es de 92,8 kWh/día, mientras que el día del baño de garrapaticida este valor aumenta hasta los 115,3 kWh/día.

- El consumo del sistema de refrigeración de leche (71,8 kWh/día) es muy superior al del resto de sistemas de la vaquería, suponiendo el 77,4% del consumo diario total.

Respecto a las conclusiones obtenidas cabe señalar que con un consumo de 92,8 kWh/día (115,3 kWh/día el día del baño de garrapaticida), se obtiene un consumo mensual¹⁵ de 2.899,3 kWh/mes, el cual se considera que permanecerá constante durante todo el año.

Se observa además que se dan varios picos de potencia que se reparten a lo largo de todo el día, en las horas en las que se realizan las diferentes actividades de la vaquería.

8.1.2. Demanda de biogás para energía eléctrica

Una vez conocida la demanda de energía eléctrica de los equipos en la vaquería, se puede realizar una estimación inicial de la cantidad de biogás necesaria para producir dicha energía, utilizando para los cálculos valores típicos de las diferentes magnitudes que intervienen. Esta estimación se utilizará en apartados posteriores para evaluar la cantidad de demanda eléctrica que se puede llegar a cubrir utilizando el biogás disponible, y diseñar el sistema de aprovechamiento del biogás en consecuencia.

No fue posible realizar una medición de la composición real del biogás procedente de la excreta generada por el ganado vacuno de la Vaquería 101, por lo que el porcentaje de metano en el biogás se ha estimado calculando la media de los valores hallados en diferentes estudios sobre el tema¹⁶.

Por tanto, se considera que el biogás procedente de la excreta de ganado vacuno está compuesto por un 65% de metano (CH₄), que tiene un poder calorífico de 9,47 kWh/m³. Utilizando un grupo electrógeno a biogás¹⁷ con una eficiencia

¹⁵ Realizando el cálculo para un mes de 31 días

¹⁶ Valor estimado tras consultar varias fuentes: Ajay Kumar Jha (2013), Hilbert (2010), Guardado (2007).

¹⁷ Véase *Apartado 3.5.3*

eléctrica del 26%¹⁸, se obtiene que para generar 1 kWh se necesitan 0,625 m³ de biogás:

$$\text{Consumo específico de biogás} = \frac{1 \text{ kWh}}{9,47 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,65 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \cdot 0,26 \frac{\text{kW}}{\text{kWh}}} = 0,625 \text{ m}^3$$

Con este cálculo podemos estimar la cantidad de biogás necesaria para cubrir la demanda de electricidad de cada uno de los equipos de la vaquería, que se muestra en la tabla siguiente:

Equipo	Consumo diario (kWh/día)	Biogás necesario (m ³ /día)
Motor ordeño mecánico	8,8	5,5
Compresor refrigeración	71,8	44,9
Motor moladora de forraje	5,5	3,4
Electrobomba baño garrapaticida	22,5	14,1
Electrodomésticos	6,7	4,2
TOTAL	115,3	72,1

Tabla 8.3: Biogás necesario diariamente para alimentar los equipos eléctricos de la Vaquería 101

Se estima, por tanto, que la demanda diaria de biogás será de **58 m³/día** y que aumentará a 72,1 m³/día el día del baño de garrapaticida.

8.2. Energía térmica

Una vez analizado el consumo de energía eléctrica que tiene lugar en la Vaquería 101 se pasa a analizar el consumo de energía térmica que se realiza en el mismo.

¹⁸ Valor estimado tras consultar la eficiencia de varios modelos de grupo electrógeno de baja potencia: AQL Engineering, Greenpower, Branco, Deutz Power Systems.

En la actualidad no existe consumo alguno de gas natural por parte de la vaquería. No se cubre ninguna demanda de energía térmica a modo de calefacción, ya que el clima tropical de la provincia de Pinar del Río¹⁹ permite que las reses estén en los corrales sin ningún tipo de calefacción. De igual manera, ni la vivienda del vaquero ni el resto de edificaciones requieren de calefacción, ya que en ninguna estación del año se llegan a producir temperaturas significativamente bajas. El único consumo de energía térmica que lleva a cabo en la vaquería es por parte de la cocina de la casa del vaquero, que actualmente funciona con leña.

El uso de leña para cocinar es un método sumamente problemático, especialmente en recintos cerrados, ya que en la combustión de la leña se produce gran cantidad de gases nocivos para pulmones y ojos, hollín y suciedad en las ollas, además de que su encendido resulta molesto y complicado, y su eficiencia energética es realmente baja. Es por esto que se sustituirá la cocina actual por una adaptada para su uso con biogás²⁰, que es una tecnología limpia y libre de humos, la ignición es fácil y el control de la chispa resulta cómodo.

Por otro lado, y por petición de la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos, se instalarán en la vaquería un determinado número de lámparas de biogás, que consumirán energía térmica para producir la llama.

8.2.1. Demanda de biogás para cocinar

La demanda de gas de las cocinas está influenciada principalmente por los hábitos alimenticios y la forma de cocinar de los usuarios, que cambian de una cultura a otra. Por regla general, las familias con una buena situación económica muestran mayor demanda que las familias pobres. También existe una relación con el precio de la energía, pues la energía cara será utilizada con mayor cuidado que la obtenida gratuitamente.

La demanda puede ser definida utilizando los tiempos diarios dedicados a cocinar, y la presión de salida del biogás. A una presión de 150 mm de columna de agua, el consumo de biogás por persona y comida está entre 150 y 300 litros de biogás. Se necesitarían, por ejemplo, 30-40 litros de biogás para hervir un litro de agua, 120-140 litros para 1/2 kg de arroz, y 160-190 litros para 1/2 kg de legumbres [14].

¹⁹ Véase *Apartado 4.1.2.*

²⁰ Véase *Apartado 3.5.1.*

La siguiente tabla se ha elaborado utilizando los criterios anteriores y teniendo en cuenta la influencia en la demanda de biogás de la dieta básica y la forma de cocinar típicas en Cuba:

Tipo de uso	Consumo (m ³ /usuario/día)
Cocina colectiva (comida)	0,20
Cocina colectiva (comida y cena)	0,35
Cocina individual (uso doméstico)	0,45

Tabla 8.4: Índices de consumo de biogás según tipo de cocina y su uso en Cuba. [1]

En casa del vaquero la cocina se utiliza diariamente para preparar la comida y la cena para los 4 miembros de la familia. Se considerará asimismo la posibilidad de que en algún momento se necesite cocinar para un número mayor de personas o se cocine una cantidad mayor de lo normal de alimentos. Para asegurar que esto sea posible se aplica al consumo de biogás un coeficiente de seguridad de 1,5. Por lo tanto, según la tabla anterior el consumo diario de biogás para cocinar en casa del vaquero será de **2,1 m³/día**:

$$\text{Demanda de biogás para cocina} = 0,35 \frac{\text{m}^3}{\text{usuario} \cdot \text{día}} \cdot 4 \text{ usuarios} \cdot 1,5 = 2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

8.2.2. Demanda de biogás para iluminación

Se considera que las lámparas de biogás instaladas consumirán 0,15 m³/hora, ya que la presión de utilización será de 85 mm de columna de agua²¹. Se instalarán un total de 10 lámparas en la Vaquería 101:

- 5 lámparas en los establos (una en cada uno de ellos)
- 2 lámparas en la sala de refrigeración
- 1 lámpara en la sala de ordeño
- 1 lámpara en la sala de generación de vacío
- 1 lámpara en la casa del vaquero

²¹ Véase Apartado 3.5.2.

Considerando que, salvo en la casa del vaquero, las lámparas de biogás solo funcionarán en el momento en que el vaquero esté realizando tareas dentro de la propia instalación, se considera que la media del tiempo de utilización de las lámparas es de 4 horas diarias. Por lo tanto, la demanda diaria de biogás para iluminación será de un máximo de **6 m³/día**:

$$\text{Demanda de biogás para iluminación} = 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \cdot 4 \text{ horas} \cdot 10 \text{ lámparas} = 6 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

8.2.3. Resumen de los resultados

A modo de resumen de este análisis se presenta una tabla con las demandas energéticas de la vaquería y que se desean cubrir empleando biogás.

Consumo diario de energía eléctrica	92,8 kWh/día
Consumo máximo de energía eléctrica	115,3 kWh/día
Demanda diaria de biogás para electricidad	58 m ³ /día
Demanda máxima de biogás para electricidad	72,1 m ³ /día
Demanda de biogás para cocinar	2,1 m ³ /día
Demanda de biogás para iluminación	6 m ³ /día

Tabla 8.5: Resumen de demandas de energía en la Vaquería 101

Suponiendo que se diseñara un sistema de aprovechamiento de biogás que se utilizase para cubrir todas las necesidades energéticas expuestas anteriormente, la cantidad total de biogás consumido diariamente para ello sería la siguiente:

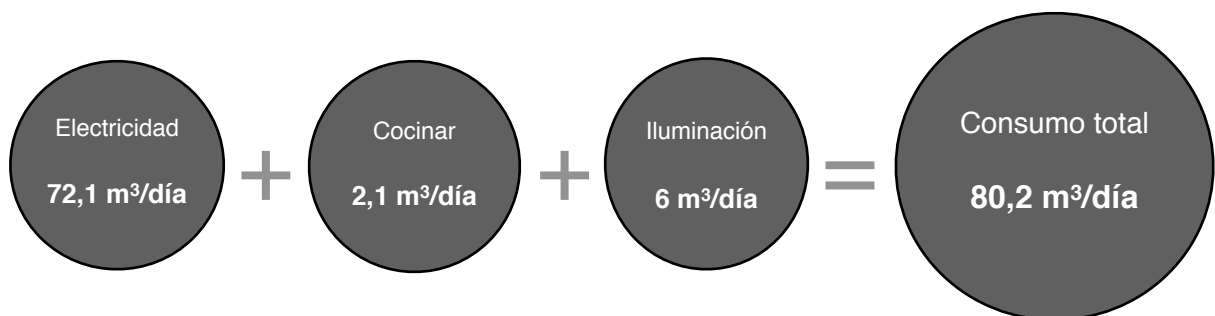


Figura 8.3: Esquema del biogás consumido para cubrir la demanda energética total en la Vaquería 101

Junto con el esquema anterior, la Figura 7.4. muestra el porcentaje del biogás total consumido que demanda cada uno de los procesos que tienen lugar de la vaquería.

En esta gráfica se aprecia que el consumo de biogás para procesos térmicos (cocina e iluminación) supone únicamente el 11% del total, mientras que todo el biogás restante lo consumen los procesos eléctricos. Dentro de estos últimos, se observa claramente cómo la refrigeración es, con diferencia, el proceso que más biogás consume, suponiendo un 55% del consumo total.

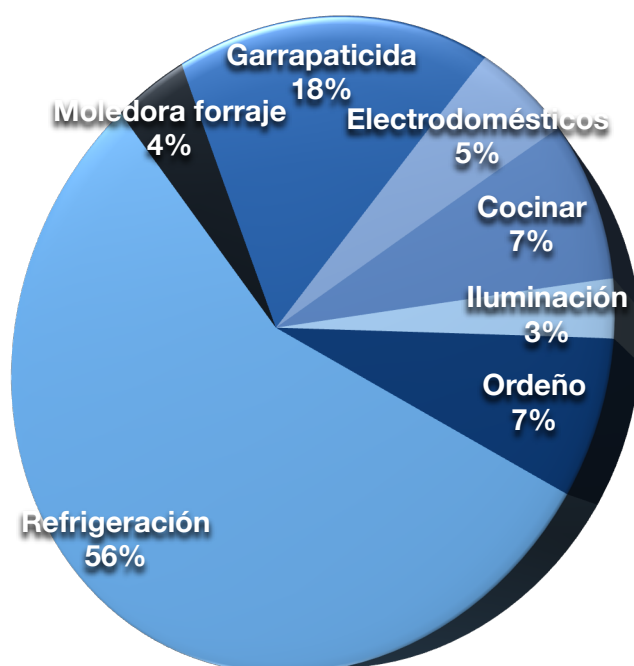


Figura 8.4: Porcentajes del consumo de biogás de los diferentes procesos en la Vaquería 101

8.3. Conclusiones del análisis

Ahora que ya se ha estimado la demanda total de biogás, es posible determinar si el potencial de biogás obtenido con la excreta generada en la vaquería será suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la misma, o si por el contrario solamente podrá cubrirse una parte de dichas necesidades.

La demanda total de biogás en la vaquería es de 80,2 m³/día. Dado que con la excreta obtenida diariamente en la vaquería se lograrán generar 43,9 m³/día de biogás²², se aprecia claramente que **el biogás generado no será suficiente para**

²² Véase Apartado 5.2.6

cubrir todas las necesidades energéticas de la vaquería. Concretamente, se podrá cubrir únicamente el 55% de la demanda energética total.

Así pues, se concluye que con el biogás disponible solamente se podrá producir energía para alimentar algunos de los procesos realizados en la vaquería. Por tanto será necesario decidir cuáles serán estos procesos para poder dimensionar el sistema de aprovechamiento del biogás.

Diseño del sistema de aprovechamiento del biogás

9. Diseño del sistema de aprovechamiento del biogás

En este apartado se seleccionará y dimensionará el sistema con el cual se generará energía a partir del biogás, y se caracterizará su funcionamiento. Para ello será necesario seleccionar previamente cuales serán las necesidades energéticas de la vaquería que se cubrirán con este sistema y qué equipos se utilizarán en cada caso, además de definir los parámetros para el dimensionamiento.

En este punto debe recordarse que los datos de consumos de biogás obtenidos en el apartado anterior provienen de una estimación, y que los valores reales pueden variar respecto a los estimados en varios aspectos:

- En caso de que el contenido de metano en el biogás fuese mayor al 65% estimado, se podría generar la misma electricidad consumiendo menos biogás. Si por el contrario fuese menor, se necesitaría más biogás del estimado para producir dicha electricidad. Dado que no ha sido posible realizar un estudio de la composición del biogás obtenido a partir de la excreta generada por el ganado de la Vaquería 101, no se podrá determinar el contenido real de metano hasta que el biodigestor se haya construido y se encuentre produciendo biogás.
- En relación a los aparatos eléctricos, es posible que el grupo electrógeno elegido una vez dimensionado el sistema tenga una eficiencia eléctrica diferente a la utilizada para estimar su consumo de biogás, la cual era del 30%²³. Si la eficiencia fuese mayor, el grupo electrógeno consumiría menos biogás del estimado, y por tanto se dispondría de mayor cantidad de biogás sobrante para otras aplicaciones.

Dado que no es posible determinar en este punto el valor real de estas magnitudes, a efectos del diseño se tomarán los valores estimados para el dimensionamiento del sistema de aprovechamiento del biogás.

²³ Véase *Apartado 8.1.2.*

9.1. Elección de las formas de aprovechamiento

Se ha visto claramente²⁴ que el biogás disponible no es suficiente para satisfacer toda la demanda energética existente en la vaquería, y que por tanto se hace necesario decidir qué cargas serán las que alimentemos con el sistema que se va a diseñar. Para aprovechar el biogás de la mejor manera posible y asegurar que se obtendrá el máximo beneficio, se analizarán las diferentes alternativas y se razonará cuál de ellas es la más acertada en nuestro caso.

9.1.1. Prioridad de uso del biogás

En primer lugar se compararán los consumos de biogás para alimentar los diferentes procesos con la cantidad de biogás disponible, para averiguar qué procesos pueden llegar a cubrirse completamente.

- **Procesos eléctricos:** Como se ha visto en el análisis de la demanda, las cargas eléctricas de la vaquería son las que consumen una mayor cantidad de biogás ya que ocupan el 89% de la demanda total²⁵. El volumen de biogás disponible es de 43,9 m³/día, y si se observa la Tabla 7.5. la demanda de biogás de los equipos eléctricos es de 72,1 m³/día. Por tanto el biogás disponible no será suficiente para todos los procesos eléctricos.
- **Procesos térmicos:** La demanda de biogás para procesos térmicos ocupa el 11% restante de la demanda total, siendo de 8,1 m³/día. De estos 8,1 m³/día, 2,1 m³ serán para cocinar y 6 m³ para iluminación. Por tanto con el biogás disponible se podrán alimentar los procesos térmicos al completo.

Como el objetivo de la utilización del biogás en la Vaquería 101 es intentar alimentar procesos completos, se decide cubrir completamente la demanda de energía térmica y destinar el biogás restante para alimentar el mayor número posible de cargas eléctricas.

