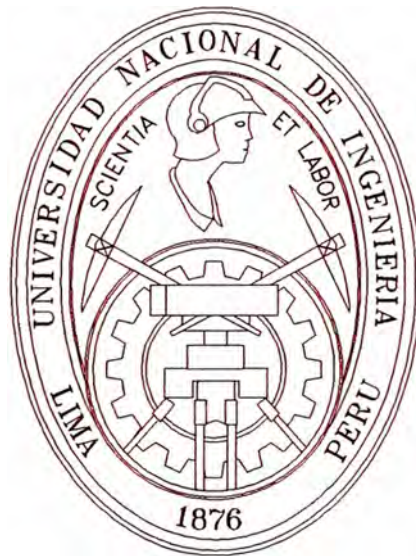


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE**

**INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR  
DIESEL CON SUMINISTRO DE BIOGÁS”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECANICO**

**RAFAEL OSWALDO CASTRO VERAMENDI**

**PROMOCIÓN 2002-II**

**Lima –Perú  
2004**

El presente trabajo está dedicado

A mi padre, por su apoyo constante,  
A la memoria de mi madre,  
A mi madre política, por su incentivo;  
A mi Alma Mater ; y  
A todos aquellos peruanos que a pesar de las dificultades  
se esfuerzan y perseveran por alcanzar metas  
comprometidas con el desarrollo de nuestra sociedad

### III

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	4
1.1 Objetivos del trabajo	4
1.2 Planteamiento del estudio	5
1.3 Antecedentes	6
1.3.1 Antecedentes en el Perú	6
1.3.2 Antecedentes en otros países	8
1.4 Importancia del tema	16
1.5 Limitaciones	17
<b>2. EL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA</b>	18
2.1 Obtención del biogás (resumen)	18
2.2 Propiedades físico-químicas del biogás	20
2.3 Análisis de propiedades y características referentes al biogás	21
2.3.1 Composición del biogás	21
2.3.2 Densidad del biogás	21
2.3.3 Poder calorífico	23
2.3.4 Relación aire-combustible teórica	25

2.3.5	Coeficiente de exceso de aire	25
2.3.6	Temperatura mínima de autoencendido	26
2.3.7	Velocidad Normal de llama o velocidad de combustión laminar	28
2.3.8	Límites de inflamabilidad	32
2.3.9	Características del golpeteo	34
<b>3.</b>	<b>SISTEMA PROPUESTO DE SUMINISTRO DE BIOGÁS DE UN MOTOR DIESEL</b>	<b>35</b>
3.1	Sistema propuesto de suministro de combustible gaseoso en un motor Diesel (motor Diesel-gas)	35
3.2	Diseño del mezclador de aire y biogás , y descripción de los demás componentes del sistema de suministro de Biogás	36
3.2.1	Diseño del mezclador de aire y biogás	36
3.2.2	Descripción de los demás componentes	50
3.3	Sistema de control de la velocidad del motor en función de la carga	53
3.3.1	Tipos de control	54
3.3.2	Sistema de control utilizado	58
<b>4.</b>	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>	<b>63</b>
4.1	Descripción del banco de pruebas	63
4.1.1	Características del motor y del generador utilizado	66
4.1.2	Descripción de la instrumentación	67
4.2	Fórmulas empleadas	71
4.3	Errores experimentales	76

<b>5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>79</b>
5.1 Análisis comparativo	81
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>94</b>

**BIBLIOGRAFÍA**

**PLANOS**

**PROTOCOLOS DE PRUEBAS**

**ANEXOS**

## PROLOGO

El desarrollo de las zonas rurales y urbano marginales de nuestro país exige satisfacer las necesidades energéticas para elevar la productividad de sus actividades, y en consecuencia, mejorar sus niveles de vida.

Por otra parte, para el desarrollo de nuestro país es muy importante un mejor y adecuado uso de los recursos propios, transformándolos, dándoles un valor agregado y evitando en cuanto sea posible la dependencia de productos no locales.

El presente trabajo busca formar parte del desarrollo de las zonas rurales y urbano marginales de nuestro país analizando la factibilidad técnica de satisfacer la necesidad energética, haciendo uso de un recurso propio como lo es la biomasa, a partir de la cual se obtiene el biogás a ser utilizado como combustible en un motor Diesel . Este trabajo forma parte principal del proyecto :**“Diseño, construcción y pruebas de los sistemas de alimentación de biogás y de regulación de la velocidad de rotación de un motor diesel”**, el cual es un subproyecto del proyecto **“Biomasa para la generación de energía y fertilizantes a mediana escala”** el que es auspiciado por el **Instituto General de Investigación (IGI-UNI)**, y busca el uso de un recurso local y alternativo,

como lo es la biomasa, para la obtención de energía y fertilizantes con el fin de mejorar el nivel de vida en las zonas pobres de nuestro país.

En el presente trabajo se realiza el estudio del comportamiento de un motor Diesel al cual se le suministra biogás como combustible con el fin de analizar la factibilidad técnica de su uso en este tipo de motor.

En el primer Capítulo se hace el planteamiento del estudio y se exponen sus antecedentes y la importancia que este tiene para la sociedad.

En el Capítulo II se explica cómo se obtiene el biogás y como influyen sus propiedades en el funcionamiento de un motor Diesel.

En el Capítulo III se detallan las modificaciones necesarias para el funcionamiento de un motor Diesel que usará biogás como combustible.

En el cuarto Capítulo se describen el banco de pruebas, la instrumentación y el motor utilizado en el estudio experimental. Además, se indican las fórmulas empleadas con los errores existentes propios del estudio experimental.

En el Capítulo V se realiza la presentación y análisis de los resultados del trabajo experimental.

Las conclusiones del trabajo realizado así como las recomendaciones referentes al mismo se dan en el último Capítulo.

La intención del presente trabajo ha sido mostrar la posibilidad de usar un combustible alternativo renovable y que es posible encontrar soluciones a problemas energéticos locales haciendo un uso adecuado de los recursos propios.

La secuencia y estructura del presente trabajo han sido realizadas con la intención de que lo expuesto sea de fácil entendimiento, sin olvidar la rigurosidad que requiere un trabajo experimental. Se espera además que este

trabajo sirva de incentivo para la realización de otros que busquen soluciones a los problemas sociales de nuestro entorno.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al **Ing. Alfredo Oliveros Donohue**, por incentivar me a desarrollar el presente trabajo, al **Dr. Johnny Nahui Ortiz**, Director del proyecto realizado y al **Dr. Guillermo Lira Cacho**, asesor de mi tesis, por su apoyo constante e incondicional.



## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Objetivos del trabajo

El desarrollo del presente trabajo se realizó con los siguientes objetivos:

- **Objetivo general:**
  - Analizar la factibilidad técnica de generar energía mecánica utilizando biogás en un motor Diesel.
- **Objetivos específicos:**
  - Diseñar, construir y probar el sistema de alimentación de biogás de un motor Diesel.
  - Establecer un sistema de regulación de la velocidad de rotación del motor al utilizar el combustible dual diesel-biogás.
  - Analizar los parámetros característicos del motor, en diferentes regímenes de funcionamiento, al utilizar el combustible dual.

## **1.2 Planteamiento del estudio**

El presente estudio contempla en su desarrollo el diseño, construcción y pruebas del sistema de alimentación de biogás, el cual conjuntamente con un cierto porcentaje de petróleo D2, denominado inyección piloto, garanticen un trabajo óptimo y fiable de un motor petrolero.

Las pruebas serán realizadas en un motor petrolero Lister de dos cilindros, de cuatro tiempos, refrigerado por aire del Instituto de Motores de Combustión Interna (IMCI) de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) y en la caseta de ensayos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI (UNITRAR).

En el banco de pruebas se implementará al motor de los sistemas de medición de la potencia generada, del flujo de combustible y del flujo de aire de alimentación, para realizar las pruebas con el motor usando como único combustible petróleo Diesel D2, con la intención de comprobar un funcionamiento aceptable del motor a utilizar y de establecer la potencia eléctrica máxima a generar considerando los límites de opacidad y de golpeteo respectivos. Estando aun el motor en dicho banco se diseñará e implementará también el sistema de alimentación de biogás, después de lo cual el motor será llevado a la caseta de UNITRAR.

En la planta UNITRAR se realizarán las pruebas con el motor usando como combustible el biogás que se obtiene del biodigestor de la planta y además se suministrará una cantidad de petróleo Diesel D-2 denominada inyección "piloto".

Luego de obtener los resultados de todas las pruebas se podrá ver la factibilidad técnica del uso de biogás, como combustible, en motores petroleros y se obtendrán, entonces, todas las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

### **1.3 Antecedentes**

Los antecedentes de la investigación respecto al uso de biogás en motores Diesel se pueden dividir en los antecedentes de los trabajos realizados en Perú y en los de aquellos realizados en otros países.

**1.3.1 Antecedentes en el Perú.** Respecto al tema del uso de biogás en motores petroleros no se ha encontrado información técnica de trabajos realizados en nuestro país, siendo, entonces, el presente el primero a ser difundido para su uso adecuado en nuestra sociedad.