²⁴ Véase *Apartado 8.4.*

²⁵ Véase *Apartado 8.3.*

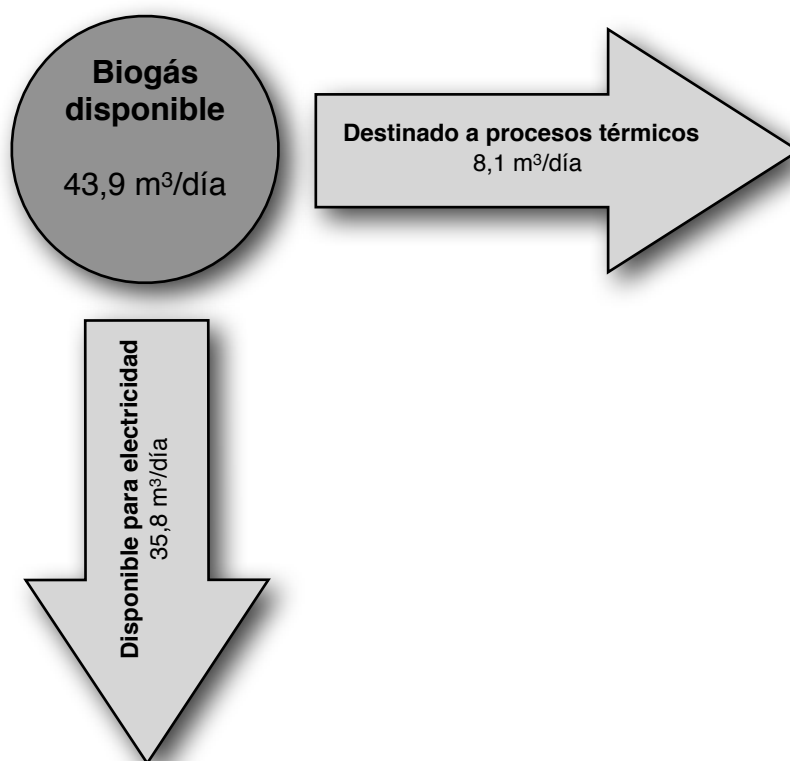


Figura 9.1: Uso del biogás producido en la Vaquería 101

Se puede ver con más claridad las cantidades de biogás destinadas a cada proceso en la siguiente tabla:

Tipo de proceso	Biogás disponible (m³/día)	Actividad	Demanda de biogás (m³/día)	Porcentaje de demanda cubierto
Térmico	8,1	Cocina	2,1	100%
		Iluminación	6	
Eléctrico	35,8	Ordeño	5,5	49,6%
		Refrigeración	44,9	
		Moler forraje	3,4	
		Baño garrapaticida	14,1	
		Electrodomésticos	4,2	
TOTAL	43,9		80,2	

Tabla 9.1: Biogás disponible para cada proceso de la Vaquería 101

Como se puede ver en la tabla, los 8,1 m³/día destinados a procesos térmicos bastarán para alimentarlos completamente. Sin embargo, el biogás restante destinado a procesos eléctricos sólo alcanzará a cubrir un 49,6% de la demanda de los mismos. Esto significa que el proceso de selección no termina aquí, ya que se deberá decidir qué cargas eléctricas se alimentarán con el biogás restante.

9.1.2. Elección de las cargas eléctricas alimentadas por el grupo electrógeno a biogás

Valorando las características y la demanda de biogás de cada una de las cargas eléctricas de la vaquería se intenta decidir cuáles de ellas son las más adecuadas para ser alimentadas por el grupo electrógeno a biogás, aprovechando los 35,8 m³/día destinados a los procesos eléctricos.

En primer lugar se descarta alimentar los electrodomésticos de la casa del vaquero, debido a que la carga a cubrir es demasiado pequeña. El equipo de combustión elegido para poder suministrar la potencia del resto de cargas sería demasiado grande para suministrar únicamente potencia a los electrodomésticos, como se puede ver en la *Tabla 8.1.*

También se descarta alimentar la bomba del baño de garrapaticida, debido a que solamente se utiliza una vez al mes. Por tanto, no tiene sentido dimensionar el sistema de generación, el cual funcionará diariamente, para alimentar esta carga. Queda pendiente estudiar si a lo largo de cada mes se acumulará suficiente biogás en el tanque de almacenamiento como para poder alimentar esta carga con el grupo electrógeno, y si el grupo electrógeno elegido tendrá la potencia suficiente para alimentar esta carga.

Por lo tanto, las tres cargas restantes serán las que se alimentarán con el grupo electrógeno a biogás:

- Compresor del sistema de refrigeración de leche
- Motor del sistema de ordeño mecánico
- Motor de la moledora de forraje

Si se observan sus demandas de biogás en la *Tabla 8.1.*, de entre estas tres cargas solamente la demanda de las dos últimas puede cubrirse completamente con el biogás disponible. Como el objetivo es cubrir por completo la demanda del

mayor número de procesos posible, se alimentará tanto al sistema de ordeño como a la moledora de forraje y el biogás restante se utilizará para alimentar el sistema de refrigeración durante el tiempo que sea posible.

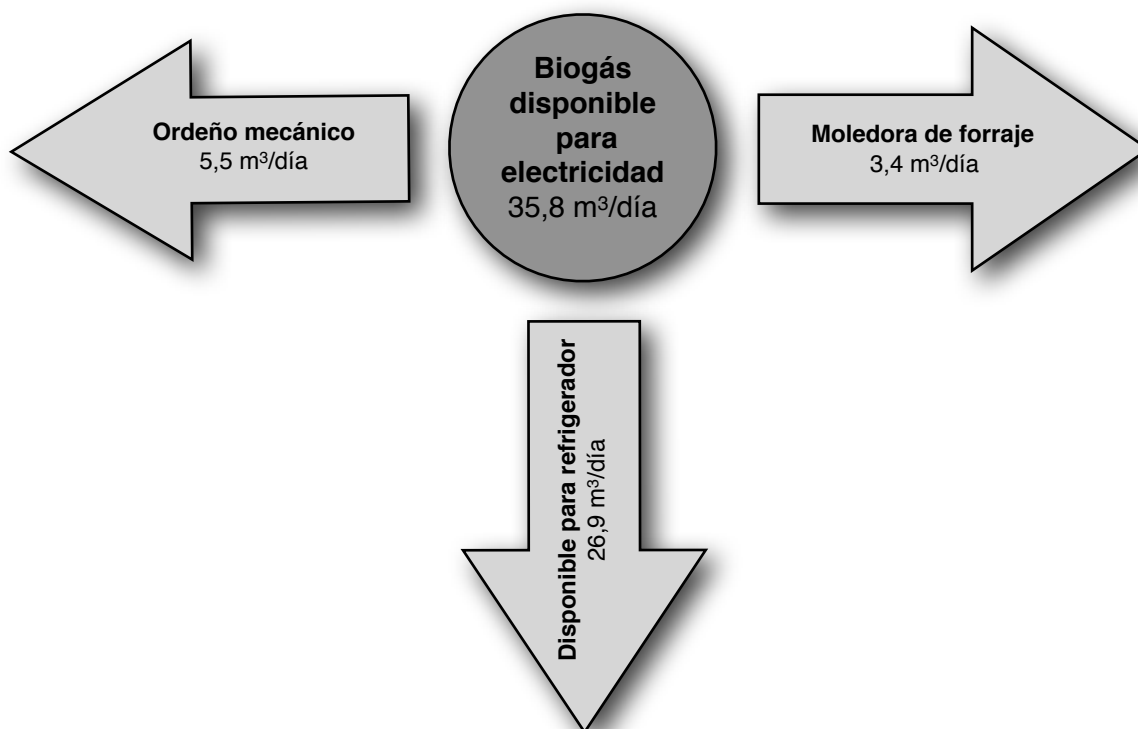


Figura 9.2: Uso del biogás destinado a procesos eléctricos en la Vaquería 101

Para calcular el tiempo máximo que el grupo electrógeno podrá alimentar al sistema de refrigeración con los 26,9 m³ de biogás restantes se toma el valor del consumo específico utilizado en el *Apartado 7.1.2.* y la potencia requerida por la carga, que en este caso es de 3,5 kW. Se obtiene que el tiempo máximo será de 12,3 horas al día:

$$T_{max} = 26,9 [m^3/día] / (0,625 [m^3/kWh] \times 3,5 [kW]) = 12,3 \text{ horas/día}$$

Para terminar de definir el modelo de demanda diaria que cubrirá el grupo electrógeno, se decide cuál será la franja de tiempo a lo largo del día en la cual se alimentará al sistema de refrigeración. Se intentará elegir dicha franja de tiempo de manera que los procesos con una mayor potencia no se solapen. Esto evitará tener que seleccionar un grupo electrógeno de mayor potencia, ahorrando costes y propiciando que el sistema funcione de manera eficiente en todo momento.

Así pues, el modelo de demanda eléctrica final será el siguiente:

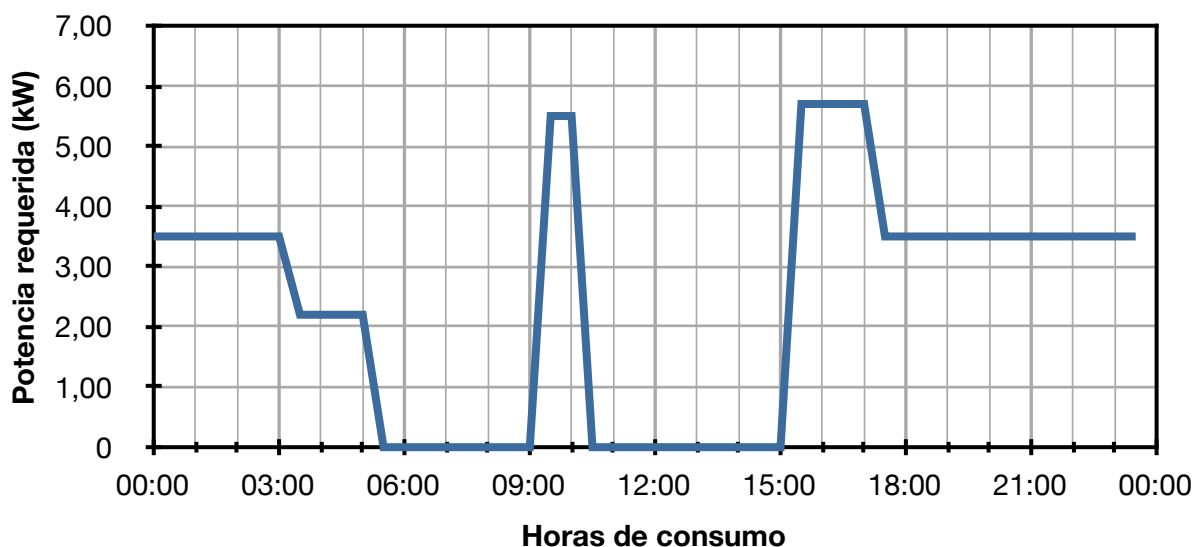


Figura 9.3: Modelo diario de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por el grupo electrógeno a biogás

9.2. Aprovechamiento del biogás para los procesos térmicos

Se ha decidido que los procesos térmicos serán la prioridad a la hora de aprovechar el biogás, por lo que tanto la demanda de biogás para cocinar como para iluminación será satisfecha completamente.

En los procesos térmicos la energía se obtiene del biogás a partir de la combustión directa, sin necesidad de maquinaria o tratamiento previo. Únicamente se deberá tener en cuenta la presión del biogás a la salida del biodigestor, que no deberá sobrepasar los 100 mm de columna de agua.

9.2.1. Cocina

La cocina a biogás se utilizará diariamente para la comida y la cena, para cocinar para los cuatro miembros de la familia del vaquero. Para asegurar que el tamaño de la cocina no dificulte estas labores se seleccionará una cocina con 2 quemadores.

Además, se buscará un equipo diseñado especialmente para biogás. Así se cuenta en teoría con una mayor vida útil del producto, y se dispone de una garantía por parte del fabricante que se perdería en caso de modificar una cocina diseñada para gas convencional.

La cocina seleccionada es el modelo ISI Classic Double Burner de la firma india Rupak. Las especificaciones técnicas del producto aparecen en la siguiente tabla:

ISI Classic Double Burner Stove	
Carcasa	Acero Inoxidable
Quemadores	Hierro Forjado
% mínimo de CH₄	60%
Consumo	450 L/h
Dimensiones	625X310X75 mm
Peso	5,2 kg

Tabla 9.2: Especificaciones técnicas de la cocina a biogás

9.2.2. Iluminación

La media de utilización de las lámparas de biogás en la vaquería será de 4 horas/día²⁶ y se les suministrará el biogás directamente del biodigestor. Se seleccionará el mismo modelo para las 10 lámparas a biogás necesarias, pues las exigencias de iluminación de cada todas ellas serán similares.

El modelo elegido es el KVIC Regular Indoor, de la firma Rupak, la misma que en el caso de la cocina. Las especificaciones técnicas del producto aparecen en la siguiente tabla:

KVIC Regular Indoor Biogas Lamp	
Reflector	Aluminio
Cristal	Delgado - 4"
% mínimo de CH₄	60%
Consumo	100 L/h
Dimensiones	265x265x230 mm
Peso	0,6 kg

Tabla 9.3: Especificaciones técnicas de la cocina a biogás

²⁶ Véase Apartado 3.5.2.

9.3. Aprovechamiento del biogás para generación de electricidad

Una vez elegidas las cargas eléctricas que alimentará el grupo electrógeno a biogás y obtenido el modelo diario de demanda, se estudiarán los parámetros de dimensionamiento característicos de dichas cargas. Posteriormente se seleccionará un modelo de grupo electrógeno acorde con dichos parámetros y se caracterizará su funcionamiento.

9.3.1. Parámetros de dimensionamiento

El estudio de las cargas de la vaquería realizado en el apartado anterior ha permitido conocer la demanda de energía de cada una de dichas cargas. Posteriormente, en el análisis realizado para elegir las formas de aprovechamiento del biogás se ha decidido que éste se utilizará para producir electricidad, y que dicha electricidad se destinará a alimentar tres cargas:

- El motor de ordeño mecánico
- El motor de la moledora de forraje
- El compresor del sistema de refrigeración de leche

Empleando esta información se definirán los parámetros que permitirán dimensionar el sistema de generación de electricidad. Para este caso dichos parámetros serán la carga instalada y las horas de funcionamiento.

Carga instalada

Las conclusiones que se pueden obtener del modelo de demanda obtenido y del estudio de las cargas realizado en el *Apartado 7.1.1.* son las siguientes:

- El pico máximo de potencia alcanza los 5,7 kW, cuando funcionan simultáneamente el motor de ordeño y el sistema de refrigeración.
- Tras el pico máximo, la potencia requerida se reduce a 3,5 kW.
- La potencia requerida vuelve a reducirse hasta 2,2 kW, en el momento en que se deja de alimentar al sistema de refrigeración y comienza el ordeño.
- La carga se reduce a 0 el resto del tiempo, salvo en un pico aislado de 5,5 kW en el momento en que funciona la moledora de forraje.

Por lo tanto, se tratará de elegir un equipo que tenga la potencia suficiente para alimentar todas las cargas mencionadas, y que trabaje de manera eficiente la mayor parte del tiempo.

Elegir el equipo de combustión para que trabaje óptimamente en los picos de demanda dificultará su trabajo con las cargas de menor potencia. La reducción de la carga llevará al equipo a trabajar de manera ineficiente (quedará sobredimensionado para esa franja horaria). Tras la elección del equipo de combustión será necesario ver como trabajaría el mismo tras esta reducción de la carga para saber si se debe hacer funcionar al mismo en ese momento.

Horas de funcionamiento

La duración de cada una de las actividades en la vaquería se expuso en el *Apartado 4.3.1*. Concretamente, para este caso:

- El grupo electrógeno deberá funcionar un total de 15 horas diarias.
- Debido a la separación en el tiempo de las diferentes actividades, el funcionamiento del grupo electrógeno está repartido a lo largo del día.
- El pico de potencia máxima de 5,7 kW se produce a las 15:30 y dura 2 horas.
- Después del pico, el sistema alimenta durante 10 horas una carga de 3,5 kW.
- A las 3:30 la potencia requerida se reduce hasta 2,2 kW durante 2 horas, para después pasar a ser nula.
- Los dos periodos de actividad nula son entre las 5:30 y las 9:30, y entre las 10:30 y las 15:30.
- Se deberá alimentar una carga de 5,5 kW durante una hora, a partir de las 9:30.

Se concluye que el grupo electrógeno funcionará durante un máximo de 15 horas al día, divididas entre un periodo de 14 horas de duración y otro de 1 hora. El equipo elegido deberá ser capaz de trabajar en condiciones adecuadas durante un gran número de horas al día.

9.3.2. Elección del grupo electrógeno

En el apartado 3.5.3. se concluyó que la tecnología más adecuada para la generación de electricidad en la vaquería es la que emplea un grupo electrógeno a biogás. Para elegir correctamente un grupo electrógeno hay que tener en cuenta una serie de factores:

- Por un lado la potencia que se necesita obtener del mismo. Para ello hay que tener en cuenta la potencia de todos los aparatos eléctricos que puedan funcionar a la vez así como las condiciones atmosféricas, la temperatura ambiental y la altitud. En el caso de la vaquería se ha determinado que la máxima potencia que deberá entregar el sistema será de 5,7 kW, y dado que la máxima altitud en el municipio de Consolación del Sur es de 65 msnm, no será necesario un sobredimensionamiento debido a la altitud.
- Por otro lado el tipo de trabajo que va a realizar el grupo electrógeno. Hay que conocer si el grupo electrógeno va a tener una alta carga de trabajo ó si es para servicio de emergencia. Se ha deducido que el grupo electrógeno de la vaquería tendrá un funcionamiento de 15 horas diarias, siendo desconectado el resto del tiempo. Esto implica que el grupo electrógeno que se escoja para la vaquería estará sometido a una alta carga de trabajo y habrá que tenerlo en cuenta para las labores de mantenimiento.

Además se deberá tener en cuenta que el equipo elegido deberá ser accesible desde Cuba, por lo que se buscará un fabricante procedente de un país con el que Cuba ya haya establecido relaciones comerciales anteriormente.

En base a lo anterior el grupo electrógeno a biogás elegido corresponde al modelo B4T-10000 Bioflex de la compañía brasileña Branco, cuya potencia nominal es de 6,4 kW. A continuación se pueden ver las especificaciones técnicas del modelo:

Grupo Electrónico B4T-10000 Bioflex		
Especificaciones		
Potencia máxima	9.5/7.6	kVA/kW
Potencia nominal	8/6.4	kVA/kW
Frecuencia	60	Hz
Tensión de salida	220	V
Corriente nominal	10.8	A
Factor de potencia	0.8	cos ϕ
Motor		
Potencia	18.0	cv
Cilindrada	389	cc
Rotación	3600	rpm
Arranque	Eléctrico	
Refrigeración	Forzada a Aire	
Filtro de biogás	Si	
Alternador		
Fases	3	
Modo de excitación	Brushless, Auto-excitado	
Regulación de voltaje	AVR	
Grado de aislamiento	H	
Otros datos		
Combustible	Biogás/Alcohol	
Presión del gas a la entrada	1-5.5	kPa
Dimensiones	1200x760x850	mm
Peso neto	50	kg
Consumo de biogás	4	m ³ /h
Consumo específico	0,625	m ³ /kWh
Eficiencia eléctrica	26	%
Eficiencia térmica	52	%
Eficiencia total	78	%
Precio		
13.497	R\$ (Real Brasileño)	
6.067,84	CUC (Peso Convertible Cubano)	

Tabla 9.4: Especificaciones técnicas del grupo electrónico a biogás

9.3.3. Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno

En este apartado se estudiará el comportamiento del grupo electrógeno que se ha elegido para autoabastecer de energía eléctrica a la Vaquería 101. Se comenzará definiendo el modo de funcionamiento del grupo electrógeno y su relación con el funcionamiento de la red eléctrica. Se definirá y seleccionará el rango de potencia de trabajo y posteriormente se definirán los parámetros de trabajo del equipo, los cuales son la carga y la eficiencia. Esto permitirá caracterizar el sistema realizando unos balances de combustible y de electricidad generada que desvelarán su viabilidad técnica.

Finalmente, se caracterizará también el nuevo uso que se hará de la red eléctrica cubana en la vaquería.

Modo de funcionamiento

El grupo electrógeno trabajará todos los días alimentando las cargas seleccionadas en el *Apartado 8.1.2*. Para el resto de cargas que no pueden ser alimentadas de esta forma se mantendrá la fuente de energía actual, es decir, la red eléctrica cubana. Esto implica, por tanto, que estas dos fuentes deberán trabajar conjuntamente a diario. Según la carga, ambas fuentes se relacionarán de dos formas diferentes:

- **Alternancia entre ambas fuentes:** Se dará este funcionamiento en el caso del sistema de refrigeración de leche. Dado que el grupo electrógeno solo podrá alimentar esta carga un número limitado de horas al día, será la red eléctrica quien se encargue de alimentarla el resto del tiempo que deba funcionar cada día.
- **Funcionamiento simultáneo de ambas fuentes:** Para cubrir la demanda energética del resto de cargas, ambas fuentes funcionarán paralelamente alimentando cada una cargas diferentes. Al sistema de ordeño y a la moladora de forraje en el caso del grupo electrógeno; a los electrodomésticos de la vivienda y al baño garrapaticida en el caso de la red eléctrica.

El nuevo funcionamiento de la red eléctrica como fuente de energía en la Vaquería 101 se caracterizará posteriormente, una vez definido completamente el sistema de generación de electricidad con biogás.

Rango de potencia

En este apartado se comenzará asignando el modo de trabajo del grupo electrógeno en términos de potencia para posteriormente analizar si el mismo puede alimentar de manera adecuada la carga que se le pretende asignar.

El modo de funcionar que tendrá el grupo electrógeno elegido dependerá del rango de potencia en el que trabaje. Los rangos de potencia de los grupos electrógenos son publicados por los fabricantes y describen sus condiciones de carga permisible. Cada grupo electrógeno puede funcionar dentro de unos rangos de potencia, los cuales deben ser tenidos en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento y una larga vida útil. De igual manera, se recomienda que el generador opere con una carga mínima que le permita lograr temperaturas normales de trabajo y quemar el combustible correctamente. La mayoría de los fabricantes recomiendan que un generador opere a un mínimo de 30% de su rango de potencia.

Los rangos de potencia que emplean la mayoría de los fabricantes, incluido los del grupo electrógeno que se ha seleccionado, son los rangos de potencia standby, primaria y continua. La descripción de dichos rangos, adjunta en el *Anexo III.1*, permite conocer lo siguiente:

- **Standby:** Un equipo generador usado en aplicaciones standby servirá como un respaldo para la fuente de energía primaria (red) y se espera que no se use frecuentemente, por lo que la potencia standby es la potencia más alta disponible para el conjunto generador. En el caso del grupo electrógeno B4T-10000 se dispone de una potencia standby de 7,6 kW tal y como indican sus especificaciones.
- **Primaria:** Los equipos que funcionen en su rango de potencia primaria se espera que operen durante horas ilimitadas y se consideran adecuados para trabajar con cargas variables. La potencia primaria es generalmente cercana al 90% de la capacidad standby. En el caso del grupo electrógeno B4T-10000 se dispone de una potencia primaria de 6,4 kW tal y como indican sus especificaciones.
- **Continua:** En las aplicaciones con rango de potencia continua, se espera que el conjunto produzca la potencia de salida por horas ilimitadas a carga constante (aplicaciones en las que el conjunto puede operarse en paralelo

con la red). La potencia continua es generalmente cerca del 70% de la potencia standby. En el caso del grupo electrógeno B4T-10000 se dispone de una potencia continua de 5,3 kW tal y como indican sus especificaciones.

Generador B4T-10000 Bioflex		
Modo de funcionamiento	Potencia	
Standby	8.8/7	kVA/kW
Primaria	8/6.4	kVA/kW
Continua	6.4/5.3	kVA/kW

Tabla 9.5: Especificaciones del grupo electrógeno elegido.

Para el caso de la Vaquería 101, el rango de potencia en el que va a trabajar el grupo electrógeno es el **rango de potencia primaria** debido a que:

- La carga que debe alimentar el grupo electrógeno es variable.
- El tiempo de operación del generador será de 9,8 horas diarias, lo cual requiere de un rango de potencia que permita alimentar durante una gran cantidad de horas anuales.

En la siguiente tabla se define el rango de potencia primaria para el grupo electrógeno B4T-10000 que se ha elegido:

Rango de potencia primaria	
Potencia primaria (100%)	6.4 kW
Potencia mínima recomendada (30%)	1.9 kW
Potencia de sobrecarga max. (110%)	7 kW
Potencia promedio max. permisible (70%)	4.5 kW

Tabla 9.6: Rango de potencia del grupo electrógeno seleccionado

Para un correcto funcionamiento, el sistema deberá operar por debajo de la potencia promedio máxima permisible la mayor parte del tiempo. Además la potencia de sobrecarga máxima solo podrá alcanzarse excepcionalmente ya que

un funcionamiento en este punto durante más de 25 horas anuales acortará la vida útil del grupo electrógeno.

Análisis de las cargas y tiempos de trabajo

Se analizan las cargas y tiempos de trabajo para comprobar que el sistema funciona correctamente en el rango de potencia primaria. Para dicho rango se debe comprobar que el sistema opera por debajo de la potencia promedio máxima permisible la mayoría del tiempo y que no se alcanza la potencia de sobrecarga máxima, o que si lo hace solo sea de manera excepcional.

Se emplea la información que se obtuvo en el levantamiento de cargas realizado en el *Apartado 7.1.* para elaborar la siguiente gráfica. En ella, además de los rangos de potencia del grupo electrógeno, se incluye la potencia mínima a la cual la eficiencia eléctrica no disminuye. Dicha potencia, como se ha explicado en el *Apartado 8.1.2.*, es el 50% de la potencia nominal, es decir, 3,2 kW:

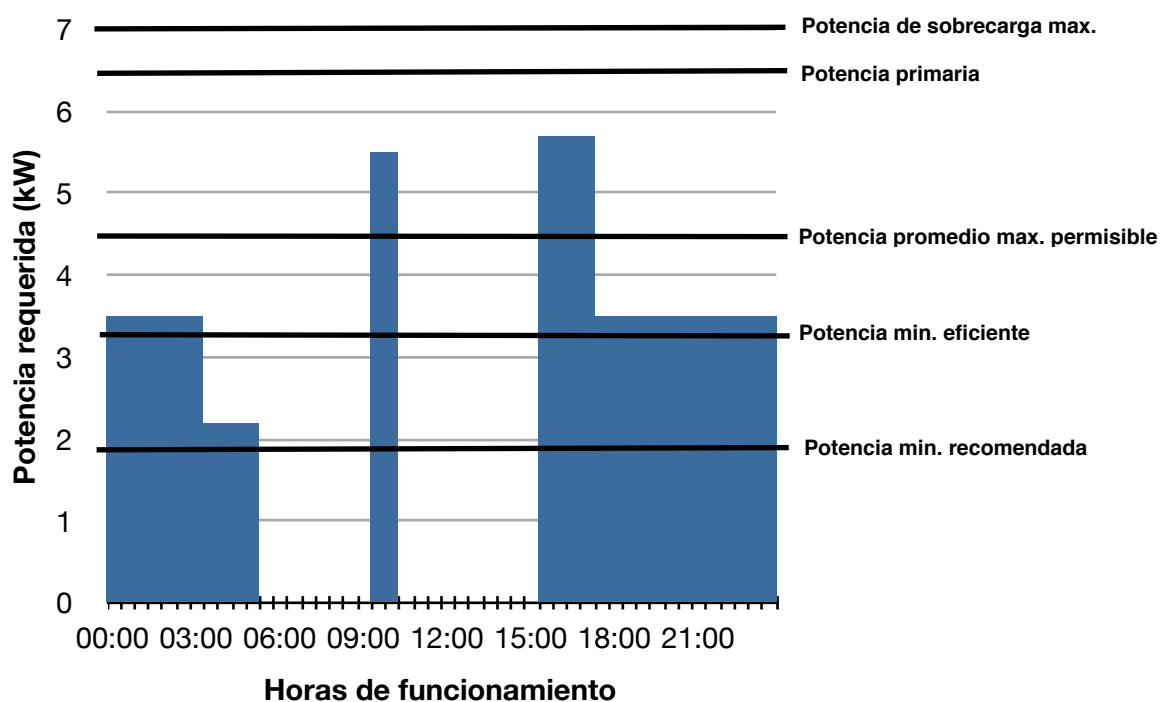


Figura 9.4: Cargas agrupadas frente al rango de potencia del generador

Esta gráfica nos permite sacar las siguientes conclusiones:

- El grupo electrógeno no llegará en ningún momento a la potencia de sobrecarga máxima desaconsejada por el fabricante para el rango de potencia primaria.

- El grupo electrógeno no trabajará nunca por debajo de la mínima potencia recomendada.
- El grupo electrógeno trabajará por encima de la potencia promedio máxima durante 3 horas en un día normal de funcionamiento. Este no se considera un tiempo prolongado, por lo que no se toma como un riesgo para el equipo.
- El grupo electrógeno trabajará durante 2 horas por debajo de la potencia mínima eficiente, por lo que, como ya se ha explicado, su eficiencia eléctrica será menor en este periodo.

Por otro lado, se descarta definitivamente la posibilidad de alimentar la bomba del baño garrapaticida una vez al mes, ya que la potencia requerida por esta carga es de 7,5 kW y sobrepasa la potencia de sobrecarga máxima del grupo electrógeno elegido.

Por tanto, en base a lo expuesto se considera que el grupo electrógeno funcionará de manera correcta dentro del rango de potencia primaria.

9.3.4. Caracterización del funcionamiento de la red eléctrica

Como ya se ha explicado al inicio de este apartado, el grupo electrógeno a biogás y la red eléctrica trabajarán conjuntamente para, entre ambas fuentes, alimentar todas las cargas eléctricas de la vaquería.

Una vez conocido el funcionamiento del grupo electrógeno, se debe caracterizar el de la red eléctrica. Así se podrá comparar el uso que la vaquería hace actualmente de la red, y el que hará en caso de instalar el grupo electrógeno diseñado, y determinar el ahorro energético y económico que supondrá el aprovechamiento del potencial de biogás existente.

Cargas alimentadas por la red eléctrica

Las cargas cuya fuente de energía no será el grupo electrógeno, y que por tanto serán alimentadas por la red eléctrica serán:

- Los electrodomésticos de la casa del vaquero
- El compresor del sistema de refrigeración de leche
- La bomba del baño garrapaticida

Los electrodomésticos, que suman entre todos 0,3 kW de potencia, deberán poder funcionar las 24 horas del día.

El sistema de refrigeración de leche, de 3,5 kW de potencia, será alimentado alternativamente por el grupo electrógeno y la red eléctrica. En el caso de la red, deberá proporcionarle electricidad de 3:30 a 12:00.

Finalmente, el baño garrapaticida se realizará solamente una vez al mes, por lo que solamente este día demandará energía de la red eléctrica. El pico de demanda que producirá esta carga entonces será de 7,8 kW, entre las 12:00 y las 15:00.

Se pueden ver más claramente los consumos eléctricos de estas cargas en la siguiente tabla:

Equipo	Cantidad	Potencia (kW)	Horas diarias	Consumo diario (kWh/día)
Electrodomésticos	1	0,3	24,0	6,7
Compresor refrigeración	1	3,5	8,5	29,8
Electrobomba baño garrapaticida	1	7,5	3,0	22,5
TOTAL		11,3		59,0

Tabla 9.7: Consumo eléctrico de las cargas alimentadas por la red eléctrica

Con esta información se puede obtener el modelo de demanda eléctrica de la red a partir de la *Tabla 8.2.*, tanto para un día cualquiera como para el día del baño garrapaticida:

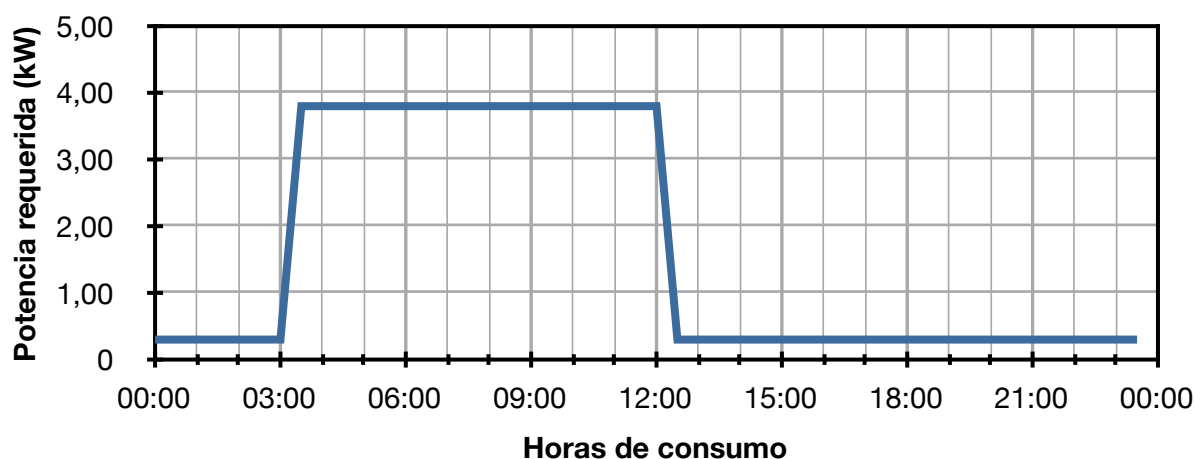


Figura 9.5: Modelo diario de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por la red eléctrica en la Vaquería 101

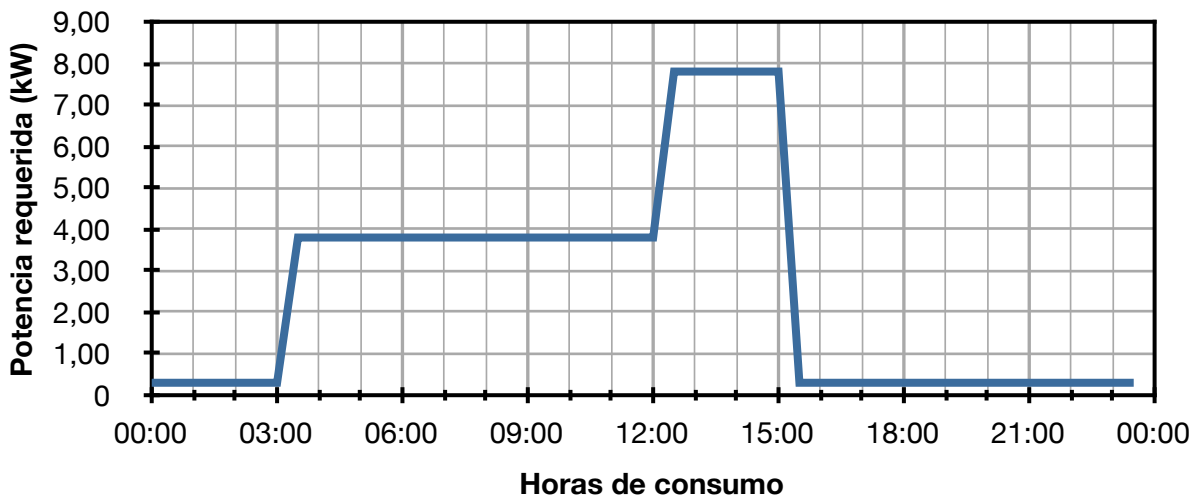


Figura 9.6: Modelo de demanda eléctrica de las cargas alimentadas por la red eléctrica el día del baño de garrapaticida en la Vaquería 101

9.3.5. Ahorro de electricidad

Como se puede observar en el análisis de demanda eléctrica de las cargas de la vaquería en la *Tabla 8.1.*, el consumo eléctrico es de 92,8 kWh/día, que aumenta hasta los 115,3 kWh/día cuando se realiza el baño garrapaticida. Actualmente, toda esta demanda es cubierta por la red eléctrica, lo que supone un consumo anual de:

$$\text{Consumo anual con el sistema actual} = 33.678 \text{ kWh/año}$$

Aprovechando el potencial de biogás con el sistema diseñado, la vaquería pasará a consumir 36,5 kWh/día de la red eléctrica, y 59 kWh/día el día del baño garrapaticida:

$$\text{Consumo anual con el sistema diseñado} = 13.410 \text{ kWh/año}$$

Esto supondrá, por tanto, un ahorro en el consumo eléctrico de la Vaquería 101 de:

$$\text{Ahorro en el consumo eléctrico anual} = \mathbf{20.268 \text{ kWh/año}}$$

Descripción de los sistemas

10. Descripción de los sistemas

Llegados a este punto, se hace necesario describir cada uno de los elementos que forman parte del sistema completo de aprovechamiento del biogás en la Vaquería 101 que se ha diseñado en este proyecto. Esta información permitirá obtener una visión del conjunto de todas las instalaciones y entender cómo están relacionadas entre ellas. También será de utilidad conocer cada uno de los elementos para el posterior análisis económico.