El presente estudio forma parte del proyecto “Diseño, construcción y pruebas de los sistemas de alimentación de biogás y de regulación de la velocidad de rotación de un motor Diesel”, auspiciado y apoyado económicamente por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica (INIFIM) y, además, conjuntamente con otro proyecto ya desarrollado: “Diseño, construcción y pruebas del sistema de suministro de biogás para un motor de combustión interna” forman parte del proyecto de investigación multidisciplinario “Energía y Fertilizantes a Mediana Escala a partir de la Biomasa”, el cual se está

desarrollando con el auspicio del Instituto General de Investigación (IGI-UNI) .

Dicho proyecto tiene como antecesor a otro proyecto multidisciplinario llamado “Biogás para la Generación de Energía”, el cual también fue auspiciado por el IGI. El antecedente común de dichos proyectos es el proyecto de investigación:”Uso de Biogás en Motores”, el cual tuvo al INIFIM como auspiciador.

El proyecto “**Uso de Biogás en Motores**” se desarrolló desde mayo de 1998 hasta Junio del 2000 en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UNI, teniendo como objetivo principal el uso del biogás en motores de combustión interna, y como objetivo específico la caracterización de motores de encendido por chispa, estacionarios, comerciales y de baja potencia, usando como combustible al biogás.

El proyecto multidisciplinario “**Biogás para la generación de energía**” se ejecutó en la UNI desde julio del 2000 al junio del 2002, y en el intervinieron el IGI, el Centro de Energías Renovables (CER-UNI) y las facultades de Ingeniería Mecánica (FIM), Ingeniería Química y Manufacturera (FIQM) e Ingeniería Ambiental (FIA). La investigación efectuada en el proyecto “Uso de biogás en motores” fue continuada en este proyecto, además se ampliaron los objetivos iniciales, trabajando también en la generación de energía mecánica, térmica y eléctrica. La investigación en dicho proyecto fue dividido en la investigación del proceso de obtención del biogás y la investigación de la utilización del biogás, por lo cual dicho proyecto fue dividido en los siguientes subproyectos: “Optimización del diseño del carburador para biogás”, “Arranque automático del

motor”, “Modelación matemática del motor trabajando con biogás” y “Utilización térmica del biogás”.

En agosto del 2002 se dio inicio a un nuevo proyecto multidisciplinario denominado “**Energía y fertilizantes a mediana escala**” el cual es desarrollado por el IGI y por las facultades que participaron en el proyecto anterior, y tiene como objetivos generales: generar tecnología para procesar la biomasa de origen tanto urbano como rural a nivel de planta piloto para producir energía y fertilizantes, estudiar la complementación con la energía eólica y difundir la tecnología del biogás.

Los objetivos específicos son desarrollar biodigestores modulares de 30 m<sup>3</sup> de capacidad, desarrollar los procesos para generar gas metano, CO<sub>2</sub>, bioabono y biol a nivel de planta piloto, desarrollar los sistemas de generación de energía eléctrica hasta 15 kW de potencia, difundir la tecnología generada en los dos primeros proyectos relacionados al biogás y desarrollados en la UNI, desarrollar un aerogenerador de bajo costo.

**1.3.2 Antecedentes en otros países.** A continuación se muestra la información, respecto al tema, de los trabajos encontrados en otros países:

**En India:** En este país se encontró información de los motores denominados Kirloskar Diesel Gas engines cuyos datos son los siguientes [8]:

**Tipo de motor:** Motor de inyección directa de cuatro tiempos.

**Tipo de modificación:** Adición de simple mezclador controlado manualmente y montado directamente al múltiple de admisión. Por motivo de no considerarse otra modificación, el motor permanece utilizando petróleo, con la opción de utilizar biogás por hasta el 80% de su requerimiento de combustible.

**Tipo de control:** El mecanismo de control para el funcionamiento con combustible Diesel es mantenido completamente. El biogás es controlado manualmente mediante una válvula en el ingreso de biogás al mezclador. Se logra un control aceptable de la potencia y velocidad estableciendo la velocidad requerida con la palanca del gobernador y abriendo la válvula de biogás para la cantidad de biogás permisible hacia el mezclador. Si es que el operador no puede obtener, manualmente, una regulación fina ésta puede ser realizada por variaciones en la cantidad de combustible Diesel a través del regulador original.

Incluido en estos motores se encuentra uno del tipo denominado TV 1 G, cuyas especificaciones son:

- |   |               |
|---|---------------|
| ▪ Diámetro del pistón   | 87,5 mm       |
| ▪ Longitud de desplazamiento:   | 110 mm        |
| ▪ Velocidad máxima :  | 2000 RPM      |
| ▪ Velocidad mínima de operación:  | 1200 RPM      |
| ▪ Sistema de enfriamiento:  | Con agua      |
| ▪ BHP (a 2000 RPM)  | 8,7           |
| ▪ Consumo específico de combustible funcionando sólo con petróleo Diesel: | 176 g/(bhp*h) |
| ▪ Consumo específico de petróleo Diesel funcionando                       |               |

con el sistema dual Diesel-biogás : 30 g/(bhp\*h)

- Requerimiento de biogás para el sistema dual:  
0,425m<sup>3</sup>/(bhp\*h)
- Datos del biogás:
  - Contenido de metano: 60% (vol)
  - Presión: 100 mbar (650 mbar)
  - Contenido de H<sub>2</sub>S: No hay valores registrados sin embargo, no debe exceder del 0,25 % en volumen.

**En China:** La compañía Shanghai Bioenergy Engineering Co. produce un motor ciclo Otto de biogás obtenido a partir de la modificación de un motor Diesel mono-cilíndrico[8]. La información referente a estos motores es la siguiente:

**Tipo de motor:** Cuatro tiempos, monocilíndrico de ciclo Otto

**Tipo de modificación:** Motor Diesel monocilíndrico modificado y equipado con un mezclador tipo venturi, un sistema de encendido por chispa, y un alternador.

**Tipo de control:** No hay información disponible, pero obviamente debe disponerse de un regulador mecánico para trabajar con un generador a velocidad constante.

Uno de estos motores es el de modelo S 195 DZ cuyas especificaciones son:

- Tipo: De cuatro tiempos, horizontal y enfriado por agua
- Número de cilindros: Uno

- Volumen de desplazamiento: 0,82 cm<sup>3</sup>
- Velocidad: 2000 RPM
- Potencia: 6kW (aprox.)
- Especificaciones del biogás:
  - Contenido mínimo de metano: 70% (vol.)
  - Contenido máximo de hidrógeno: 5% (vol.)
- Generador eléctrico acoplado:

Potencia eléctrica: 5kW

Voltaje: 220/380V

Frecuencia: 50Hz

**En Alemania:** Información acerca de motores que usen biogás en este país fue obtenida de las compañías G.A.S./Henkelhausen-Deutz y Deutz MWM [8].

**G.A.S./Henkelhausen-Deutz.** Esta compañía alemana se especializa en la conversión de motores Diesel “Deutz” estándares a motores a gas de ciclo Otto para gas natural y biogás. Sus motores refrigerados por aire tienen entre 15kW y 144kW de potencia nominal. Las potencias de los motores que son refrigerados por agua, respecto a los cuales no se encontró más información, están entre 122kW y 500kW.

Los motores a gas refrigerados por aire obtenidos de la compañía son de cuatro tiempos y tienen las siguientes características respecto a su obtención:

Se mantienen el bloque de cilindros, el eje del cigüeñal y los sistemas de enfriamiento y lubricación del motor en su versión Diesel.



- Se montan pistones para baja relación de compresión (11,5/1) y culatas provistas de bujías en lugar de las partes originales de la versión Diesel.
- Además, se colocan un sistema de encendido con distribuidor que reemplaza a la bomba de inyección y un alternador de 24 V con baterías.
- Se acopla un mezclador de aire-biogás con una válvula mariposa (para el control) al múltiple de aire de admisión.
- Se adicionan un sistema de control de ingreso de gas con filtro, una válvula solenoide, una válvula de regulación de presión constante y un manómetro para medir la presión de succión del gas .
- Se acopla un tanque grande de aceite de lubricación para extender los tiempos de cambio de aceite.

Tipo de control.- De acuerdo a la futura operación, la compañía ofrece dos tipos de control:

- Control mecánico, usando el gobernador original de la bomba de inyección del motor Diesel. El movimiento del sistema de regulación original es transmitido a la válvula mariposa del sistema de mezcla de aire y biogás. La variación de velocidad es aproximadamente el 5 a 8% de la velocidad establecida con la palanca del gobernador de velocidades.
- Control electrónico, usando un sensor magnético para conocer la velocidad de rotación del motor . La señal de pulso de velocidad es transmitido a la caja de control electrónico donde las velocidades real y deseada son comparadas. El pulso de corrección es dado al actuador el cual a través de un eslabón abre o cierra la válvula mariposa. La variación de velocidad con este sistema de control es menos del 1%, es decir, mejor que con el sistema de control mecánico. Este

sistema de control es fabricado por la compañía Barber Colman de los Estados Unidos.

Parte del sistema son los dispositivos de seguridad como el de corte en embalamiento, en baja presión de aceite, en baja presión de gas y en alta temperatura.

Las especificaciones del motor de código F 4 L 912, de cuatro cilindros y de aspiración natural, ofrecido por esta compañía, así como del biogás son dados a continuación:

-Potencia nominal para operación continua (10% de sobrecarga, a 27°C y 100m sobre el nivel del mar, y con 60% de humedad relativa)	28kW
-Velocidad	1500rpm
-Número de cilindros	4
-Disposición de cilindros	en línea
-Diámetro/ Desplazamiento	100/120 mm
-Velocidad media del pistón	6 m/s
-Consumo de combustible en carga total	
De gas natural	8,8 m <sup>3</sup> /h
De biogás	12,6 m <sup>3</sup> /h
-Presión del gas	13 a 30 mbar
-Consumo de aceite	60 g/h
-Capacidad de aceite	10 litros
-Temperatura de los gases de escape	460°C
-Requerimiento de aire de refrigeración	1810 m <sup>3</sup> /h

- Requerimiento de aire de combustión(20°C) 133 m<sup>3</sup>/h

-Dimensiones del motor:

Largo	813 mm
Ancho	661 mm
Alto	803 mm
Peso	300 kg

**Deutz MWM.** Esta compañía ofrece motores basados en el ciclo Otto ,que utilizan un combustible gaseoso, además motores que utilizan un sistema dual (Diesel-gas), estos motores tienen potencias entre 20 kW y 3000 kW, y se obtienen a partir de motores Diesel estacionarios. La modificación de los motores es realizada básicamente como se describió en el caso anterior, así como también el tipo de control utilizado, el cual es electrónico. A continuación se muestran las especificaciones de algunos de los motores y del biogás utilizado.

Especificaciones de los motores:

Modelos	G 227-3	G 227-4	G 227-6	G 232 V6	G 232 V8
Tipos	Motores de ciclo Otto a gas y enfriados por agua				
Números de cilindros	3	4	6	6	8
Vol. de desplazamiento(l)	2,83	3,77	5,65	8,8	11,8
Relación de compresión	11,6:1 (para todos los modelos)				
Velocidad (rpm)	1500/1800 (para todos los modelos)				
Potencia (P <sub>eléctrica</sub> , en kW)	18 a 21	24 a 28	36 a 43	65 a 77	87 a

Especificaciones del biogás:

Contenido mínimo de metano	65% (en volumen)
Contenido máximo de H <sub>2</sub> S	0,1% (en volumen)

**En Colombia:** De este país se obtuvo información acerca de un trabajo realizado para la generación de energía eléctrica utilizando biogás, llevado a cabo por la organización CIPAV en la granja Pozo Verde localizada en el departamento del Valle del Cauca [17]. Dos motores diesel con sus respectivos generadores fueron adaptados para funcionar utilizando petróleo Diesel y biogás como combustibles. Las características de los principales elementos utilizados se muestran a continuación.

Motores generadores: Se utilizaron dos motores Diesel.

- Motor Blackstone de 3 pistones y 100 kW (135 HP) de potencia nominal a 600 rpm acoplado a un generador eléctrico de 92 kW.
- Motor Perkins de 6 pistones y 74 kW (100 HP) de potencia nominal a 1800rpm acoplado a un generador eléctrico de 63 kW.

Biodigestores: Se utilizaron dos biodigestores plásticos de 1,25 metros de diámetro, siendo la capacidad total de 48 m<sup>3</sup>

Filtro de sulfuro de hidrógeno: Se utilizó un tubo de PVC de 6 pulgadas de diámetro y 2 metros de altura el cual fue llenado en sus dos terceras partes con

limaduras de hierro y el tercio restante con esponjilla de hierro utilizada para limpieza doméstica.

Los resultados obtenidos muestran un nivel de sustitución de petróleo Diesel por biogás de 47% para el motor Blackstone y de 67% para el motor Perkins.

Consumo de petróleo Diesel (litros/kW.h)			
<u>Motor Perkins</u>		<u>Motor Blackstone</u>	
Sólo Diesel	Biogás-Diesel	Sólo Diesel	Biogás-Diesel
0,285	0,094	0,380	0,200

#### **1.4 Importancia del tema**

En primer lugar, el tema desarrollado en el presente trabajo es importante por ser parte principal del proyecto “Diseño, construcción y pruebas de los sistemas de alimentación de biogás y de regulación de la velocidad de rotación de un motor Diesel”, cuyos objetivos están comprometidos con la situación energética de nuestro país.

Este tema es importante, en segundo lugar, porque analiza la factibilidad técnica del uso del biogás, como alternativa real de obtención de energía en forma sostenible, en reemplazo de un porcentaje de petróleo, el cual es muchas veces inaccesible, por condiciones geográficas y/o económicas, para diversas zonas rurales de nuestro país.

En tercer lugar, por el tipo de regulación establecido para el presente trabajo, se podrá analizar la factibilidad del uso del regulador original del motor Diesel

para el funcionamiento de dicho motor con el sistema dual Diesel-biogás , con lo cual se tendría un menor costo en la adaptación del motor petrolero para el uso de biogás como combustible.

Además, se debe tener en consideración que el desarrollo del tema elegido brindará, por intermedio de los resultados obtenidos en la práctica, información del comportamiento de un motor Diesel usando el sistema dual Diesel-biogás, respecto al cual no hay información en nuestro medio.

### **1.5 Limitaciones**

En el desarrollo del presente trabajo se presentan las siguientes limitaciones:

1. No se regula la cantidad de biogás que ingresa al motor en función de la carga.
2. No se mide con precisión la detonación por no utilizar el sensor respectivo.
3. No se mide la eficiencia efectiva del motor sino del grupo electrógeno.
4. No se mide la concentración de  $H_2S$ , HC,  $NO_x$ , CO, etc.
5. No se mide constantemente la concentración de  $CH_4$  y del CO en el biogás.
6. No se obtiene el diagrama indicado abierto (presión en función del ángulo de giro del cigüeñal del motor).

## **EL BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

### **2.1 Obtención del biogás (resumen)**

El biogás, también denominado gas de los pantanos, es un combustible gaseoso que se produce por la fermentación anaeróbica (biodegradación anaeróbica) de compuestos orgánicos (biomasa). El proceso de fermentación se puede dar de forma natural ,como, por ejemplo, en los pantanos o rellenos sanitarios, o de forma controlada como en los biodigestores.

Los principales componentes del biogás son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); además contiene pequeños porcentajes de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), entre otros.

#### **- Propiedades físico-químicas de la fermentación del biogás**

Para que se lleve acabo un adecuado proceso de fermentación anaeróbica, se debe considerar como importantes a los siguientes parámetros: La temperatura, la acidez

o alcalinidad, las proporciones sólido-líquido y de carbono –nitrógeno del material orgánico empleado, y el tiempo de retención del material.

**a Temperatura:** Este parámetro influye en la velocidad de producción de biogás, ya que dependiendo de la temperatura a que se desarrolle el proceso de digestión intervienen unas especies bacterianas u otras, variando la velocidad del proceso y el porcentaje de metano presente en el biogás. De acuerdo a la temperatura existen tres rangos de trabajo:

- Psicrofilico, con máximo rendimiento a los 25°C.
- Mesofilico, con rendimiento mayor al anterior sobre los 35°C.
- Termofilico, con mayor rendimiento que los anteriores sobre los 60°C.

**b Acidez:** El rango óptimo de ph en un digestor en general es de 7 a 7,5 ,el cual es un intervalo de máxima actividad metabólica de las bacterias metanogénicas.

**c Proporción sólido-líquido:** Los porcentajes en peso de sólidos secos totales recomendados son de 6% a 10% (alta dilución) para sistemas continuos y de 25% a 35% para sistemas discontinuos.

**d Proporción carbono-nitrógeno:** Tanto el carbono como el nitrógeno son necesarios para el crecimiento y reproducción de las bacterias presentes en la fermentación anaeróbica. Si la materia a fermentar tiene demasiado carbón el proceso respectivo se hace más lento y aumenta la acidez; en el caso de un exceso de nitrógeno se eleva el ph y se reduce el poder fertilizante y nutriente de los lodos efluentes. el valor recomendado de la relación carbono-nitrógeno esta entre 25 y 30 y se logrará combinando materiales ricos y pobres en nitrógenos.



**e Tiempo de retención:** Es el tiempo necesario para que se lleve a cabo una digestión óptima de los materiales suministrados al biodigestor y es función del material a fermentar y de las condiciones ambientales.

## 2.2 Propiedades físico químicas del biogás

Las principales propiedades físico químicas del biogás con dos diferentes porcentajes de metano y a condiciones estándares (101,3 kPa y 273 K), son mostradas en la tabla 2.1 . Con fines comparativos se muestran además propiedades promedio del petróleo Diesel .