10.1. Ubicación de la instalación

Una buena ubicación desempeña un papel importante para el fácil manejo y operación de la planta de biogás, además de ahorrar costes de transporte y materiales, y facilitar la construcción. Los principales aspectos que tendremos en cuenta al ubicar un biodigestor son los siguientes:

- Seleccionar el lugar más cercano posible a la fuente de materia prima.
- Debe tratarse de que la topografía del terreno permita el cargado de la planta por gravedad.
- En el lugar debe existir una fuente de agua para realizar la mezcla y mantener la limpieza de la planta.
- La topografía del terreno debe favorecer que la extracción del bioabono líquido se realice por gravedad.
- Se debe evitar el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto. Como norma, el fondo del biodigestor debe encontrarse a un metro o más del manto freático.
- En el área que se utilizará para su construcción es imprescindible eliminar todo aquello que sea un estorbo, como escombros, hierbas, plantas, raíces, etcétera.

Por su parte, el sistema de generación de electricidad y los elementos asociados se colocarán lo más cerca posible de la planta de biogás. Esto facilita el suministro de combustible a la vez que evita los costes asociados a tener que transportar el

biogás. Debido a esto, el sistema eléctrico está pensado para una ubicación exterior, lo cual ofrece varias ventajas:

- Evacuación sencilla de los gases de combustión. En caso de una ubicación en un recinto cerrado se requeriría de un circuito aislado para expulsar los gases al exterior.
- No es necesaria la instalación de conductos de refrigeración y ventilación. El calor desprendido por el equipo puede ser liberado directamente al ambiente.
- Se evita acondicionar un habitáculo en un edificio para albergar al sistema. Instalando el mismo en una ubicación exterior tan solo se debe disponer una cubierta que proteja la máquina del polvo y las inclemencias meteorológicas tales como lluvia, rocío, radiación solar, etc.
- Se reducen las intromisiones por ruido al personal que se encuentra trabajando en el edificio.
- El riesgo de incendio es menor.

Por ello, el conjunto de todas las instalaciones se situará entre el depósito de agua y la casa del vaquero²⁷. En este lugar se cumplirán las exigencias propuestas para una correcta ubicación:

- Cercanía del depósito de agua.
- Cercanía de los establos, de donde se obtiene la excreta generada.
- Gran superficie sin edificar, suficiente para todas las instalaciones.
- Cercanía de la casa del vaquero, donde se utilizará el biogás para cocinar.
- Cercanía de las salas de ordeño, refrigeración y vacío, donde se encuentran las cargas alimentadas por el grupo electrógeno.

10.2. Sistema de generación de biogás

El sistema de generación de biogás a partir de la excreta generada en la vaquería que se diseñó en el presente proyecto ya se ha descrito en gran parte²⁸, por lo que

²⁷ Véase *Figura 4.6*.

²⁸ Véase *Tema 6*

en este apartado se realizará una descripción general de las diferentes partes del mismo, y se caracterizarán los elementos complementarios que no han intervenido en el diseño.

10.2.1. Cámara de carga

El sustrato debe almacenarse en una cámara de carga antes de su ingreso en el biodigestor. El objetivo de esto es diluir el sustrato con agua y homogeneizar esta mezcla, haciendo que sea adecuado para alimentar los biodigestores. En la cámara de carga diseñada esto se realizará en el tanque de mezcla.

La cámara de carga debe estar abierta a la atmósfera para facilitar la deposición de los sólidos en la superficie por gravedad y que los mismos puedan ser extraídos manualmente.

La cámara de carga contará además con una segunda parte, llamada desarenador. La mezcla pasa del tanque de mezcla al desarenador, que cuenta con una suave pendiente para que los sólidos más densos se almacenen en el fondo y puedan retirarse de la mezcla por el conducto correspondiente. En la última parte del desarenador se coloca una pared divisoria para dividir el flujo de la mezcla antes de introducirla en los dos biodigestores en paralelo.

10.2.2. Biodigestores

Como se definió en el *Apartado 6.3.3.*, el sistema de generación de biogás estará formado por dos biodigestores de cúpula fija colocados en paralelo. Cada uno de ellos tendrá un volumen interno de 65 m³ y un diámetro aproximado de 5,3 m.

Ambos biodigestores trabajarán simultáneamente y en condiciones idénticas, y por tanto producirán la misma cantidad de biogás. El biogás producido por el proceso de digestión anaerobia saldrá por un conducto situado en el cuello del biodigestor, por la presión generada por el gas en el interior de la propia cámara de digestión.

El proceso de construcción de un biodigestor es relativamente sencillo y no requiere de mano de obra altamente cualificada. En la obra de J. A. Guardado [1] se explica detalladamente la metodología para la construcción de una planta de biogás que puede aplicarse a este sistema.



Figura 10.1: Biodigestor de cúpula fija en proceso de construcción

10.2.3. Almacenamiento del efluente

La carga diaria de mezcla excreta-agua introducida al biodigestor es sometida dentro del mismo al proceso de digestión anaerobia produciendo biogás. Por otro lado, a la salida del biodigestor, se obtiene un líquido ya digerido el cual sirve como un excelente fertilizante. A este fertilizante se le suele llamar de forma general biol. El biol inicialmente se ha considerado un producto secundario pero actualmente está adquiriendo mucha importancia debido a que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas. La excreta generada en la vaquería, además de biogás, permitirán obtener una gran cantidad de biol, el cual deberá ser almacenado para su uso como abono o su venta.

En el biodigestor diseñado, el biol saldrá del biodigestor por la acción de la presión del biogás generado, y pasará al tanque de compensación. Para el almacenamiento del mismo durante un elevado periodo de tiempo sería conveniente excavar una laguna en la que se pueda depositar el biol. Una ubicación adecuada de la laguna permitiría la salida del biol directamente a la laguna evitando tener que emplear una bomba.

10.2.4. Gasómetros

El análisis del biogás consumido por el grupo electrógeno realizado en el *Apartado 8.3.3.* desveló la existencia de excedentes de biogás y la necesidad de almacenar parte de los mismos para garantizar la alimentación del grupo electrógeno.

La forma más simple es almacenar los excedentes de biogás es a baja presión y empleando gasómetros. Un gasómetro es un depósito que puede fabricarse con polietileno tubular en donde se almacena el biogás generado en otra parte de la planta para su posterior uso.

Para una planta de generación de biogás es recomendable que el volumen almacenado no sea menor del 50% de la producción diaria. Para el caso del matadero, en donde se estimó que su potencial de generación de biogás era de 43,9m³, supondría tener almacenados un mínimo de 21,95 m³ de biogás. Dado que el biogás almacenado debe poder emplearse tanto para la obtención de energía térmica (caldera e incineradora) como eléctrica (grupo electrógeno), los gasómetros deberán concebirse para poder extraer el biogás y destinarlo a dichas aplicaciones.



Figura 10.2: Gasómetro de polietileno de bajo costo para almacenamiento de biogás.

10.2.5. Quemadores

Cuando los gasómetros encargados de almacenar los excedentes de biogás lleguen a su capacidad máxima, será necesario eliminar parte de los excedentes para dar cabida al biogás producido. La eliminación de los excedentes se llevará a cabo mediante un quemador. Someter al biogás sobrante a combustión evitará la liberación del mismo a la atmósfera. El beneficio ambiental de esta medida es evidente ya que se evita la liberación de metano (CH_4), gas que fomenta el efecto invernadero. En su lugar se emitirá dióxido de carbono (CO_2), producto de la combustión de metano, que también fomenta dicho efecto pero en una medida mucho menor.

El modelo de quemador que se empleará está conformado por una tubería flexible, la cual va unida a otra tubería con forma de "T" y finaliza en una válvula de apertura manual. El biogás es conducido a través de la tubería por la propia presión que se genera en el interior del biodigestor. Al llegar a la "T", una de las vías conduce el biogás al exterior mediante la válvula de apertura manual. Mediante una chispa tiene lugar la combustión que evita la liberación del biogás a la atmósfera. La segunda de las vías conduce a una botella de plástico con una cierta altura de agua, sistema que funcionará como válvula de seguridad. En caso de que la presión del biogás se exceda en el interior del gasómetro o del biodigestor, este se libera a la atmósfera evitando el deterioro de los equipos.

A la hora de diseñar los quemadores deberá tenerse en cuenta el caudal de biogás en la tubería, para que éstos sean capaces de quemar todo el biogás.

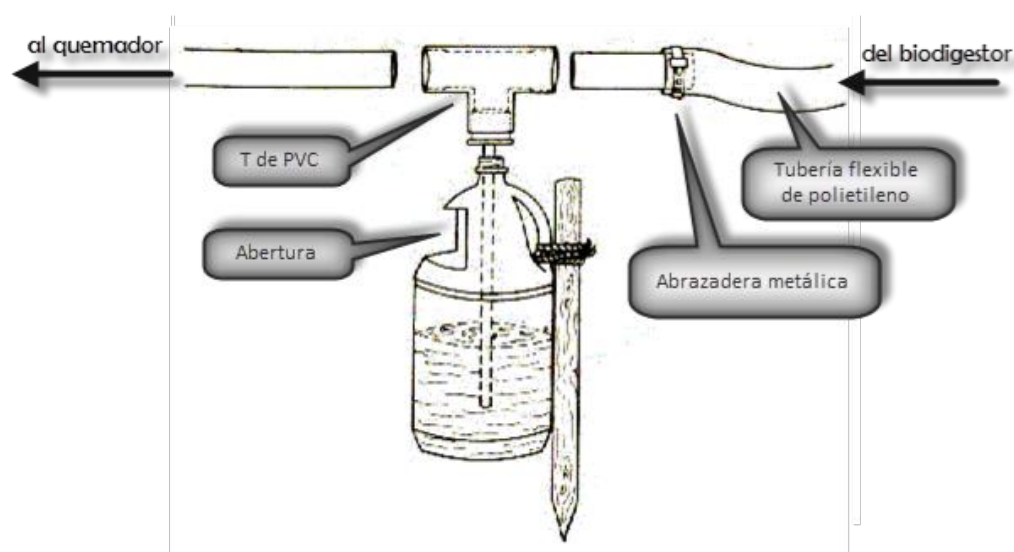


Figura 10.3: Esquema de quemador de la Vaquería 101

10.3. Alimentación de biogás a los procesos térmicos

Los sistemas en los que se consumirá el biogás deben ser alimentados desde el sistema de generación, directamente del biodigestor o bien desde los gasómetros instalados. Se deberá asegurar que cada sistema reciba el biogás en las condiciones adecuadas (presión, temperatura, calidad del biogás) y que se aplique el tratamiento necesario al gas en caso de ser necesario.

10.3.1. Tuberías

El gas producido en el biodigestor debe ser conducido a los lugares de uso a través de tuberías. La tubería de presión de PVC resulta adecuada para esta finalidad, ya que es barata y de fácil instalación, y además presenta resistencia a la corrosión. Su desventaja radica en la necesaria protección contra los rayos solares y el movimiento de animales y transporte pesado.

El diámetro de tubería requerido depende de la distancia desde la planta hasta el lugar de consumo del gas, así como del flujo máximo de gas requerido y de la pérdida de presión admisible. El flujo máximo del gas se obtiene sumando los consumos de los equipos que funcionen simultáneamente. Mediante la *Tabla 4.1* seleccionamos el diámetro de tubería adecuado, eligiendo la opción que presente una menor pérdida de presión según el flujo máximo de gas.

Caudal de gas (m ³ /h)	Diámetro de la tubería				
	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
	17 mm	23 mm	30 mm	43 mm	54 mm
0,5	1,0	0,3	0,1		
1,0	2,5	0,7	0,2		
2,0	7,0	1,8	0,6		
2,5	9,9	2,5	0,8		
3,0	13,1	3,3	1,0	0,2	
4,0	20,7	5,2	1,6	0,3	
5,0	29,6	7,4	2,2	0,4	
6,0	29,7	9,8	2,9	0,6	

Caudal de gas (m ³ /h)	Diámetro de la tubería				
	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
	17 mm	23 mm	30 mm	43 mm	54 mm
7,0		12,6	3,7	0,7	
8,0		15,7	4,6	0,9	0,3
9,0		19,0	5,6	1,0	0,4
10,0		22,6	6,6	1,3	0,5

Tabla 10.1: Pérdidas de presión en mm de columna de agua, por cada 10 m de tubería de PVC. [1]

Dado que a la presión adecuada el caudal de biogás será de 450 L/h para la cocina y 100 L/h por unidad para las lámparas, las tuberías serán de 3/4" de diámetro. La longitud de la tubería no superará en ningún caso los 60 m, por lo que la máxima pérdida de presión será de 4,2 mm de columna de agua, lo cual se considera aceptable.

10.3.2. Trampas de agua y pendientes de la tubería

El gas proveniente de un biodigestor sale generalmente saturado con vapor de agua, parte del cual puede condensarse en la tubería, lo que causa obstrucciones. El agua condensada en las tuberías debe escurrir hacia los puntos bajos donde estarán localizadas las trampas de agua. Las trampas consistirán en una T con la tercera salida tapada por un tapón de rosca, como vemos en la *Figura 4.6*, de manera que se pueda purgar el agua acumulada abriendo el tapón.



Figura 10.4: Trampa de agua en forma de T

Es importante llevar la tubería elevada, nunca enterrada, para poder disponer fácilmente las pendientes en la misma que lleven a los puntos bajos, en los cuales colocaremos las válvulas. Una pendiente del 2 % es suficiente para que el agua escurra con facilidad, y la cantidad de trampas variará de acuerdo con la topografía del terreno y la longitud del trayecto [1].

10.3.3. Regulador de presión

En los biodigestores de cúpula fija, la presión del biogás en el interior no es constante, sino que aumenta a medida que se va produciendo el gas. Si el biogás llega a las lámparas de biogás o a la cocina a una presión excesiva el caudal de gas sería demasiado grande para poder quemarlo por completo y el biogás se acumularía en el interior del recinto. Si la presión sigue aumentando por encima de los 300 mm de columna de agua, las mantillas de las lámparas de biogás podrían llegar a explotar.

Se instala un regulador de presión que limite la presión del biogás a un máximo de 10 milibares (100 mm de columna de agua) en la tubería principal de alimentación a los procesos térmicos.



Figura 10.5: Regulador de presión de gas

10.4. Alimentación de biogás al grupo electrógeno

Los grupos electrógenos a gas utilizan combustibles gaseosos para su funcionamiento, ya sea gas natural, gas licuado de petróleo o, como en el caso de estudio, biogás. Sin importar el combustible usado, existen unos requisitos mínimos necesarios en la instalación que deben satisfacerse para asegurar la operación del sistema:

- El gas suministrado al conjunto generador debe ser de calidad aceptable, es decir, que la cantidad de energía por unidad de volumen de combustible sea alta.
- El suministro de gas debe tener suficiente presión, aportándose la apropiada para la operación en todo momento.
- El gas debe suministrarse al generador en suficiente volumen para que este pueda operar. Para ello habrá que elegir una tubería de transporte que permita el caudal adecuado de biogás. Lógicamente, cuanto mayor sea la calidad del combustible menor será el caudal requerido.

Estos requisitos se logran gracias a un sistema de alimentación de combustible cuyos elementos van a ser descritos con detalle en este apartado. Dichos elementos son:

- Filtro de remoción de H_2S : Su función es eliminar el ácido sulfhídrico (H_2S) presente en la composición del biogás. El biogás producido en el biodigestor es transportado por medio de una bomba de vacío a través de este filtro.
- Tanque de combustible: Su función es almacenar el biogás destinado a alimentar el grupo electrógeno. El biogás llega al tanque a través del filtro de remoción de H_2S .
- Tren de calibración: Su función es hacer llegar el biogás desde el tanque hasta el grupo electrógeno en las condiciones adecuadas de presión, volumen y temperatura. Para grupos electrógenos de pequeño tamaño como en este caso, el tren de calibración estará formado únicamente por una válvula de paso y un regulador de presión, el cual será del mismo tipo que el explicado en el *Apartado 10.3.3*.

10.4.1. Filtro de Sulfuro de Hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en el biogás se combina con el agua condensada en las tuberías y forma ácidos corrosivos, que son especialmente peligrosos para los motores de combustión interna, pues dañan seriamente las superficies metálicas, reduciendo la vida útil del equipo. La reducción del H_2S puede ser necesaria si existe una concentración excesiva del mismo, por encima del 2%. Dado que, normalmente, la concentración de H_2S en el biogás no suele

sobrepasar el 1%, podría no ser necesario el filtrado del mismo [Fuente: Energypedia].

La eliminación del H_2S puede realizarse por absorción con hidrato férrico ($Fe(OH)_3$), que puede ser regenerado por exposición al aire. Se puede construir fácilmente un filtro de sulfuro de hidrógeno, como el que se ve en la *Figura 9.7*, utilizando viruta de hierro o lana de acero como material de absorción.