**Tabla 2.1: Principales propiedades del biogás [6],[9],[13]**

Propiedad	Biogás		Petróleo
	60% de CH <sub>4</sub>	80% de CH <sub>4</sub>	Diesel 2
Poder calorífico inferior, MJ/m <sup>3</sup>	21,6	28,8	35**
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	1,22	0,96	820-850
Relación estequiométrica aire combustible, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	5,71	7,57	
Relación estequiométrica aire combustible, kg/kg	6,1	10,2	14,3
Poder calorífico por unidad de volumen de Mezcla estequiométrica , MJ/m <sup>3</sup>	3,23	3,36	2,3**
Número de octano (método research)	130*	---	---

\*Con 70% de CH<sub>4</sub>    \*\*En MJ/l

## 2.3 Análisis de propiedades y características referentes al biogás

### 2.3.1 Composición del biogás: La composición del biogás varía

fundamentalmente, primero, por la naturaleza de la porción biodegradable de la materia de fermentación y, segundo, por los parámetros físico-químicos de la fermentación anaeróbica; y oscila entre los valores mostrados en la siguiente tabla:

***Tabla 2.2: Composición volumétrica de biogás[7]***

<b>BIOGAS</b>	
CH <sub>4</sub>	50-70%
CO <sub>2</sub>	30-40%
H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y otros,	<5%

### 2.3.2 Densidad del biogás: La densidad del biogás depende de sus

constituyentes y de sus respectivas concentraciones, y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\rho_{\text{bio}} = \frac{P_{\text{bio}}}{R_{\text{bio}} \cdot T_{\text{bio}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Siendo:

$P_{\text{bio}}$ : Presión absoluta del biogás [kPa]

$T_{\text{bio}}$ : Temperatura del biogás [K]

$R_{\text{bio}}$ : Constante particular del biogás que se puede calcular con bastante aproximación, sin considerar los componentes en menor porcentaje, con las siguientes expresiones:

$$R_{\text{bio}} = f_{\text{mCH}_4} \cdot R_{\text{CH}_4} + f_{\text{mCO}_2} \cdot R_{\text{CO}_2}$$

$$f_{\text{mCH}_4} = \frac{\% \text{CH}_4 \cdot M_{\text{CH}_4}}{M_{\text{T}}} \quad f_{\text{mCO}_2} = \frac{\% \text{CO}_2 \cdot M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{T}}}$$

$$M_{\text{T}} = \% \text{CH}_4 \cdot M_{\text{CH}_4} + \% \text{CO}_2 \cdot M_{\text{CO}_2}$$

Siendo :

$f_{\text{mCH}_4}$  y  $f_{\text{mCO}_2}$  : Fracciones másicas del metano y del dióxido de carbono, respectivamente.

$\% \text{CH}_4$  y  $\% \text{CO}_2$  : Porcentajes en volumen del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$  , respectivamente.

$R_{\text{CH}_4}$  y  $R_{\text{CO}_2}$  : Constantes particulares del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$  , respectivamente.

$M_{\text{CH}_4}$  y  $M_{\text{CO}_2}$  : Pesos moleculares del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$  , respectivamente.

$$R_{\text{CH}_4} = 0,51835 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$R_{\text{CO}_2} = 0,18892 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$M_{\text{CH}_4} = 16,04$$

$$M_{\text{CO}_2} = 44,01$$

**2.3.3 Poder calorífico:** El poder calorífico inferior del biogás se puede calcular aproximadamente utilizando la fórmula empírica de Mendeleiev [9], con la cual se puede calcular el poder calorífico inferior de un combustible gaseoso conociendo su composición volumétrica.

$$H_u = (35,8.\%CH_4 + 12,8.\%CO + 10,8.\%H_2 + 56.\%C_2H_2 + 59,5.\%C_2H_4 + 63,4.\%C_2H_6 + 91.\%C_3H_8 + 120.\%C_4H_{10} + 144.\%C_5H_{12}).10^3 \quad [kJ/m^3]$$

Siendo:

$\%CH_4$  ,  $\%CO$ ,  $\%H_2$ ,  $\%C_2H_2$ ,  $\%C_2H_4$ ,

$\%C_2H_6$ ,  $\%C_3H_8$ ,  $\%C_4H_{10}$  y  $\%C_5H_{12}$  : Porcentajes en volumen de los

componentes de la mezcla gaseosa.

Entonces, para el biogás

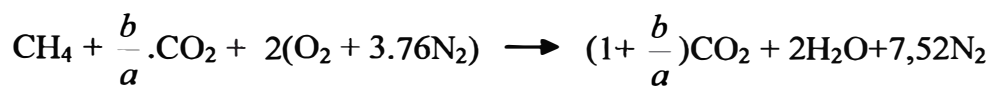
$$H_{u_{\text{biogás}}} = 35,8. \%CH_4$$

Lo cual se puede verificar con bastante aproximación con la tabla 2.3 obtenida de otra fuente [6].

***Tabla 2.3: Poder calorífico inferior de algunos combustibles.***

<b>Combustible</b>	<b>Poder Calorífico Inferior</b>	
	<b>(MJ/kg)</b>	<b>(MJ/m<sup>3</sup>)</b>
Metano	50,0	35,9
Biogás con 90% de CH <sub>4</sub>	45,0	32,3
Biogás con 60% de CH <sub>4</sub>	30,0	21,5
Butano	45,7	118,5
Propano	46,4	90,9
Metanol	19,9	15,9*10 <sup>3</sup>
Etanol	26,9	21,4*10 <sup>3</sup>
Gasolina	45,0	33,3*10 <sup>3</sup>
Diesel	42,1	34,5*10 <sup>3</sup>

**2.3.4 Relación aire-combustible teórica :** La relación aire-combustible teórica o estequiométrica es la cantidad mínima de aire que se necesita suministrar a un determinado combustible para su completa oxidación. La relación aire-combustible teórica del biogás se puede obtener de la ecuación básica de su combustión sin considerar los componentes de bajo porcentaje.



Siendo a y b los porcentajes en volumen del metano y del dióxido de carbono en el biogás, de lo cual se pueden obtener los valores mostrados en la siguiente tabla:

***Tabla 2.4: Relaciones aire-combustible teóricas del metano y del biogás[6].***

Combustible	Relación aire-combustible teórica (m <sup>3</sup> de aire / m <sup>3</sup> de gas)
Metano	9,52
Biogás con 60% de CH <sub>4</sub>	5,71
Biogás con 90% de CH <sub>4</sub>	8,57

**2.3.5 Coeficiente de exceso de aire :** Debido a que las mezclas aire-combustible no son homogéneas las cantidades de aire usadas realmente tienen que ser mayores a las estequiométricas para evitar porciones de combustible no

quemadas. El coeficiente de exceso de aire es la razón entre la relación aire-combustible real y la relación estequiométrica, ambas expresadas en base masa.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{real}}{l_0}$$

Siendo:

$\alpha$  : Coeficiente de exceso de aire

$m_c$  : Masa de combustible en la combustión

$m_a$  : Masa de aire en la combustión

$l_0$  : Relación estequiométrica

Si  $\alpha$  es menor que 1 la mezcla es denominada rica; y si es mayor que 1 la mezcla es denominada pobre.

**2.3.6 Temperatura mínima de autoencendido :** La temperatura mínima de autoencendido (TMAE) de una mezcla aire combustible es un parámetro útil como límite de seguridad y como parámetro de funcionamiento para los motores de combustión interna. Esta es una propiedad cuyo valor no depende solamente del combustible, sino también de la relación aire-combustible, de la presión y de los dispositivos de medición. En el caso de mezclas aire-metano la TMAE llega a un mínimo valor con aproximadamente el 7% de metano (en volumen) en la mezcla [6]. La TMAE del metano ,componente

principal del biogás, es la más alta de los combustibles comunes y se incrementa en presencia de dióxido de carbono. El autoencendido se da con un cierto retraso y depende de la presión y temperatura inicial. En la tabla 2.5 se muestran las temperaturas mínimas de autoencendido del metano en superficies calientes a una atmósfera.

***Tabla 2.5: Temperaturas mínimas de autoencendido del metano en aire determinadas experimentalmente[6].***

TMAE (°C)	Recipiente de encendido	Referencia
606-650	Cilindrico de vidrio de 0,24 dm <sup>3</sup>	Freyer and Meyer (1893)
675	Cilindrico de vidrio de 0,275 dm <sup>3</sup>	Taffenel and LeFloch (1913)
632	Cilindrico de cuarzo de 0,44 dm <sup>3</sup>	Naylor and Wheeler (1931)
656	Tubo de cerámica de volumen no conocido	Dixon (1934)
748	Tubo de acero de 10mm de diámetro y 165mm de longitud	Bunte and Bloch (1935)
673	Cilindrico de sílice de 0,19 dm <sup>3</sup>	Townend and Chamberlain (1936)
659	Esférico de acero inoxidable de 0,2 dm <sup>3</sup>	Fenstermarker (1982)
601	Esférico de acero inoxidable de 0,8 dm <sup>3</sup>	Robinson and Smith (1984)



**2.3.7 Velocidad Normal de llama o velocidad de combustión laminar :** Es la velocidad de desplazamiento del frente de combustión laminar, con respecto a la mezcla fresca y con dirección perpendicular a su superficie.

Esta velocidad depende de varios factores entre los que se encuentra principalmente la naturaleza del combustible. En la tabla 2.6 se muestran varios valores de velocidades medias para mezclas aire-combustible estequiométricas, a una atmósfera de presión y 25 °C.

***Tabla 2.6: Velocidades normal de llama para el metano y otros combustibles[6].***

<b>Combustible</b>	<b>Velocidad (cm / s)</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	43,4
Acido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	39,1
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	45,6
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	44,8
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	170
Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	48,4
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	48
Gasolina	40

Los valores obtenidos de esta velocidad difieren uno de otro de acuerdo al método experimental utilizado para la medición respectiva. En la siguiente tabla se muestran diferentes valores obtenidos para mezclas aire-metano a una atmósfera de presión y 25°C.