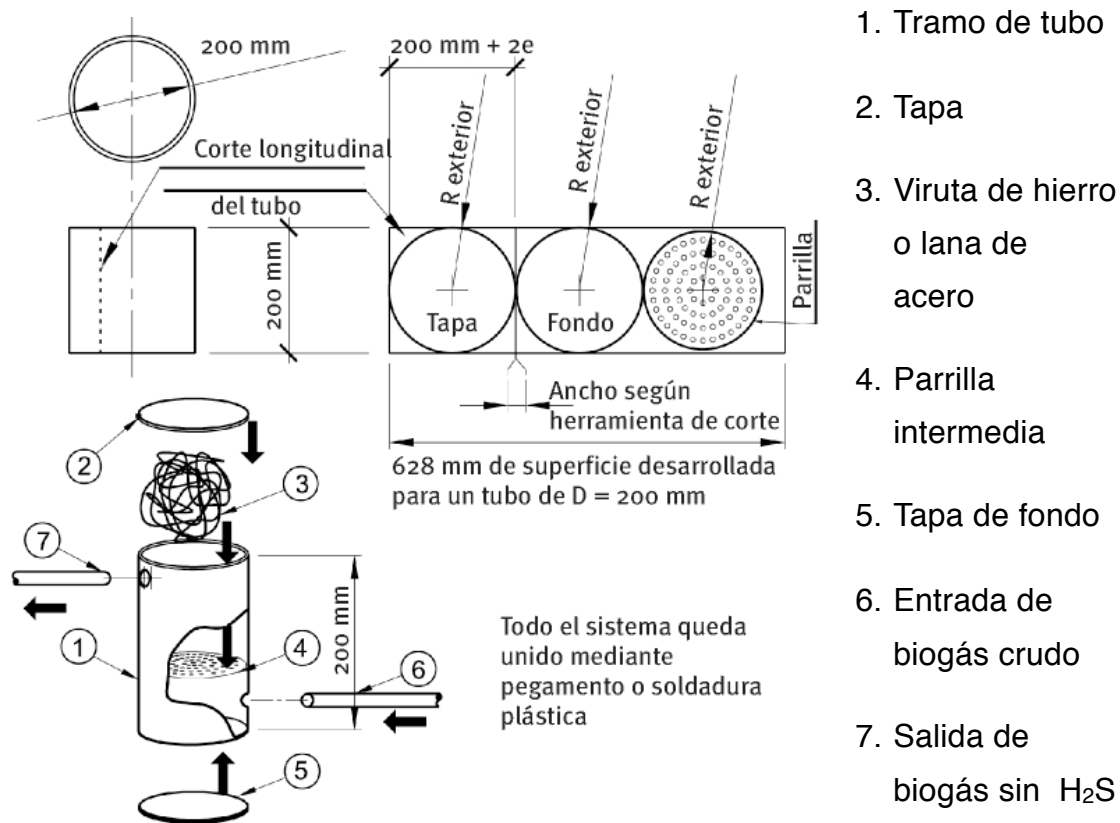


Figura 10.6: Filtro de sulfuro de hidrógeno para una planta de biogás. [1]

10.4.2. Tanque de combustible

Tras someter al biogás generado en el biodigestor a una remoción de su contenido en sulfuro de hidrógeno pasará a ser almacenado en el tanque de combustible. La función de este tanque es la de recibir el biogás que se va produciendo progresivamente y almacenarlo, para que desde ahí el tren de calibración lo comprima y suministre al grupo electrógeno. Para el tanque de combustible se puede utilizar polietileno tubular, al igual que en los gasómetros ya explicados.

El tanque deberá ser dimensionado aproximadamente para alimentar al generador durante 2 horas a plena carga²⁹. Como se puede ver en las especificaciones técnicas del grupo electrógeno en la *Tabla 8.3.*, el consumo de biogás del grupo electrógeno a plena carga es de 4 m³/h. Por tanto, se requerirán 8 m³ para alimentarlo durante 2 horas.

Se puede estimar el volumen del tanque que permita almacenar esta cantidad de biogás considerando que la presión media del biogás a la salida del biodigestor no sobrepasará los 5 kPa y que la presión de almacenamiento impuesta por la bomba de vacío es de en torno a 3,5 kPa, y despreciando la variación de la temperatura de una etapa a otra.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2} = \frac{5 \cdot 8}{3,5} = 11,5 \text{ m}^3$$

10.5. Elementos de la cocina a biogás

Se trata de un modelo de cocina de 2 quemadores con cuerpo de acero inoxidable, diseñado específicamente para funcionar con biogás.



Figura 10.7: Cocina a biogás ISI Classic Double Burner de Rupak

La cocina se sitúa en el interior de la casa del vaquero, por lo que será necesario que la tubería de alimentación de biogás pase a través de la pared del edificio. Aprovechando esto, se colocará una trampa de agua junto a la pared para asegurar la ausencia agua condensada en el conducto.

²⁹ Fuente: Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquido de Cummins Power Generation

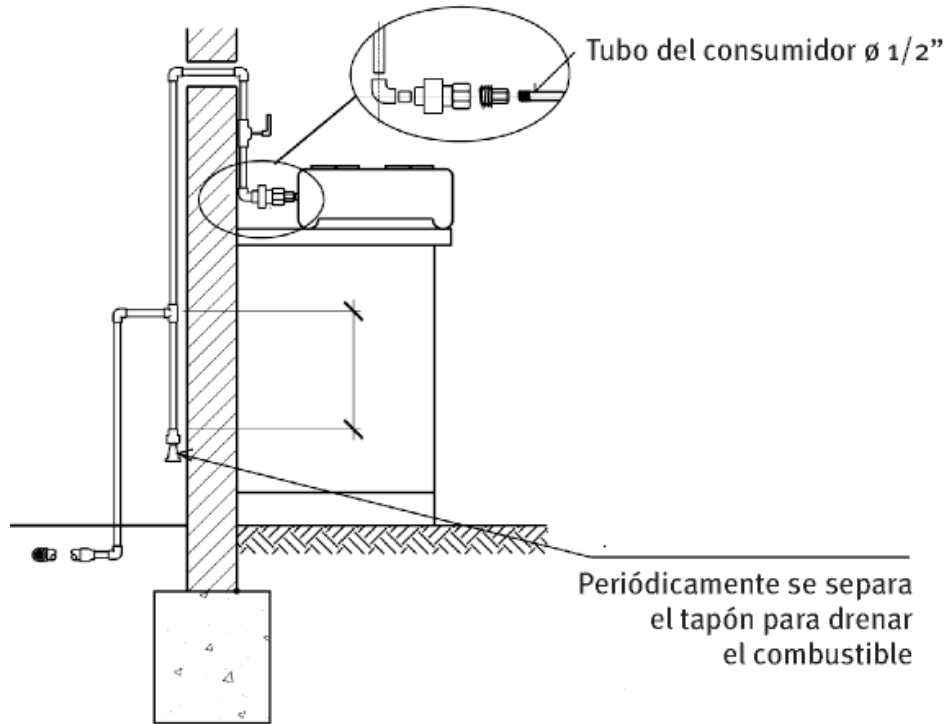


Figura 10.8: Instalación de la cocina de biogás

10.6. Elementos de las lámparas de biogás

Se instalarán un total de 10 lámparas de biogás en diferentes edificios de la Vaquería 101. El modelo de lámpara cuenta con reflector de aluminio y cubierta de cristal, y está diseñado específicamente para funcionar con biogás.



Figura 10.9: Lámpara a biogás modelo KVIC Regular Indoor de Rupak

A cada una de las lámparas llegará una tubería de alimentación de biogás, la cual se conecta por la parte superior del soporte. El modelo de lámpara elegido cuenta con una llave de paso para regular o cerrar el paso del biogás hasta la mantilla.

10.7. Elementos del grupo electrógeno

El grupo electrógeno encargado de convertir la energía química del biogás en energía eléctrica fue elegido en el *Apartado 9.3.2.* tras llevar a cabo un dimensionamiento del mismo. En el *Apartado 9.3.3.* se caracterizó su funcionamiento apreciándose que funcionará correctamente adaptándose a las cargas impuestas por las instalaciones de la vaquería. No obstante, existen una serie de elementos en torno al mismo que aun no han sido descritos y los cuales son necesarios para garantizar su correcto funcionamiento. Dichos elementos se describen a continuación.



Figura 10.10: Grupo electrógeno modelo B4T-10000 Bioflex de Branco

10.7.1. Líneas de inyección y de retorno

Las líneas de inyección y de retorno establecen una unión entre la alimentación del grupo electrógeno y la entrada al motor de combustión. Permiten que en última instancia el combustible sea suministrado al motor en las condiciones adecuadas para que el mismo funcione.

La línea de inyección lleva el biogás desde el tren de calibración al motor. El biogás deberá en las condiciones de presión adecuadas al grupo electrógeno, de lo cual se encargará el regulador de presión del tren de calibración. Por su parte, la línea de retorno se encarga de llevar de vuelta el combustible sobrante de los inyectores al tanque de almacenamiento de combustible.

El dimensionamiento de estas líneas debe ser el adecuado para distribuir el volumen de biogás requerido por el grupo electrógeno. Deberán ser trazadas de manera que se evite el calentamiento excesivo del combustible y empleando mangueras flexibles para absorber el movimiento y la vibración del equipo generador.

10.7.2. Sistema de escape

La función del sistema de escape es la de llevar los productos de la combustión del motor al exterior del recinto para dispersar las emanaciones de los mismos, el hollín y el ruido que se genera. Al ser una ubicación exterior, librarse de los productos de la combustión requiere de un sistema de escape mucho más simple que en el caso de interiores.

Por un lado, no será necesario un silenciador debido a que, por el tamaño del grupo electrógeno y su ubicación, se considera que no supondrá una molestia para los trabajadores de la vaquería.

Por otro lado la conducción de los gases de escape en una ubicación exterior es más fácil de llevar a cabo y no requerirá de anclajes. Tampoco requiere una conducción larga ya que los productos de la combustión pueden ser liberados prácticamente en el sitio. Los tubos empleados se separan del motor mediante conexiones flexibles capaces de tolerar las cargas por vibración, siendo además necesario colocar soportes para permitir la expansión de estas conexiones ya que un metro de tubo de acero se expande aproximadamente 1,2mm cuando su temperatura aumenta hasta los 100°C. También se debe tener en cuenta la

posibilidad de que llueva, por lo que es necesario diseñar una salida del tubo de escape que no permita la entrada de agua de lluvia al sistema.

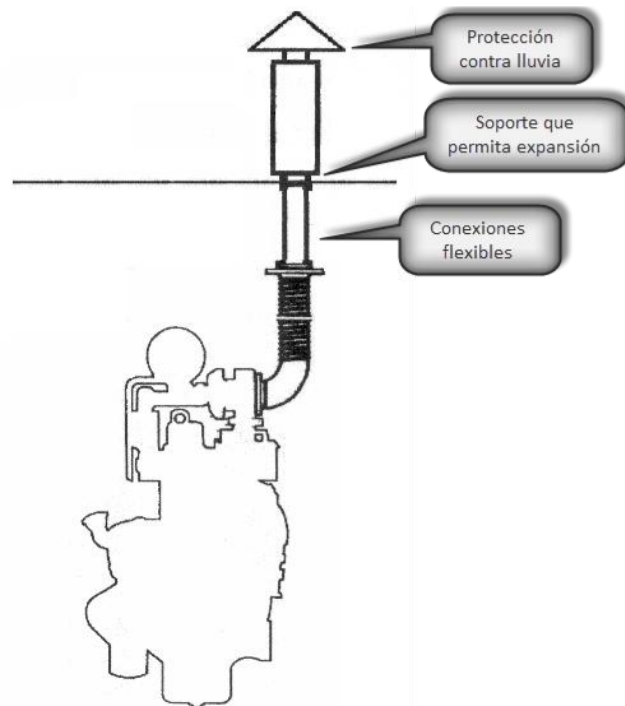


Figura 10.11: Sistema de escape para ubicación exterior

10.7.3. Cubierta

Por haber elegido una ubicación exterior, hay que prevenir que el equipo sea sometido a una excesiva radiación solar. La exposición del equipo al sol puede llevarlo a trabajar a temperaturas mayores a la de su funcionamiento óptimo y provocar fallos en el mismo. Es por ello que el recinto exterior debe incluir una cubierta que mantenga el equipo a la sombra durante su funcionamiento y lo proteja de las inclemencias del tiempo.

Análisis de viabilidad

11. Análisis de viabilidad

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis económico sencillo que permitirá evaluar la viabilidad económica de la planta de biogás diseñada para la Vaquería 101. Posteriormente se analizarán también otros factores que pueden resultar determinantes para evaluar la viabilidad final del proyecto.

11.1. Contexto económico

El principal factor desfavorable para la generación de electricidad a partir de biogás en Cuba es que debe competir económicamente con la generación de electricidad en plantas termoeléctricas Diesel. Como se puede ver en el *Anexo III. 1.*, este tipo de plantas generan el 83% de la energía eléctrica del país y se espera que este porcentaje siga aumentando en los próximos años hasta el 90%, con lo que se conseguirá reducir los costes de producción hasta un valor menor a 0,04 \$/ kWh.

Esta situación supone un factor desfavorable para la rentabilidad económica del presente proyecto, ya que es de esperar que la cantidad de dinero que se consiga ahorrar gracias a la autogeneración no será muy elevada.

Otro factor desfavorable para la rentabilidad del proyecto es la necesidad de adquirir componentes de alta calidad en países industrializados. Se trata de una medida que incrementa enormemente la inversión inicial debido al elevado precio de dichos componentes. Además existirán unos costes de importación de los equipos a los cuales habrá que hacer frente. En caso poder adquirir dichos equipos en Cuba la inversión inicial sería menor, pero no se contempla esa posibilidad debido a que la tecnología que permite generar electricidad a partir de biogás no se fabrica en el país.

Las evaluaciones de factibilidad económica en proyectos de generación eléctrica con biogás son en muchos casos contradictorias. Se pueden encontrar comunicados de prensa e información procedente de productores de biogás que hacen referencia a periodos de recuperación de la inversión de tan solo 1,5 a 2,5 años³⁰. Si se tienen en cuenta esos datos de rentabilidad, supondrían ser plantas de

³⁰ GTZ - Small-scale Electricity Generation from Biomass (Experience with Small-scale Technologies for Basic Energy Supply, Part II)

biogás en las que el precio de la electricidad generada sería equiparable al de la electricidad suministrada por la red. Por ello, estas cifras no se consideran realistas y solo se podrían lograr en lugares muy concretos en donde el combustible empleado para la generación eléctrica convencional sea extremadamente caro.

Las cifras de rentabilidad más favorables y que pueden ser consideradas realistas fueron determinadas por personal cualificado de la GTZ³¹ en Kenia. Dicha información, prevé períodos de amortización para las plantas, bajo un régimen de tarifas de 0,15 [kWh/US\$], de 6 años en condiciones muy favorables, y de 9 años para las inversiones desfavorables pero todavía viables económicamente. A pesar de estos datos, la generación de electricidad con biogás en África no se ha implantado como podría esperarse que lo hiciera un sistema rentable debido a que muchas plantas no pueden ser instaladas sin contar con apoyo financiero. Además existen otros problemas como la falta de conocimiento, la experiencia, la capacidad local, la financiación inicial y la existencia de barreras políticas, los cuales también pueden darse en Cuba.

11.2. Inversión inicial

Se determina la inversión inicial que supondrá la planta de biogás con todos sus componentes. Se diferenciará entre el sistema de generación de biogás y el sistema de aprovechamiento del mismo. Mientras que en el primero se calcularán los costes de construcción de dicho sistema, en el segundo se determinará el precio de los elementos que será necesario adquirir.

11.2.1. Sistema de generación del biogás

Se debe tener en cuenta que para construir un biodigestor, los costos dependen básicamente de la tecnología que se use así como de los requerimientos de producción. Se debe tener presente también que la implementación de un biodigestor constituye una inversión que traerá a mediano y largo plazo beneficios económicos y ambientales sociales a la vaquería.

³¹ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Sociedad de Cooperación Técnica Alemana)

Los costos para la construcción del biodigestor se tomaron los datos obtenidos por Urbáez [13], cuya propuesta consistió en un biodigestor de 10 m³ de capacidad. Tomando estos datos como referencia, se han planteado los costos del biodigestor de 130 m³ diseñado en el presente proyecto:

Mano de obra				
Operación	Nº Obreros	Labor	Nº Horas	Salario (CUP)
Construcción	4 Albañiles	Paredes de las cámaras	320	1650,20
	2 Ayudantes	Preparación del mortero	320	825,60
	4 Obreros finca	Pozo y pintura	160	825,60
Mantenimiento	8 Obreros	Limpieza y pintura	8 horas (2 veces al año)	165,12
Recolección y carga diaria	8 Obreros	Recolección de excreta y carga	2 horas/día (todo el año)	3766,40
Utilización del gas	1 Tornero	Adaptación de equipos	32	82,56
TOTAL				7315,48

Tabla 11.1: Costes de mano de obra para la construcción del sistema de generación de biogás³² [13]

³² Los salarios de los trabajadores en Cuba se pagan en Pesos Cubanos (CUP). Cambio de moneda: 1 CUC = 25 CUP

Materiales						
Material	Unidad	Costos por unidad		Cantidad	Costo total	
		CUP	CUC		CUP	CUC
Cemento	Saco	3,88	3,91	360	1396,8	1407,6
Arena	m3	12,11	-	50	605,5	-
Bloque de 15 cm	U	0,36	-	2200	792	-
Ladrillo macizo	U	0,62	-	3360	2083,2	-
Acero 3/8"	kg	2,25	-	848,1	1908,23	-
Acero 1/4"	kg	2,45	-	108	264,6	-
TOTAL					7050,33	1407,6

Tabla 11.2: Costes de materiales para la construcción del sistema de generación de biogás [13]

El coste total del sistema de generación de biogás será de 14365,81 CUP y 1407,6 CUC. Esto equivale a un total de **1982,23 CUC**.

11.2.2. Sistema de aprovechamiento del biogás

En caso del sistema de aprovechamiento, solamente se tienen en cuenta para el análisis los equipos que será necesario adquirir de un fabricante. El resto de equipos descritos en el tema anterior pueden ser fabricados de forma artesanal, y por tanto los materiales utilizados y forma de construcción pueden variar notablemente y no es posible reflejarlos en un análisis económico. No obstante, los elementos que se adquirirán a un fabricante, que son los más complicados tecnológicamente, representarán la mayor parte de la inversión inicial.

Elemento	Modelo	Coste/ unidad (CUC)	Cantidad	Costes de envío (CUC)	Coste total (CUC)
Cocina a biogás	Rupak ISI Classic Double	30	1	300	330
Lámpara de biogás	Rupak KVIC Regulator Indoor	5	10	200	250
Regulador de presión	Canplast 6 m3/h	229,84	2	0	459,68
Grupo Electrónico	Branco B4T-10000 Bioflex	6067,84	1	800	6867,84
TOTAL					7907,52

Tabla 11.3: Coste de los elementos del sistema de aprovechamiento del biogás en la Vaquería 101

11.2.3. Costes totales

La inversión inicial total para implementación de la planta de biogás diseñada en la Vaquería 101 será por tanto de **9889,75 CUC** (7288,38 €³³).

11.3. Ahorro anual

Para calcular el ahorro económico que supondrá implementar la planta de biogás propuesta se debe partir del ahorro anual en el consumo eléctrico que supone su utilización.

Se emplean los datos del levantamiento de cargas ya que se supone que su funcionamiento será el mismo a diario. Se considera que la carga de trabajo en la vaquería será la misma diariamente, y por tanto el consumo eléctrico será similar todos los días del año. Por ello se considera realista calcular el consumo anual basándonos en el consumo de las cargas un día cualquiera de la vaquería.

Este ahorro ya se ha calculado en el *Apartado 9.3.5*:

$$\text{Ahorro en el consumo eléctrico anual} = 20.268 \text{ kWh/año}$$

Una vez calculados los kWh ahorrados anualmente, se necesita conocer el ahorro que supone en términos económicos. En el caso del Vaquería 101 se debe señalar que la red eléctrica cubana es propiedad del Estado, y que por tanto la empresa

³³ Cambio de moneda: 1 CUC = 0,736963 €

pecuaria Camilo Cienfuegos, que es una empresa estatal, no deberá pagar por la potencia suministrada (kW) y la energía consumida (kWh), como sería el caso si la compañía eléctrica fuese una empresa privada. Por lo tanto, el precio por kWh se establecerá en base a los costes de generación de la electricidad en Cuba, que serán los que deba afrontar el propio Estado cubano. Como se explicó en el contexto económico del *Apartado 11.1.*, la gran mayoría de la electricidad generada en Cuba proviene de centrales termoeléctricas, por lo que será para este tipo de tecnología para la que calcularemos el costo por kWh de generación de la electricidad. Para ello nos basaremos en el análisis realizado en el *Anexo III.2.*, en el que se establece el coste por cada kWh que se sustituye por fuentes de energía renovables en Cuba:

$$\text{Coste de generación de la energía eléctrica} = 0,185 \text{ CUC/kWh}$$

Este coste de generación en Cuba es muy alto si se compara con el coste de generación para centrales termoeléctricas en el mercado latinoamericano, que se estima en 0,0557 \$/kWh³⁴. Las causas de este elevado coste se explican en el *Anexo III.2.*

El ahorro en términos económicos que obtendrá la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos con la planta de biogás diseñada se obtiene aplicando el coste por kWh a los kWh ahorrados anualmente:

$$\text{Ahorro económico anual} = \mathbf{3.749,58 \text{ CUC/año}}$$

Por tanto, la planta de biogás diseñada permitirá a la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos ahorrar un total de 3.749,58 CUC/año en consumo eléctrico.

11.4. Rentabilidad económica

Tras la determinación de la inversión inicial y el ahorro anual, se concluye el análisis económico que permitirá apreciar las posibilidades de implementar la planta de biogás en la vaquería. Para ello se determinará el periodo de rentabilidad del proyecto que se ha planteado sin tener en cuenta la depreciación del dinero con el paso del tiempo.

Teniendo en cuenta la inversión inicial y el ahorro económico anual, ya calculados:

³⁴ Fuente: S. Botero Botero, 2010.

$$\text{Inversión inicial} = 9.889,75 \text{ CUC}$$

$$\text{Ahorro económico} = 3.749,58 \text{ CUC/año}$$

La rentabilidad económica del proyecto será el cociente entre ambos:

$$\text{Rentabilidad económica} = 9889,75 / 3749,58 = \mathbf{2,64 \text{ años}}$$

Se aprecia que el plazo de recuperación de la inversión es de menos de 3 años. Este se considera un plazo de recuperación muy aceptable para una planta de este tipo, por lo que se considera que el proyecto **es rentable económicamente**. Un resultado así era algo que se podía esperar, aún sin haber llegado a un alto porcentaje de sustitución de la red eléctrica, debido al alto coste del kWh generado en Cuba que ya se ha explicado en el *Apartado 11.3*. Este alto coste hace que un ahorro no muy importante en el consumo eléctrico de la vaquería conlleve un gran ahorro económico.

Como condicionantes de este resultado podemos señalar dos factores:

- Es de esperar que la inversión inicial en la realidad sea algo mayor a la calculada en este análisis, debido a componentes adicionales del sistema que sea necesario adquirir y a la inaccesibilidad de algunos de ellos, así como debido a costes derivados de la obra y el posterior mantenimiento del sistema de generación.
- Por otro lado, la situación del sistema eléctrico cubano se encuentra en un estado cambiante, y esto puede resultar en variaciones del coste de generación en el futuro. Concretamente, si se cumplieran los objetivos futuros de reducción de costes marcados por la política eléctrica en Cuba, y que se exponen en el *Anexo III.1.*, sería más barato generar la electricidad suministrada por la red eléctrica, y por tanto la rentabilidad de esta instalación podría disminuir considerablemente.

Sin embargo, dado lo imprevisible de estos factores no pueden valorarse en el presente análisis. Por ello se considera el resultado obtenido como válido y se considera recomendable, en términos económicos, implementar en la Vaquería 101 el sistema diseñado en el presente proyecto.

11.5. Otras consideraciones

Además del análisis económico, existen otros factores derivados de las plantas de biogás de este tipo que pueden resultar determinantes en la viabilidad del proyecto, por lo que deben ser tenidos en cuenta en este análisis. Se diferenciará entre aspectos que favorecerán la viabilidad y aspectos que serán desfavorables:

11.5.1. Aspectos favorables

- Se logra un tratamiento responsable de los residuos generados en la Vaquería 101, disminuyendo en gran medida las emisiones de CH₄. También se reduce el uso de la red eléctrica cubana, la cual funciona principalmente con combustibles fósiles, con lo que también se reducen las emisiones de CO₂.
- Se reducen las emisiones de gases perjudiciales para la salud así como de humos en la cocina de la casa del vaquero. Se eliminan los malos olores generados por los residuos y se favorecen unas condiciones higiénicas y sanitarias adecuadas para las personas en la vaquería.
- En efluente obtenido de los biodigestores es un compuesto que puede ser utilizado por la empresa pecuaria Camilo Cienfuegos como bioabono en sus cultivos, pudiendo aumentar el rendimiento de los mismos hasta en un 25%. También puede utilizarse como biofertilizante para el control de plagas, pues ayuda a disminuir las poblaciones de insectos en los cultivos.

11.5.2. Aspectos desfavorables

- El hecho de que con el sistema diseñado la Vaquería 101 no pueda llegar a independizarse de la red eléctrica, con lo que no se consigue el total autoabastecimiento y el funcionamiento sostenible de la misma.
- La construcción tanto de los biodigestores como de varios elementos del sistema de aprovechamiento del biogás han de construirse artesanalmente, por lo que su buen funcionamiento dependerá en buena medida de la cualificación de la mano de obra. Si no se dispone de personal cualificado que pueda coordinar estas labores, aumentan el riesgo de un mal funcionamiento y la probabilidad de fallos en la instalación.

- Algunos de los elementos del sistema pueden ser de difícil acceso desde Cuba, y los costes de envío e impuestos aplicados a los mismos pueden aumentar notablemente.

Conclusiones

12. Conclusiones

En este proyecto se ha diseñado un sistema para producir biogás a partir de la excreta generada en la Vaquería 101 y aprovecharlo para cubrir las necesidades energéticas existentes. Una vez diseñado el sistema adecuado a las características de la vaquería, se ha evaluado su viabilidad. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El potencial de biogás existente en la Vaquería 101 no es suficiente para cubrir todas sus necesidades energéticas, y por tanto no es posible que ésta se pueda autoabastecer utilizando únicamente el biogás generado. Esto significa que tras implementar el sistema diseñado, la vaquería seguirá dependiendo, aunque en menor medida, de la red eléctrica nacional y no se conseguirá un funcionamiento totalmente sostenible de la misma.
- El biodigestor de cúpula fija como sistema de generación de biogás se ve como una tecnología factible en este tipo de instalaciones, pues puede implementarse a bajo costo y utilizando poca mano de obra. No obstante, se ve la clara necesidad de que al menos parte de esta mano de obra sea cualificada, pues puede ser un factor determinante para que el sistema se construya adecuadamente y no presente fallos una vez se encuentre en funcionamiento, ni requiera un mantenimiento excesivo.
- De todos los procesos existentes en la vaquería son los procesos eléctricos los que consumen la mayor parte del biogás, y se ha considerado que los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son la tecnología más adecuada para generar la electricidad necesaria. Sin embargo, los MCIA pierden gran parte de su eficiencia si no se aprovecha el calor de los gases de escape. Al someter al biogás a combustión, gran parte de la energía del mismo se pierde en forma de calor, que se podría transformar en calor útil empleando un sistema de cogeneración que lo destine a procesos que tengan lugar en las instalaciones. Dado que la Vaquería 101 no requiere calor para realizar ninguno de sus procesos, no se puede plantear un sistema de cogeneración, y por tanto no se obtendrá toda la energía posible del biogás.
- El análisis económico desveló que el sistema diseñado en el presente proyecto es viable económicamente. En este análisis se obtiene que el

sistema será rentable a partir de los 2,64 años, lo cual se considera un resultado muy favorable y que hace que implementar la planta de biogás en la Vaquería 101 se considere recomendable. De cumplirse los objetivos en Cuba en cuanto a reducción del coste de generación en las centrales termoeléctricas, esta rentabilidad obtenida podría disminuir en favor de la generación con petróleo. Por otro lado, el incremento de precio de los combustibles fósiles es algo inevitable ya que se trata de recursos finitos, y esto podría favorecer las posibilidades de la autogeneración obteniendo incluso mayores ahorros económicos o posibilitando la venta de electricidad.

- Dicho lo anterior, se cree que el factor económico no es el único que se debe tener en cuenta al evaluar si un proyecto de estas características es viable o no. Existen varios beneficios sociales, en agricultura y principalmente medioambientales que se deben tener muy en cuenta y que hacen más interesante la implementación del proyecto. La gran reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, el tratamiento adecuado de residuos, el uso del efluente como fertilizante o la reducción de humos y olores son algunos de estos beneficios.
- La dificultad de obtención de datos ha sido la principal problema encontrado en la realización de este proyecto. Se ha tenido que trabajar con estimaciones y datos obtenidos de bibliografía en algunos casos, y no con valores medidos en la propia vaquería. Esto lleva a la conclusión de que no ha sido posible llegar a un alto nivel de precisión, y que muchos de los valores que se han manejado en diferentes partes del proyecto podrán variar notablemente en la realidad. Esto podría afectar al funcionamiento de los sistemas diseñados una vez construidos. Las principales causas de esta imprecisión han sido:
 1. Datos limitados acerca de los equipos y el funcionamiento de la Vaquería 101.
 2. Imposibilidad de ir a la Vaquería 101 en el transcurso de la estancia en Cuba, debido a su ubicación aislada y a la dificultad de conseguir un medio de transporte hasta ella. Esto hubiera permitido analizar en primera persona los equipos y los procesos diarios en la vaquería, pudiendo así caracterizarlos de forma más rigurosa.

3. No se pudieron realizar algunas mediciones, como la composición real del biogás obtenido en la Vaquería 101 que hubiera permitido conocer el porcentaje real de metano en el biogás. Esto hubiera permitido calcular de forma más precisa el consumo de los equipos y dimensionarlos en consecuencia, especialmente en el caso el grupo electrógeno.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] J. A. Guardado Chacón, “Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas”, 2007
- [2] J. A. Guardado Chacón, “Tecnología del biogás”, 2006
- [3] V. V. Tarik Marc, “Las fuentes renovables de energía en Cuba”, 2008
- [4] Asociación Cubana de Producción Animal (ACPA), “Biodigestores: Biogás y Bioabonos. Un sistema tecnológico limpio”, 2010
- [5] Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Latina (FOCER), “Manuales sobre energía renovable - Biomasa”, 2002
- [6] J. A. Guardado Chacón, “El Arte del Biogás en Cuba”, 2006
- [7] J. Martí Herrero, “Biodigestores familiares - Guía de diseño y manual de construcción”, 2008
- [8] G. Marichal Sánchez, “Evaluación preliminar de excretas animales como inóculos para la producción de biogás”, 2010
- [9] Joaquín A. Viquez Arias, "Generación eléctrica con biogás", 2010
- [10] H. D. Sustánig Chuquitarco, “Diseño de un biodigestor para el aprovechamiento energético de la excreta generada por los animales de cría en la finca de autoconsumo del Instituto Preuniversitario Vocacional de Ciencias Exactas Federico Engels”, 2010
- [11] A. Ramos Gálvez, “Estudio de las Potencialidades de Biogás. Estudio del Caso Empresa Pecuaria José Martí”, 2009

- [12] J. A. Guardado, “El Biogás: Energía renovable y sostenible - III Encuentro Nacional de Usuarios del Biogás”, 2011
- [13] L. Urbáez Méndez, “Alternativa energética con enfoque de género en la Comunidad de Canalete, San Andrés, Pinar del Río”, 2007
- [14] Energypedia (www.energypedia.info), Noviembre 2012 - Mayo 2013
- [15] L. R. Carballo Abreu, “Estado del Arte de la producción de biogás en Cuba”, 2007
- [16] P. Jaureguibeitia Villalabeitia, “Biodigestor de bajo costo en la granja escuela de Menteh (Camerún)”, 2010
- [17] Joaquín A. Víquez Arias, "Generación eléctrica con biogás", 2010
- [18] Cummins Power Generation, "Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores enfriados con Líquido", 2011
- [19] Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), "Small-scale Electricity Generation from Biomass (Part II)", 2010
- [20] Juan Miguel Mantilla Gonzalez, Borys Javier Aguirre Junco, Luis Andres Sarmiento Pinilla, "Evaluación experimental de un motor encendido por chispa que utiliza biogás como combustible", 2008
- [21] United Nations Industrial Development Organization, "Navigating Bioenergy. Contributing to informed decision making bioenergy issues", 2009
- [22] I. Labiano Iradiel, “Estudio de viabilidad de un sistema de generación de energía eléctrica empleando biogás como combustible en el Matadero Municipal de Cochabamba (Bolivia)”, 2014

Anexos

Anexo I: Biogás y biodigestores

I.1. Rendimiento de biogás según la especie animal

Especie animal	Cantidad diaria de excreta (kg)	Rendimiento de biogás (m ³ /kg excreta)	Producción de biogás (m ³ /animal.día)	Relación excreta:agua
Vacuno				
• Grande	15	0,04	0,6	1:1
• Mediano	10	0,04	0,4	
• Pequeño	8	0,04	0,32	
• Ternero	4	0,04	0,16	
Búfalo				
• Grande	20	0,04	0,8	1:1
• Mediano	15	0,04	0,6	
• Pequeño	10	0,04	0,4	
• Ternero	5	0,04	0,2	
Cerdo				
• Grande	2	0,07	0,14	1:1 a 1:3
• Mediano	1,5	0,07	0,10	
• Pequeño	1	0,07	0,7	
Avícola				
• Grande	0,15	0,06	0,009	1:3
• Mediano	0,10	0,06	0,006	
• Pequeño	0,05	0,06	0,003	
Ovino				
• Grande	5	0,05	0,25	1:2 a 1:3
• Mediano	2	0,05	0,10	
• Pequeño	1,5	0,05	0,05	
Pato	0,15	0,05	0,008	1:2 a 2:3
Paloma	0,05	0,05	0,003	2:3 a 1:3
Caballo	15	0,04	0,60	1:2 a 2:3
Elefante	40	0,02	0,80	1:2 a 2:3
Humano				
• Adulto	0,40	0,07	0,028	1:2 a 1:3
• Niño	0,20	0,07	0,014	

Tabla I.1: Rendimientos de biogás según la especie animal[14]

I.2. Comparación entre los tipos de biodigestor

Parámetros	Cúpula fija	Cúpula flotante	Exigencias
Presión	La presión de gas aumenta según la cantidad de gas almacenado, en muchos casos la presión de gas es muy alta	Presión de gas constante	Que no afecte el proceso tecnológico
Manejo	No posee partes Móviles, manejo complicado	Manejo fácil y razonable. El gas almacenado es directamente visible	Manejo más fácil posible
Construcción	Construcción subterránea que ayuda a ahorrar espacio. Bajos costos de construcción, dificultad en el sellado de la planta	Construcción subterránea. Altos costos de construcción de la campana. Pocos errores posibles en la construcción	Facilidad de construcción, que la planta sea lo más fiable posible
Vida útil	20 años o más	Hasta 15 años. En costas tropicales unos 5 años de vida para la campana	La mayor vida útil posible
Economía	Bajos costos de construcción	Altos costos de construcción de la campana. Costos de mantenimiento periódicos causados por la pintura	Menor costo posible.
Productividad	0.15 a 0.2 m ³ de biogás/volumen de reactor x día	0.5 a 1 m ³ de biogás/volumen de reactor x día	Mayor productividad posible
Eficiencia	Se alcanza la máxima eficiencia (50% de reducción de materia orgánica) con un tiempo de retención de 30-60 días	Solo se requiere de 1/2 a 1/3 del tiempo de retención con respecto al biodigestor de cúpula fija	Mayor eficiencia posible

Tabla I.2: Comparación entre el biodigestor de cúpula fija y cúpula flotante. [13]

I.3. Posibles problemas en una planta de biogás: Causas y soluciones

En la siguiente tabla se ha intentado recopilar los problemas más comunes que tienen lugar en una planta de biogás. Además se incluyen las posibles causas del problema y la forma de solucionarlo para cada una de estas causas.