***Tabla 2.7: Valores de la velocidad normal de llama para una mezcla estequiométrica aire-metano[6].***

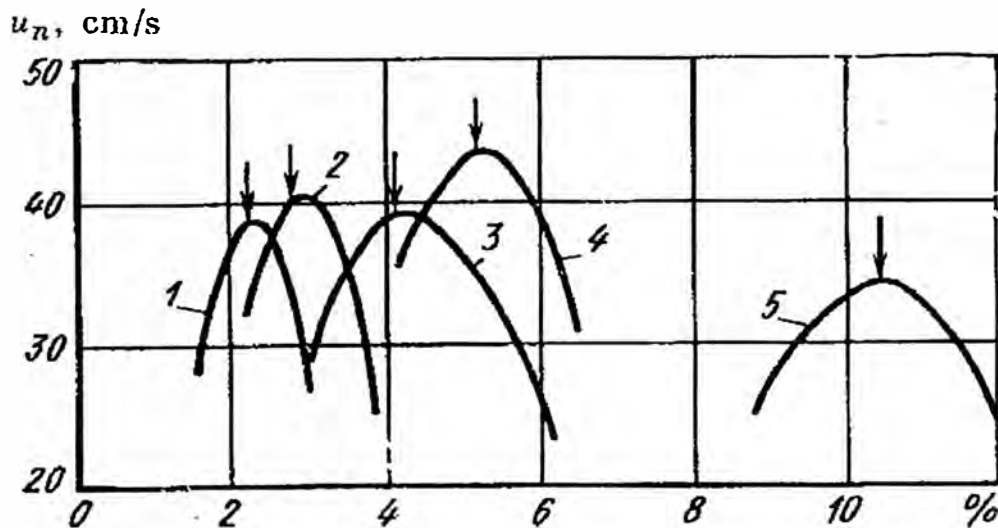
<b>Método de combustión</b>	<b>Velocidad (cm/s)</b>
Quemador rectangular	35
Quemador cilíndrico	44
Quemador Bunsen	35 a 34
Bomba esférica	36

La velocidad normal de llama varía también en función de la temperatura inicial de la mezcla carburante y de la presión. Al aumentar la temperatura inicial de la mezcla aumentan las velocidades y se amplían en algo los límites de concentración, debido al aumento de las velocidades de reacción y de los coeficientes de conductividad de temperatura de la mezcla, los que a su vez se vinculan con las temperaturas más elevadas de la mezcla. La velocidad normal de llama disminuye al elevarse la presión, esto se debe

a que las velocidades relativas de los procesos de difusión y transmisión de calor disminuyen ante un aumento de la presión[6],[9].

Debido a una dilución de la mezcla carburante inicial con un gas inerte como el nitrógeno ( $N_2$ ) o el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) la velocidad normal de llama disminuye notoriamente. En el caso del metano ( $CH_4$ ) esta velocidad decrece hasta un promedio de 25 cm/s para un biogas promedio compuesto de 60% de metano y 40% de dióxido de carbono[6].

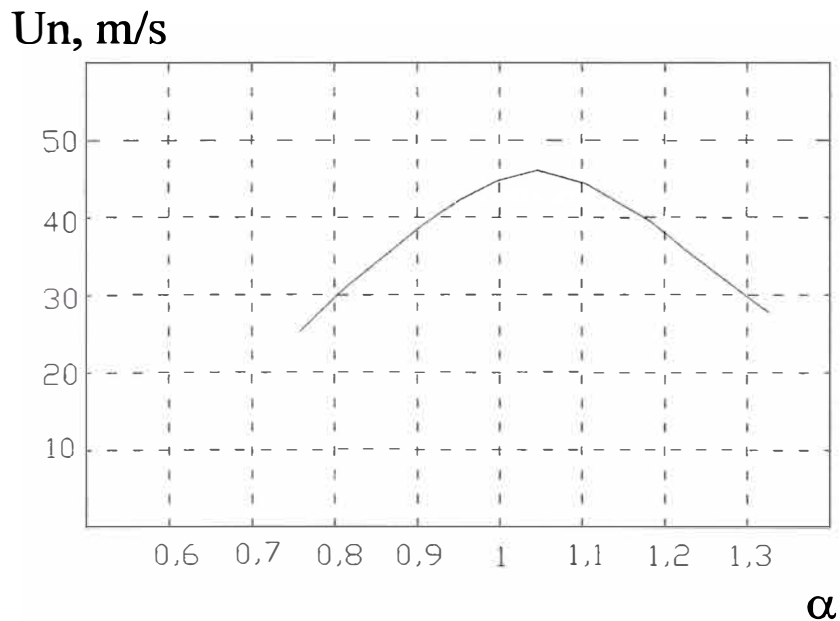
La velocidad normal de llama tiene máximos valores para los combustibles provenientes de hidrocarburos en mezclas algo enriquecidas ( $\phi=0,85-0,9$ ); y si estas mezclas se empobrecen o enriquecen más, las velocidades de combustión laminar disminuyen tal como se puede observar en la figura 2.1[9].



**Figura 2.1:** Variación de la velocidad normal de llama ( $u_n$ ) en función de la Composición de la mezcla para una serie de hidrocarburos individuales a 0,1 MPa y 20°C.

En el gráfico anterior las correspondencias son : 1—N-hexano; 2— benceno; 3—propano; 4—propeno; 5—metano; y los puntos en los que  $\alpha=1$  se indican con flechas.

El límite de máximo empobrecimiento de la mezcla debajo del cual la propagación de la llama no se da se denomina límite de concentración inferior  $\phi_{\text{máx}}$  ; y al límite de enriquecimiento máximo límite de concentración superior  $\phi_{\text{mín}}$ . En la figura 2.2 se observa la variación de la velocidad normal del frente de llama para una mezcla aire-metano en función del coeficiente de exceso de aire, medido a 25°C y una atmósfera[6].



**Figura 2.2:** Variación de la velocidad normal de llama con el coeficiente de exceso de aire en la combustión del metano

**2.3.8 Límites de inflamabilidad :** La velocidad del frente de llama decrece desde su máximo valor conforme la mezcla aire-combustible tiende a ser pobre y llega a ser igual a cero con un porcentaje de combustible en la mezcla al cual se le denomina límite inferior de inflamabilidad. La misma disminución en la velocidad del frente de llama se observa cuando la mezcla se enriquece, y llega a ser cero para un porcentaje de combustible denominado límite superior de inflamabilidad . Los límites de inflamabilidad son establecidos por composiciones de mezclas determinadas experimentalmente

La usual determinación del límite consiste en una observación visual de la propagación de llama en un tubo largo de diámetro apropiado. En unas pruebas realizadas, este diámetro es estandarizado (para una presión atmosférica de la mezcla de prueba ) a 5 cm, ya que según investigaciones previas un incremento del diámetro por encima de los 5 cm raramente se muestra incrementos más de 0,1 % del rango de inflamabilidad. Los datos compilados por autores de libros que tratan este tema agrupan observaciones hechas por numerosos experimentadores en un gran número de sistemas combustible-aire, usando tubos de varios diámetros y longitudes, dispuestos verticalmente u horizontalmente y siendo la fuente de encendido una chispa o una pequeña llama auxiliar. Los datos son dados en términos de los límites inferior o superior de inflamabilidad tal como se muestra en la tabla 2.6.

***Tabla 2.6: Límites de inflamabilidad de hidrocarburos para propagación ascendente y descendente[15]***

<b>Mezcla</b>	<b>Propagación</b>	<b>Límites de Inflamabilidad</b>	
		<b>Porcentaje volumétrico de combustible</b>	
		<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
Metano-aire	Ascendente	5,35	14,85
	Horizontal	5,40	13,95
	Descendente	5,95	13,35
Etano-aire	Ascendente	3,12	14,95
	Horizontal	3,15	12,85
	Descendente	3,26	10,15
Pentano-aire	Ascendente	1,42	8,00
	Horizontal	1,44	7,45
	Descendente	1,48	4,64
Benceno-aire	Ascendente	1,45	7,45
	Horizontal	1,46	6,65
	Descendente	1,48	5,55

En los ensayos, de los que se obtuvo la tabla anterior, los tubos de prueba fueron de 150 cm de largo cerrado en ambos extremos. Dichos tubos tuvieron 7,5 cm de diámetro excepto para la mezcla benceno-aire en el cual el diámetro fue de 5 cm.

**2.3.9 Características del golpeteo :** El golpeteo es causado por el autoencendido de la última parte de la mezcla gaseosa a ser consumida (“gas final”) por el frente normal de llama , este gas es comprimido a altas temperaturas y presiones debido al movimiento del pistón y a la expansión de los gases calientes que están en el frente de llama y detrás de él. Si el gas final es sujeto a condiciones severas dicha mezcla se auto encenderá espontáneamente antes de que el frente de llama tenga la oportunidad de quemarla en forma progresiva . El golpeteo audible asociado al autoencendido en los motores es producido por las ondas de presión causadas por el mismo autoencendido.

Se debe tomar en cuenta, además, que a pesar que la detonación es un fenómeno de los motores de encendido por chispa, en el ciclo Diesel gas la combustión se inicia como en el motor Diesel convencional y termina como en los motores de encendido por chispa, por lo cual se podría originar el fenómeno de la detonación y también el autoencendido prematuro , antes de que se inicie la inyección piloto.