Fenómenos	Causas	Soluciones
1. Poco gas o nula producción	1. La descomposición no comienza aún	- Esperar por un tiempo
	2. Escasez de bacterias	- Sustituir o añadir materiales de fermentación. - Añadir bacterias
	3. Baja temperatura	1. Llenar el estanque de descomposición con material pretratado. 2. Mantener calor en el digestor o calentar los materiales antes de embutir en el equipo.
	4. Goteras	- Revisar el gasoducto o el manómetro con líquido y jabón.
	5. Capa espesa	- Sustituir materiales, no colocar materiales que contiene mucha celulosa y realizar pretratamiento. - Añadir sustancias químicas que contiene enzima o coenzima.
	6. Solución muy ácida	- Esperar hasta que comience la fermentación. - Utilizar cenizas en cantidad adecuada
	7. Solución muy básica	- Esperar
	8. No existe suficiente sustratos (las plantas no se rellenan frecuentemente)	- Aumentar la cantidad de relleno y rellenar con más frecuencia.
	9. Hay toxinas	Iniciar de nuevo

Fenómenos	Causas	Soluciones
<p>2. No se produce suficiente gas para el consumo</p>	<p>1. Bajo rendimiento porque la descomposición es incompleta o faltan materiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pretratar materiales - Averiguar la tasa C/N - Recalcular el volumen - Aumentar materiales
	<p>2. Se abre Funda o manómetro</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ajustar el nivel de agua en la funda 2. Añadir agua al manómetro 3. Cambiar el tubo U si es pequeño 4. La presión es demasiado alta, hay que reducirla 5. Aumentar volumen del depósito (extra paquete afuera)
	<p>3. Sobreconsumo</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ajustar la cocina 2. Baja productividad de artículos consumidores. 3. Utilizar la cocina incorrectamente. 4. Modificar la cocina o artículos consumidores.
	<p>4. El gas se escapa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Chequear las válvulas, los tubos y las juntas
<p>3. Se produce gas en demasía</p>	<p>- Demasiados materiales</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuir la cantidad de relleno 2. Aumentar el volumen del depósito 3. Sustituir la cocina por otra de mayor capacidad 4. Mayor consumo 5. Dejar el gas salir por algunas válvulas

Fenómenos	Causas	Soluciones
4. No se puede empotrar el material al digestor	1. Demasiada concentración del material	- Diluir el material
	2. Obstruido el tubo de entrada	- Limpiar el tubo, desechar sustancias que causan sedimento
	3. Subida del líquido en el tubo de salida porque su inclinación no es suficiente	- Ajuste el tubo de salida para que tenga mayor inclinación hacia el digestor
	4. Sedimento demasiado espeso	- Romper el sedimento y desechar las sustancias que lo causan
5. El contenedor del gas no funciona	Está vacío	<ol style="list-style-type: none"> 1. Averiguar sistema de seguridad 2. Revisar la funda de agua en la cubierta 3. Ubicar posiciones de goteras por olor o solución de jabón
6. No está lleno el contenedor del gas	1. No es suficiente el rendimiento de gas	<ul style="list-style-type: none"> - Pretratar materiales - Averiguar la tasa C/N - Recalcular el volumen - Aumentar materiales
	2. Obstrucción el gasoducto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Residuar condensas 2. Instalar un aparato de recoger condensas
7. El gas producido tiene mal olor	Demasiado H ₂ S en el biogás	- Instalar filtro
8. Partes del equipo hecho de metal se hacen negras	Demasiado H ₂ S en el biogás	- Instalar filtro
9. Se detiene la producción de gas de repente	- La fermentación se envenenó	- Desechar todos materiales en el tanque de descomposición y reiniciar el proceso

Fenómenos	Causas	Soluciones
10. El biogás no llega a artículos de consumo	<ul style="list-style-type: none"> - El gasoducto está hueco - La presión no es suficiente - El gasoducto se obstruye 	<ul style="list-style-type: none"> - Soluciones referidas anteriormente - Sustituir por otro tubo más grande - Usar bomba de presión
11. El gas no presenta características combustible	1. Demasiado aire o CO2 en el biogás en primer período de operación	<ul style="list-style-type: none"> - Dejar que el gas salga y sólo cerrar el horno de gas cuando ya es inflamable - Añadir sustancias básicas o sólo esperar
	2. Producción inadecuada de gas	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir cantidad de relleno por no embutir más orina al digestor
	3. La cocina se rompe o la presión es baja	<ul style="list-style-type: none"> - Reparar o sustituir la cocina - Usar bomba de presión
12. La llama se separa de la superficie de la cocina	1. Alta presión	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la presión o estrechar la tobera del gasoducto
	2. La cocina no está bien ajustada	<ul style="list-style-type: none"> - Proveer más aire a la cocina o reajustarla
13. La llama se alarga y es poco energética	Mal ajustada la entrada del aire de la cocina	<ul style="list-style-type: none"> - Reajustarla
14. La llama no es estable	1. Baja presión	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentarla (método explicado anteriormente)
	2. Obstruido el gasoducto por condensación	<ul style="list-style-type: none"> - Desechar condensas

Fenómenos	Causas	Soluciones
15. Se mojan los alrededores de las conexiones entre el tanque de descomposición y la entrada o la salida	Cemento de baja calidad o trabajo poco cuidado del constructor	<ul style="list-style-type: none"> - Sacar materiales en el digestor, al menos a un nivel inferior de las partes huecas. Utilizar argamasa de cemento y arenas negras con tasa 1:2 para revocar completamente los lugares huecos. Esperar hasta que se seque la argamasa revocada y volver a llenar el digestor
16. Huecos en paredes. Hormigón defectuoso	Incorrectas técnicas de construcción y de revocación	<ul style="list-style-type: none"> - Colocar una red de acero en la pared o renovar el hormigón hueco con una capa de cemento arriba - Aplicar pinturas impermeables varias veces - Si la cúpula está hueca, renovar con arcilla y cubrirla con este material
17. Muchos mosquitos en las fundas del agua	El agua en fundas no está bien protegida	<ul style="list-style-type: none"> - Cambiar el agua o echar un pequeña cantidad de petróleo en el superficie del agua.

Tabla I.3: Problemas, causas y soluciones de una planta de biogás de cúpula fija [4]

Anexo II: Caracterización del funcionamiento del grupo electrógeno a biogás

II.1 Rangos de potencia de un grupo electrógeno

Los rangos de potencia³⁵. de los grupos electrógenos son publicados por los fabricantes y describen las condiciones de carga máximas permisibles que tiene el mismo. Las condiciones mínimas de carga vienen establecidas por los fabricantes en un 30% del rango de potencia de trabajo del generador. Los rangos de potencia que emplean mayoritariamente los grupos electrógenos son los siguientes:

Rango de potencia Standby

El rango de potencia standby se aplica en instalaciones servidas por la red eléctrica en situaciones de emergencia, esto es, cuando el conjunto generador sirve como respaldo debido a una interrupción de la energía suministrada por la red. Este rango es el de mayor potencia disponible y no dispone de capacidad de sobrecarga. Además, este rango sólo contempla cargas variables con un factor de carga promedio al 70% de la potencia standby por un máximo de 200 horas de operación al año. Con este rango de potencia no se permite la operación en paralelo con la red. Para las aplicaciones que requieran una operación en paralelo con la red, debe utilizarse el rango de potencia primaria o el de potencia continua.

³⁵ Fuente: Manual de Aplicación para Conjuntos Generadores de Cummins Power Generation

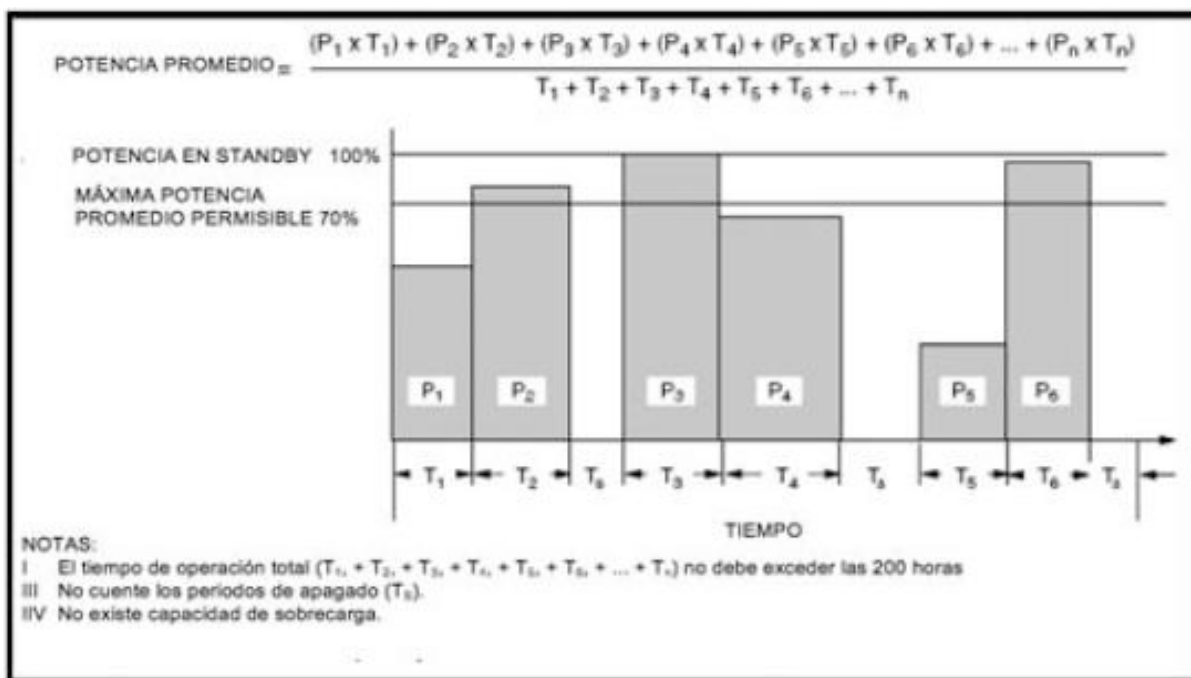


Figura II.1: Rango de potencia standby

Rango de potencia Primaria

El rango de potencia primaria se aplica cuando se suministra energía eléctrica en lugar de la energía comprada comercialmente. El número de horas de operación permisibles por año es ilimitado para aplicaciones de carga variable pero está limitada para aplicaciones de carga constante. El caso que suscita un mayor interés es el que la potencia primaria está disponible para un número ilimitado de horas de operación al año en aplicaciones de carga variable. Las aplicaciones que requieren de la operación en paralelo con algún servicio público con carga constante están sujetas a limitaciones de tiempo de operación. En aplicaciones de carga variable, la carga promedio no debe exceder del 70% del rango de potencia primaria durante 24 horas de operación. Se dispone de una capacidad de sobrecarga del 10% por un periodo de 1 hora en un periodo de operación de 12 horas, pero no debe exceder de 25 horas al año.



Figura II.2: Rango de potencia primaria con tiempo de operación ilimitado

Rango de potencia Continua

El rango de potencia continua se aplica cuando hay que suministrar potencia continuamente a una carga hasta el 100% de la capacidad base por horas ilimitadas. En este rango no se dispone de capacidad de sobrecarga. Este rango se aplica en la operación de cargas continuas del servicio público. En estas aplicaciones, los conjuntos generadores operan en paralelo con una fuente de servicio público y bajo cargas constantes por periodos prolongados.



Figura II.3: Rango de potencia continua

Anexo III: Producción de electricidad en Cuba

III.1: Situación actual de la generación de electricidad y de la política energética en Cuba

La política energética cubana referida a la electricidad está dirigida a asegurar el suficiente suministro de esta energía acorde con el desarrollo energético esperado. En los últimos cinco años, el consumo energético en Cuba ha crecido establemente en la misma manera que la economía nacional ha recobrado su salud. La generación de electricidad se basa aún en el uso intensivo de los combustibles fósiles, pero la estructura de tal generación ha cambiado.

Las plantas termoeléctricas son responsables de más de 83 % de la generación de electricidad en Cuba. Actualmente se cuenta con 10 plantas eléctricas con una capacidad instalada de 3,500 Megavatios³⁶. El 50% del petróleo con el que se genera electricidad en estas plantas se importa del mercado exterior a un alto precio, lo que hace que el costo de generación por kWh sea muy alto. El otro 50% es el denominado crudo nacional, que resulta mucho más barato pero requiere de un intenso proceso de refinado. Se espera que este petróleo crudo nacional cubra un 90% del consumo de combustible dentro de los próximos cinco años, lo que permitirá al SEN generar electricidad a un costo menor que 0,04 USD/kWh. Para alcanzar exitosamente esta meta una intensiva modernización de las plantas termoeléctricas se lleva a cabo, lo que junto con el combustible barato pueden lograr estabilizar el suministro de electricidad a la red nacional. El uso intensificado de este crudo traerá como consecuencia, por otro lado, un considerable aumento de los costes medioambientales.

En los últimos quince años, las condiciones básicas han sido creadas para impulsar el uso de algunas energías renovables como complemento al balance energético nacional y para la electrificación de objetivos aislados.

La industria azucarera ha sido llamada a incrementar su participación en el balance energético nacional, mejorando principalmente su eficiencia en la generación de electricidad y añadiendo capacidades basadas en el uso del bagazo como combustible principal, una fuente renovable que suministra actualmente

³⁶ Fuente: Manuel Cereijo, Revista Guaracabuya, 2008

cerca de 10 % de la generación anual de electricidad a escala nacional, pero solamente en los cuatro o cinco meses que duran las zafras.

Cerca de 150 micro y mini plantas hidroeléctricas han sido instaladas, la mayoría de ellas entregan electricidad al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y otras suministran electricidad a pequeños poblados no conectados a la red eléctrica nacional. Mas de tres mil sistemas autónomos fotovoltaicos han sido montados para el suministro de consultorios médicos, escuelas, hospitales y centros sociales en áreas rurales no conectadas al SEN.

A pesar de que la Ley Eléctrica Cubana no estimula especialmente el uso y comercialización de las energías renovables, algunas regulaciones complementarias permiten a los productores independientes de energía vender electricidad a la red eléctrica nacional. En el momento actual estas regulaciones benefician al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), que maneja y opera las micro y mini plantas hidroeléctricas, y al Ministerios de la Industria Azucarera (MINAZ), que maneja y opera más de 150 ingenios azucareros, algunas docenas de los cuales cogeneran electricidad

Existen limitaciones prácticas a los intentos de desarrollar el mercado de energías renovables conectados a la red eléctrica. Las principales limitaciones para su desarrollo en Cuba son:

- El costo de generación debe estar por debajo del costo evitado de la energía.
- El bajo costo de la electricidad convencional para el sector industrial.
- Gran disponibilidad de combustibles fósiles.

Una situación diferente se prevé para las nuevas áreas con desarrollo turístico, principalmente en los cayos de la costa norte, donde varios miles de habitaciones serán construidas en los próximos diez o quince años. Debido a su localización geográfica no es prácticamente factible unir estas áreas a la red nacional por lo que deberán instalarse sistemas eléctricos autónomos.

Donde el desarrollo turístico ya ha comenzado, nuevas plantas diesel han sido instaladas y la electricidad generada en ellas es muy cara (entre 0,09 y 0,11 USD/kWh). Esto hace que la necesidad de impulsar su sustitución por fuentes renovables de energía sea cada vez mayor.

III.2. Índices energéticos para estudios de factibilidad en Cuba

En este apartado se muestran los datos básicos aportados por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para los estudios de factibilidad en proyectos de generación de electricidad con energías renovables. Este texto está englobado en el Plan 2013 del Programa de Inversiones con Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética.

Combustibles:

El precio de los combustibles que se debe utilizar en los estudios de factibilidad de inversiones que sustituyen el uso directo de combustibles fósiles o disminuyen su consumo se muestra en la tabla 1.

Combustible	Precio	
	CUP/t	USD/t
Petróleo crudo nacional	366	450,38 *
Fuel Oil	504	680 **
Diesel Oil	621	767,50 *
Gasolina	?	937,42 *
Gas licuado de petróleo	?	800,098 **
Leña	20	0
Marabú	120	0

Tabla III.1: Precio de los combustibles

* Según promedio real exportación 2011 efectuada por Cuba

** Precio importación promedio 2011

Nota: 95,01 USD/b WTI = 723,026 USD/t

110,80 USD/b Brent = 836,54 USD/t

Con el propósito de uniformar los valores de densidad y poder calórico de los principales combustibles que se usan en el país, se sugiere utilizar, de ser necesario, los reflejados en la Tabla III.2.