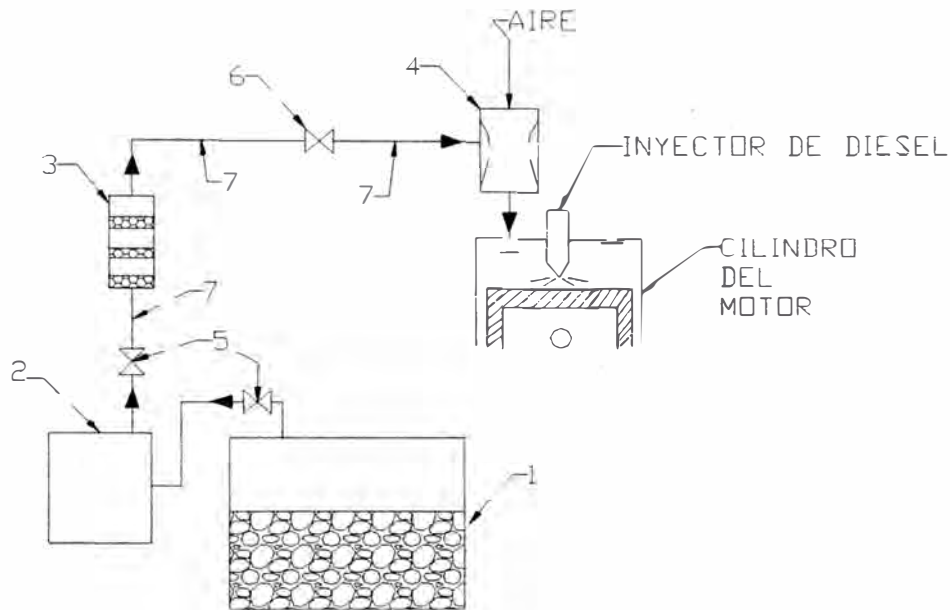
## **SISTEMA PROPUESTO DE SUMINISTRO DE BIOGÁS DE UN MOTOR DIESEL**

### **3.1 Sistema propuesto de suministro de combustible gaseoso en un motor Diesel (motor Diesel-gas)**

El sistema propuesto de suministro de combustible gaseoso en un motor diesel estacionario con sistema dual (Diesel-biogás) está conformado por los siguientes elementos (ver figura 3.1):

1. Bíodigestor
2. Almacén de biogás
3. Filtro de biogás
4. Mezclador de aire y biogás
5. Válvulas de apertura-cierre de biogás
6. Válvula de regulación del máximo flujo de biogás
7. Conductos de biogás





***Figura 3.1: Esquema del sistema propuesto de suministro de biogás en un motor Diesel***

### **3.2 Diseño del mezclador de aire y biogás y descripción de los demás componentes del sistema de suministro de biogás**

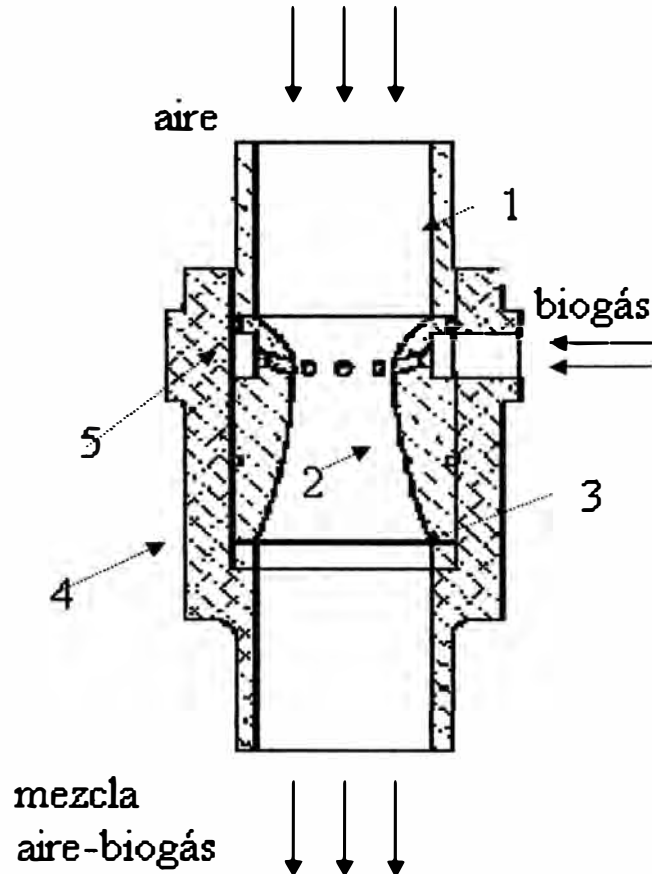
**3.2.1 Diseño del mezclador de aire y biogás :** Es uno de los elementos más importantes del sistema de suministro de biogás. En el presente trabajo se utilizó un mezclador del tipo vénturi que fue diseñado en base a modelación matemática

y está formado básicamente por dos partes : una carcasa (housing) y una tobera (vénturi) .

**La carcasa** fue diseñada para poder alojar al venturi de tal manera que quede coaxial con el tubo de entrada del múltiple de admisión del motor . La carcasa tiene además características geométricas similares a la entrada del múltiple de admisión tanto por el lado de ingreso del aire como por el de salida de la mezcla aire-biogás ,esto con el fin de poder seguir usando el filtro de aire original y de evitar pérdidas de presión por diferencia de diámetros en la conexión. El diseño del housing también brinda la posibilidad de poder probar otros venturis de diferentes dimensiones.

**El venturi** es la parte que mezcla el biogás con el aire en las proporciones adecuadas en cualquier régimen de carga del motor . Tiene el mismo principio dinámico de flujo que los carburadores convencionales, esto implica que el flujo de biogás a través de los agujeros del venturi es originado por la depresión en la garganta . El flujo de aire ingresa al motor debido a la succión provocada por la carrera descendente del pistón en el proceso de admisión, se desarrolla desde el ingreso al mezclador y se acelera al pasar por la garganta con lo que se obtiene una presión negativa (succión) en dicho punto.

El biogás ingresa al venturi en forma casi radial y se mezcla con el aire en una proporción que puede ser establecida por la válvula reguladora de biogás ( elemento 6 de la figura 3.1) .

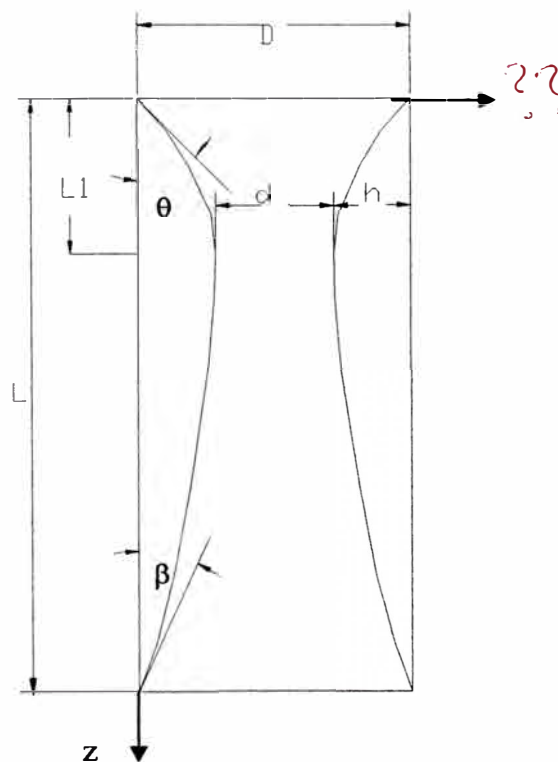


***Figura 3.2: Esquema del mezclador de aire y biogás. 1. Centrador, 2.venturi, 3. Suple, 4.Carcasa, 5.Anillo de alimentación de biogás.***

Debido a las características geométricas del múltiple de admisión del motor se tuvieron como valores predeterminados a los diámetros de ingreso y salida del mezclador. Sin embargo, fue el modelamiento matemático el que permitió obtener sus principales medidas ,tales como: el diámetro de la garganta y la longitud del venturi; con lo que se obtuvo el perfil del venturi que produzca las menores pérdidas de presión en el flujo;

además mediante la modelación se determinó el número y diámetro de los agujeros de ingreso de biogás que permitan una mezcla homogénea con un coeficiente de exceso de aire adecuado; Para obtener un mayor coeficiente de descarga de los agujeros se consideró, también, un ángulo de inclinación de los mismos respecto a la dirección radial, igual a  $20^\circ$ .

Las dimensiones principales consideradas en el diseño del mezclador son mostradas en la figura 3.3



**Figura 3.3: Dimensiones principales de la tobera**

### 3.2.1.1 Diseño del perfil del venturi:

Para la obtención del perfil del venturi del mezclador se usaron dos curvas polinómicas de tercer grado:

$$y_1 = a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3$$

$$y_2 = b_0 + b_1z + b_2z^2 + b_3z^3$$

Las cuales representan dos partes del perfil: de la entrada a la garganta y de la garganta a la salida del venturi.

Los valores numéricos de los coeficientes de los polinomios se obtienen a partir de:

- Las condiciones de contorno para los perfiles:

Para  $y_1$ :

$$\frac{dy}{dz} = \tan \alpha \quad \text{Para } z = 0$$

$$\frac{dy}{dz} = 0 \quad \text{Para } z = L_1$$

$$y = 0 \quad \text{Para } z = 0$$

$$y = h \quad \text{Para } z = L_1$$

Para  $y_2$ :

$$\frac{dy}{dz} = -\tan \beta \quad \text{Para } z = L$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dz} &= 0 && \text{Para } z = L1 \\ y &= 0 && \text{Para } z = L \\ y &= h && \text{Para } z = L1 \end{aligned}$$

- Las recomendaciones [ 5 ]

$$\frac{L_1}{L} \approx 0,2 - 0,25 \quad \frac{L_1}{h} \approx 6,5 - 7,5; \quad \alpha = 40 - 50^\circ \quad \beta = 15^\circ - 25^\circ$$

- La relación obtenida del gráfico:  $h = \frac{D-d}{2}$  ; y
- Estableciendo un valor para el diámetro de la garganta (d)

Una vez conocido el perfil y las dimensiones del venturi se pueden calcular las propiedades medias del flujo así como las velocidades y presiones puntuales.

**Cálculo de las propiedades medias.** Considerando los puntos 1 y 2 separados un dz en el eje axial y aplicando la ecuación de conservación de energía, la de un proceso de compresión adiabático, la ecuación de Darcy, la ecuación de continuidad y el diagrama de Moody se obtiene la siguiente relación:

$$C_p \bar{p} \bar{T}_1 \left[ 1 - \left( \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)} \right] - \frac{\bar{V}_1^2}{2} \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left( \frac{\bar{P}_1}{\bar{P}_2} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] - f \frac{ds}{D} \frac{V m^2}{2} = 0$$

Donde:

$C_p$  : Calor específico del aire

- $P_1$  y  $P_2$  : Presiones medias en los puntos 1 y 2 respectivamente
- $T_1$  : Temperatura media en el punto 1
- $\bar{V}_1$  : Velocidad media en el punto 1
- $V_m$  : Velocidad media en el tramo considerado
- $A_1, A_2$  : Áreas de las secciones perpendiculares al eje axial en los puntos 1 y 2 respectivamente.

De la ecuación anterior se obtiene  $\bar{P}_2$  utilizando un método iterativo por ser esta ecuación implícita en dicha variable.

Luego de calcular  $\bar{P}_2$  se obtienen los valores de  $\bar{T}_2$ ,  $\bar{V}_2$  y  $\rho_2$  utilizando las ecuaciones anteriores. El número de Reynolds en la sección 2 se calcula con la relación.

$$Re_2 = \frac{\bar{\rho}_2 \bar{V}_2 D}{\mu_2}$$

Siendo:  $\mu_2$  la viscosidad del fluido.

### Cálculo de las velocidades y presiones puntuales

**Velocidades puntuales:** Estas son conocidas al calcularse sus componentes axial ( $V_z$ ) y radial ( $V_r$ )

La velocidad axial se conoce asumiendo que el perfil de velocidades axiales sigue la ley de la potencia, y es:

$$V_z = V_{z \max} \left[ \frac{R - y - r}{\delta} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3.3)$$

Para la región entre el perfil y la capa límite; ó

$$V_z = V_z \max \quad (3.4)$$

Para la corriente interior (la no afectada por los efectos de fricción)

La velocidad radial se conoce utilizando la ley de la potencia de Prandtl y utilizando la ecuación de continuidad en coordenadas polares despreciando la variación de la densidad con la posición (z,r)

$$V_r = V_z \left( -\frac{dy}{dz} \right) \frac{r}{R-y} = V_z \tan \psi \quad (3.5)$$

Siendo:  $\psi$  la medida del ángulo que forman velocidad absoluta  $V = (V_z, V_r)$  con el eje Z.

**Presiones puntuales:** Se calculan utilizando la ecuación de conservación de energía, considerando como lineal la variación de las pérdidas de energía debido a la fricción respecto al espesor de la capa límite conociendo las propiedades en el punto 1 y la velocidad en el punto 2 (1 y 2 siguen una misma línea de corriente) se obtiene la presión en el punto 2.

$$(3.6) \quad P_2 = P_1 \left[ 1 - \left( \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} - dh_{p1-2} \right) \frac{\rho_1}{RC_p P_1} \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

**Selección del número y diámetro ( $d_g$ ) de los agujeros en la garganta del venturi del mezclador**

Esta selección debe ser realizada de tal manera que el flujo de biogás originado sea el adecuado para asegurar un buen funcionamiento del motor utilizando como



combustibles petróleo D-2 y biogás. Para esto es necesario entonces, realizar el análisis del flujo másico de biogás originado y del coeficiente de exceso de aire.

### **Flujo másico de biogás originado:**

El flujo másico de biogás se origina por la diferencia de presiones entre la presión del biogás en el anillo de alimentación ( $P_g$ ) y el vacío producido en la garganta del venturi del mezclador (contrapresión  $P_{cp}$ ) la cual es la presión media en el volumen de influencia ( $V_{cp}$ ) a la salida de cada agujero.

La contrapresión a la salida de cada agujero se calcula en consecuencia, mediante la siguiente expresión:

$$P_{cp} = \frac{1}{V_{cp}} \iiint P dv \quad (3.7)$$

Considerando el flujo de biogás a través de los agujeros como adiabático y utilizando la ecuación de conservación de la energía para un proceso FEES (flujo estable, estado estable) se obtiene aproximadamente la velocidad promedio del biogás a la salida de los agujeros.

$$V_g = \left[ \frac{2C_p g T_g \left[ 1 - r_p^{\frac{k_g}{k_g-1}} \right]}{1 - \left[ \frac{RA}{n_{aguj}} \right] r_p^{\frac{2}{k_g}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Siendo:

$C_{pg}$  : Calor específico a presión constante del biogás

$T_g$  : Temperatura del biogás ( $\approx T_0$ )

$k_g$  : Exponente adiabático del biogás

$r_p$  : Relación de presiones  $\left( r_p = \frac{P_{cp}}{P_g} \right)$

RA:  $\frac{(Areatotal\ de\ salida\ del\ biogas)}{(area\ de\ la\ entrada\ del\ anillo\ de\ alimentacion)}$

La densidad del biogás a la salida de los agujeros ( $\rho_g$ ) se calcula con la ecuación de flujo adiabático; y luego, se puede obtener el flujo másico del biogás mediante la siguiente expresión:

$$m_{gas}^0 = C_d \rho_g V_g n_{aguj} \frac{\pi d g^2}{4} \quad (3.9)$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga de los agujeros ( $C_d \approx 0,98$ )

**Coficiente de exceso de aire:** El coeficiente de exceso de aire ( $\alpha$ ) para la combustión de la mezcla bifásica petróleo Diesel- biogás se define mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{l}{l_0} = \frac{\frac{m_{aire}^0}{m_{gas}^0 + m_{D-2}^0}}{relacionestequiometrica} \quad (3.10)$$

donde:  $l$  es la relación aire-combustible real.

Para el cálculo de  $\alpha$ , previo a la construcción del venturi, se debe considerar el funcionamiento del motor a su potencia nominal y a la velocidad de rotación correspondiente. Los términos a considerar son detallados a continuación:

- Flujo de aire ( $m_{aire}^0$ ):

$$m_{aire}^0 = \frac{1}{120} \rho_0 \eta_v V_{hi} N \quad (3.11)$$

Siendo:

$\rho_0$ : Densidad del aire de ingreso al motor, en  $\text{kg/m}^3$

$\eta_v$ : Eficiencia volumétrica del motor

$V_{hi}$ : Cilindrada del motor, en  $\text{m}^3$

$N$ : Velocidad de rotación del motor, en rpm

- Flujo de petróleo Diesel ( $m_{D-2}^0$ ): se debe considerar el mínimo porcentaje de petróleo a utilizarse como combustible piloto esto es de un 15 a 20% del utilizado por el motor en su funcionamiento a la potencia nominal [8]. Entonces,  $m_{D-2}^0$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$m_{D-2}^0 = 0,2 m_{D-2,N}^0 \quad (3.12)$$

$m_{D-2,N}^0$ : consumo de petróleo a la potencia nominal

- Flujo másico de biogás(  $m_{gas}$  ) : este flujo másico ya fue calculado, pero se debe verificar luego de los cálculos que su valor sea igual, o muy próximo al flujo másico de biogás  $m'_{gas}$ , que es equivalente térmicamente al flujo másico de petróleo dejado de consumir (dejado de consumir) (en este caso, el 80%), por lo que  $m'_{gas}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$m'_{gas} = 0.8 \frac{Hu_{D-2} m_{D-2,N}}{Hu_g} \quad (3.13)$$

Siendo  $Hu_{D-2}$  y  $Hu_g$  los poderes caloríficos del petróleo Diesel D-2 y del biogás respectivamente.