Combustible	Densidad (t/m ³)	Poder calórico (MJ/t)
Petróleo crudo nacional	0,97	44726
Fuel Oil	0,88	42636
Diesel Oil	0,912	45353

Gasolina	0,718	47234
Gas licuado de petróleo	0,553	50076
Leña (seco)	0,650	19000
Marabú (seco)	1,1	19400

Tabla III.2: Datos técnicos de combustibles

t	PRODUCTOS	Combustible	Valor Calórico
1	Gasolina Regular	1,18	11200,0
1	Gasolina Especial	1,18	11200,0
1	Gasolina Super	1,18	11200,0
1	Diesel	1,06	10102,0
1	Kerosina	1,08	10222,0
1	Alcohol (hl)	0,66	6311,0
1	Nafta	1,18	11200,0
1	Gas Licuado	1,23	11670,0
1	Petróleo Combustible	1,00	9500,0
1	Diesel Fuel	1,03	9758,0
1	Aguarrás	1,08	10222,0
1	Diesel Marino	1,06	10102,0
1	Turbocombustible	1,08	10222,0
1	Gasolina de Aviación	1,18	11200,0
1	Crudo Nacional	0,97	9200,0
1	Crudo Importado	1,11	10500,0
1	Asfaltos	0,97	9200,0
1	Plato Colector	1,00	9473,0
1	Cutter	1,03	9758,0
1	Aceite Usado	1,00	9500,0
1	Gas Natural	0,95	9000,0
1	Gas Manufacturado	0,52	4900,0
1	Productos Ligeros	1,18	11200,0
1	Productos Medios	1,06	10102,0
1	Productos Pesados	0,98	9300,0
1	Leña	0,43	4065,9
1	Bagazo	0,25	2400,0
1	Paja de caña	0,16	1500,0
1	Biogás	0,49	4611,3
1	Carbón vegetal	0,80	7600,0
1	Basura domestica clasificada	0,13	

Tabla III.3: Equivalencias de diferentes combustibles

Electricidad - Disminución de consumo de electricidad del SEN

El promedio del año 2011 es de 0,27 USD/kW·h, teniendo en cuenta la estructura de generación y el consumo de los portadores asociados al costo país de los mismos.

El consumo de combustible equivalente en el 2011 es de 0,3328 t/MW·h.

El coste de la electricidad que se sustituye por generación con fuentes renovables de energía o con acciones de eficiencia energética está determinado en cada horario del día por la tecnología que genera la electricidad más cara en cada periodo. En la *Tabla III.4.* se muestran los valores del índice de consumo de generación de cada tecnología reportados por la ONE en el Anuario Estadístico de Cuba 2010 y las pérdidas eléctricas desde la generación hasta el consumidor final en cada caso tomados del documento de la ONE "Panorama Económico y Social. Cuba 2010". Los precios de los combustibles utilizados son los reportados en la *Tabla III.1.*

Periodo del día	Horario	Se sustituye generación con	Índice de consumo en la generación	Pérdidas eléctricas
			g/kW·h	%
Horario del día	5:00 – 17:00	Fuel oil	217,9 211	11,6
Horario del pico	17:00 – 21:00	Diesel	233,9 220	11,6
Horario de la noche	21:00 - 24:00	Fuel Oil	217,9 211	11,6
Horario de madrugada	24:00 – 5:00	Crudo nacional	279,0 280	15,9

Tabla III.4: Bases para el cálculo del costo evitado de la electricidad consumida por el cliente final.

El resultado de este cálculo se muestra en la *Tabla III.5.* asumiendo que el costo reportado en CUC es el costo por combustible y que este representa el 60% del costo total de la electricidad.

Periodo del día	Horario	Costo		
		CUC/ kWh	CUP/ kWh	Total/ kWh
Horario del día	5:00 - 17:00	0,165 0,160	0,110 0,107	0,275 0,267
Horario del pico	17:00 - 21:00	0,259 0,233	0,173 0,155	0,432 0,388
Horario de la noche	21:00 - 24:00	0,165 0,160	0,110 0,107	0,275 0,267
Horario de madrugada	24:00 - 5:00	0,181 0,182	0,121 0,121	0,302 0,303
Las 24 h		0,185 0,183	0,123 0,120	0,308 0,303

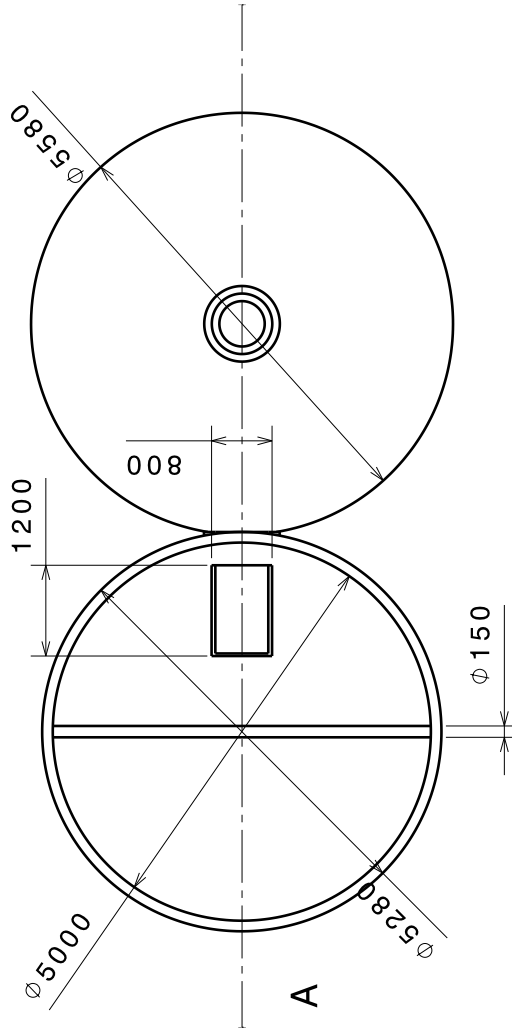
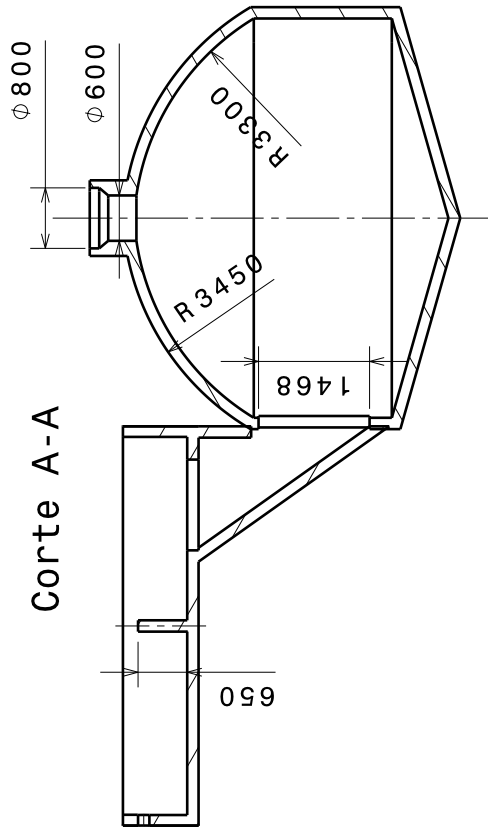
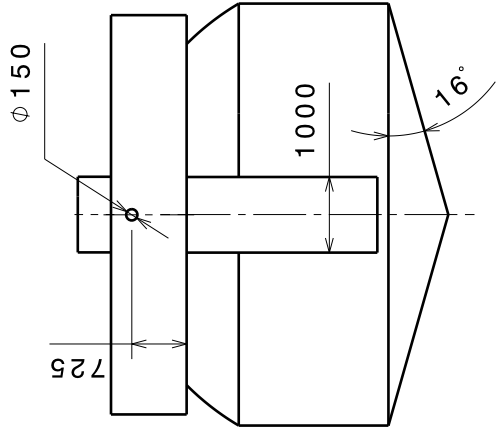
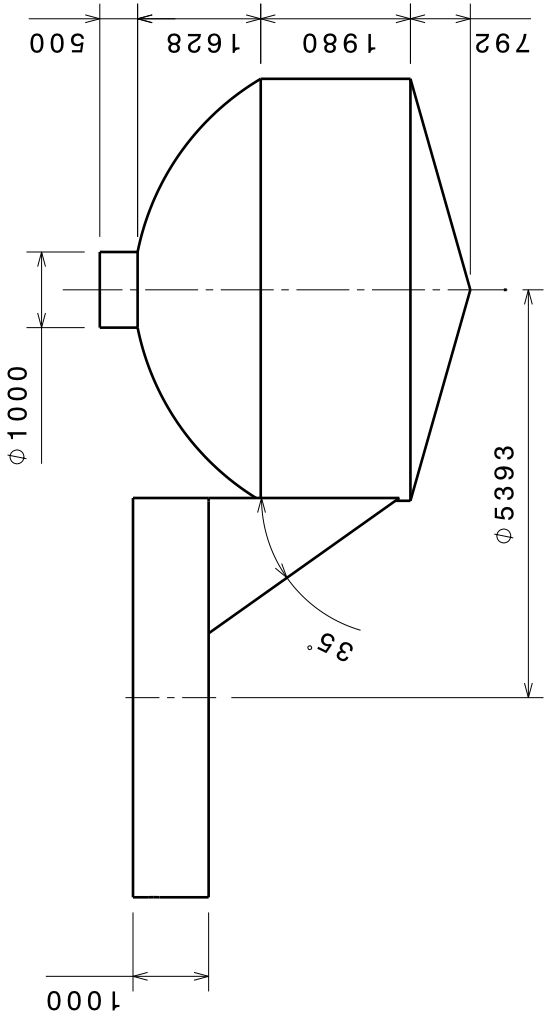
Tabla III.5: Costo evitado de la electricidad consumida por el cliente final.

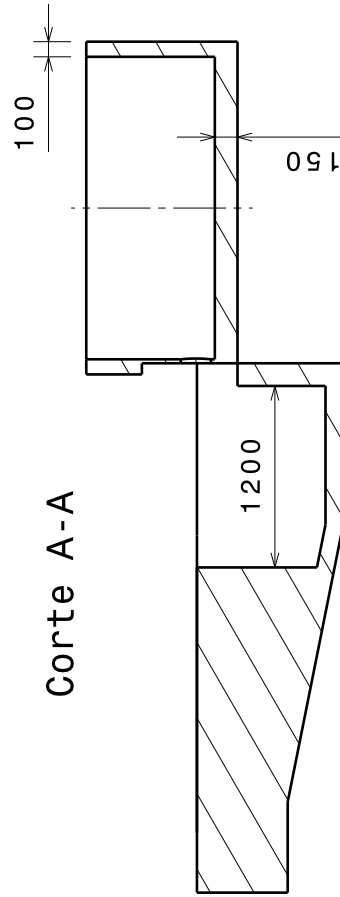
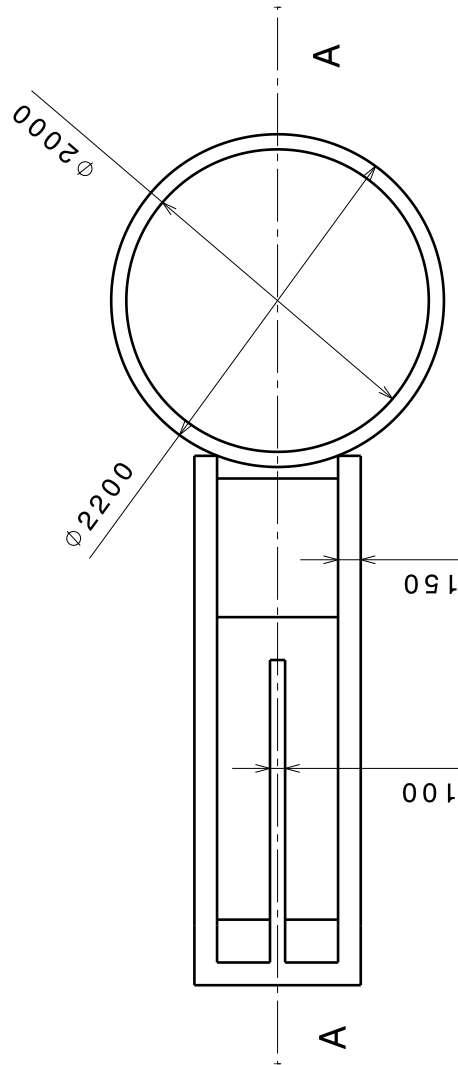
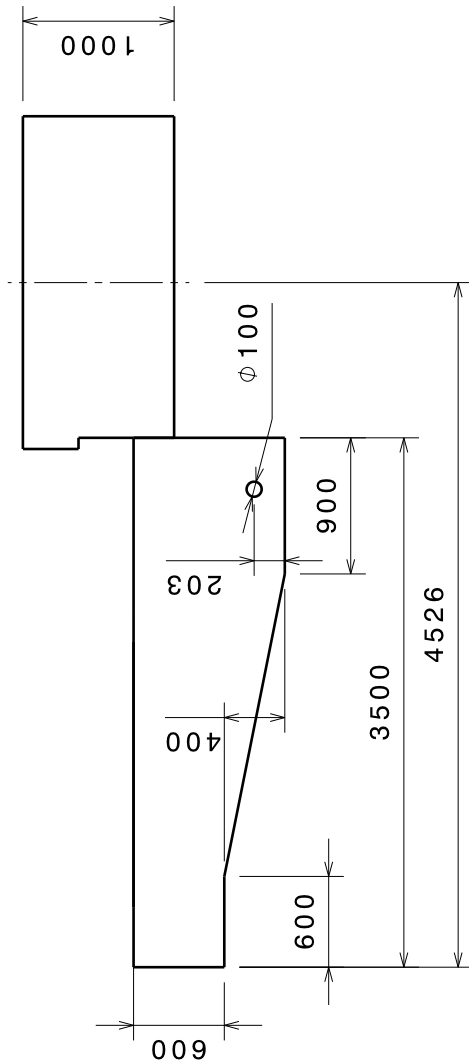
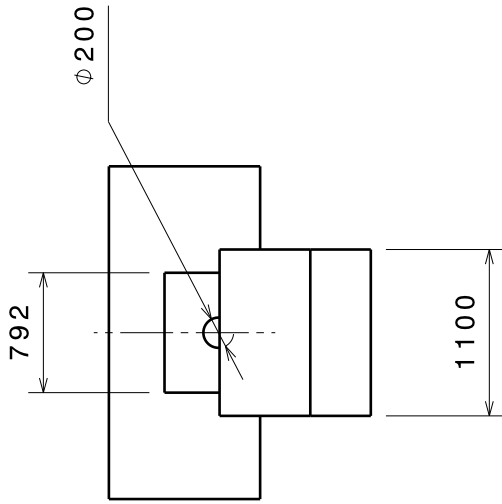
Análisis de costes

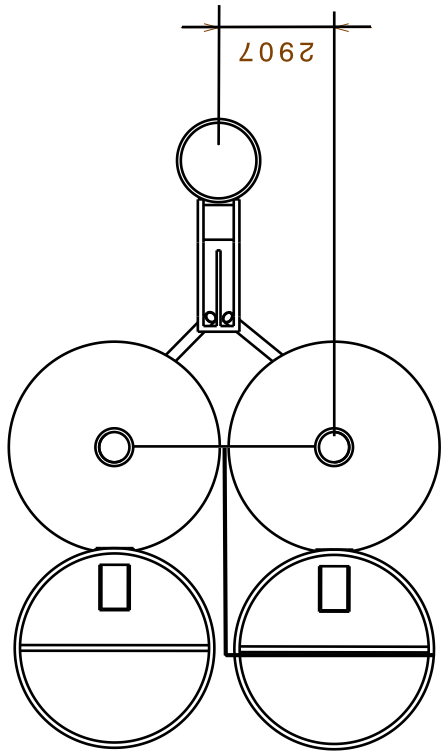
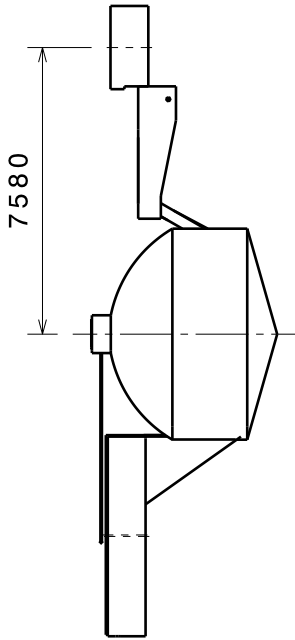
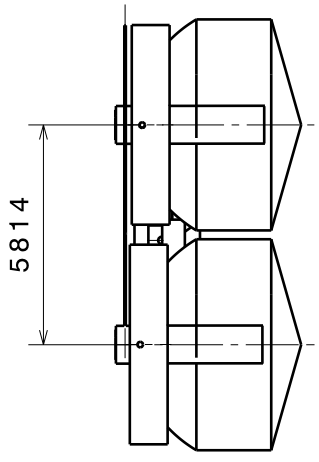
Como se puede ver en la tabla anterior, el coste de generación de la electricidad por kWh en Cuba resulta muy alto. Si se observa el mercado latinoamericano, el coste medio de generación es de 0,0557 \$/kWh. Esta diferencia de coste es tan amplia por varias razones:

- El 50% de la generación de electricidad en Cuba se realiza con petróleo importado, cuyo precio es alto en el mercado. Recientes cambios en las relaciones de comercio internacional del país con algunos de los principales proveedores de petróleo han podido influir en aumentar todavía más este precio.
- El otro 50% de la generación se realiza con petróleo crudo nacional, proveniente de yacimientos en el país. Este petróleo se obtiene a un coste mucho menor, pero su alto contenido en azufre hace que no sea adecuado para utilizarse en las plantas por necesitar un refinado previo. Las refinerías cubanas no cuentan actualmente con la capacidad suficiente para tratar todo el crudo cubano necesario, lo que hace que el coste de generación al utilizar este petróleo aumente considerablemente.
- Las líneas de distribución cubanas son aéreas, con lo que las pérdidas que se producen en la misma son elevadas.

Planos







<p>Nº 3</p>	<p>Título: Biodigestores en paralelo</p>
<p>Escala: 1/200</p>	<p>Autor: Javier Hernández López</p>

INGENIERÍA INDUSTRIAL
upna