- Relación estequiométrica ( $lo$ ): Esta relación se obtiene mediante la siguiente relación:

$$lo = lo_{D-2} \cdot fm_{D-2} + lo_{gas} \cdot fm_{gas} \quad (3.14)$$

Siendo:

$lo_{D-2}$  y  $lo_{gas}$  : Relaciones estequiométricas del petróleo Diesel D-2 y del biogás, respectivamente

$$lo_{D-2} = 14,7 \text{ kg/kg}$$

$$lo_{gas} = 6,06 \text{ kg/kg} \quad (60\%CH_4, 40\%CO_2)$$

$fm_{D-2}$  y  $fm_{gas}$  : Fracciones másicas del petróleo Diesel D2 y del biogás, respectivamente.

$$fm_{D-2} = \frac{m_{D-2}}{m_{D-2} + m_{gas}} \quad ; \quad fm_{gas} = \frac{m_{gas}}{m_{D-2} + m_{gas}}$$

En conclusión, para el diseño del perfil del venturi, mediante el modelamiento y los cálculos ya expuestos sólo debemos elegir valores para el diámetro de la garganta ( $d_g$ ), el número de agujeros en la garganta y el diámetro de los agujeros que aseguren: un flujo másico de biogás que reemplace el petróleo Diesel dejado de utilizar, y un coeficiente de exceso de aire próximo a 1,5 [8], que asegure una combustión completa del combustible gaseoso y del combustible piloto.

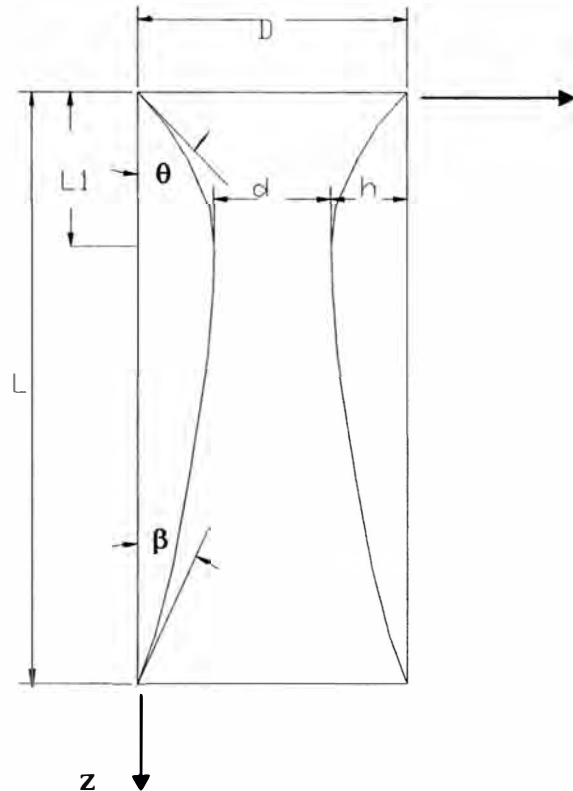
Para la realización de las pruebas y en base a lo ya mencionado en el presente capítulo se obtiene como venturi óptimo a aquella que tiene las siguientes características:

Diámetro de entrada	(D)	: 30,3mm
Diámetro de garganta	(d)	: 17mm
Ángulo de ingreso	( $\theta$ )	: 45°
Angulo de salida	( $\beta$ )	: 20°
L/h		: 0,22
Número de agujeros	( $n_{aguj}$ )	: 8
Diámetro de los agujeros	( $d_g$ )	: 2 mm
Longitud del venturi	(L)	: 45mm

Lo cual corresponde a un perfil que está establecido por las coordenadas mostradas en la tabla 3.1.

***Tabla 3.1: Coordenadas del perfil del venturi utilizado***

Z	Y
0	0
3,4137	3,2413
6,8273	5,6845
10,241	6,65
10,9237	6,6476
14,3374	6,5644
17,7511	6,3626
21,1647	6,0427
24,5784	5,6051
27,9921	5,0502
31,4057	4,3785
34,8194	3,5903
38,2331	2,6861
41,6467	1,6662
45,0604	0,5313



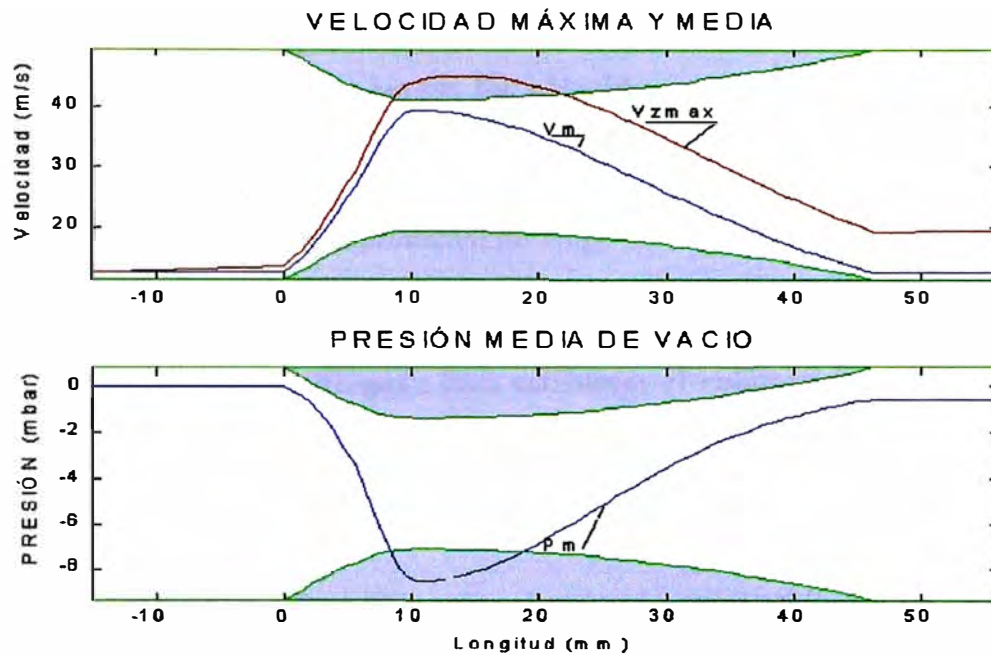
Consiguiéndose entonces los siguientes valores :

Flujo de biogás : 3,85 m<sup>3</sup>/h (más de lo requerido:3,08 m<sup>3</sup>/h )

Coefficiente de exceso de aire : 1,45 (≈1,5)

Caída de presión a través del venturi del mezclador : 0,84 mbar

Los valores de las velocidades y presiones a lo largo del venturi se muestran gráficamente en la figura 3.4



***Figura 3.4: Variación de velocidad y presión media a lo largo del venturi del mezclador***

### **3.2.2 Descripción de los demás componentes :**

**3.2.2.1 Biódigester :** Es el recipiente o tanque cerrado en el cual se produce el biogás y puede ser construido usando diversos materiales como ladrillo, cemento, metal o plástico. Para la producción de biogás, el biódigester debe ser alimentado de materia orgánica como el estiércol. El factor más importante para

dimensionar el biodigestor es la producción diaria de biogás necesitada para satisfacer la demanda de combustible para la producción de potencia eléctrica, mecánica o térmica.

Para nuestro trabajo el biogás fue obtenido en un reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA) de 6m de profundidad el cual, tiene un tiempo de retención de 7 horas y produce un promedio de 10 m<sup>3</sup> de biogás por día.

**3.2.2.2 Almacén de biogás :** Para establecer el volumen de almacenamiento de biogás, se necesita considerar la cantidad de producción así como la cantidad y periodo de consumo de biogás . El volumen de almacenamiento de biogás tiene que abastecer la diferencia entre el volumen consumido y el producido en un periodo de operación.

El almacenamiento de biogás ,para el presente trabajo, se hizo en 9 bolsas plásticas de 2 metros de largo cada una que almacenaban en total un volumen aproximado de 3 m<sup>3</sup>.

**3.2.2.3 Filtro de biogás :** El ácido sulfhídrico se encuentra en cantidades variables en el biogás y al reaccionar con el agua se puede convertir en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ó ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), los cuales son altamente corrosivos y pueden causar daños a las personas que estén en contacto con dichas sustancias así como también al motor.



El filtro de biogás utilizado estuvo compuesto de un tubo de PVC ,de 30cm de diámetro y 1 m de altura, y de tres compartimentos, los cuales fueron rellenos con limaduras de hierro, los que en contacto con el H<sub>2</sub>S forman sulfuro de hierro.

**3.2.2.4 Válvulas de apertura-cierre de biogás :** Estas válvulas son válvulas de esfera de 3/4’’ que se encuentran en las salidas del biodigestor y del almacén de biogás y son utilizadas básicamente para poder cortar rápidamente el suministro de biogás por motivos de mantenimiento del sistema o en caso de emergencia.

**3.2.2.5 Válvula de regulación de biogás :** Esta es una válvula de esfera de 3/8’’ es utilizada para establecer el flujo de biogás adecuado para un funcionamiento óptimo del motor Diesel; se ubica después del filtro de biogás y antes del mezclador de aire y biogás.

Si el motor Diesel utiliza un sistema de regulación semiautomático, como el que ha usado en el presente trabajo, se debe establecer mediante esta válvula el flujo de biogás adecuado para el buen funcionamiento del motor al someterle a la máxima carga de trabajo , con lo que asegurará un funcionamiento aceptable a cargas menores .

En el caso de utilizarse una regulación manual, es con esta válvula que se debe establecer el flujo de biogás necesario para un funcionamiento óptimo en cada régimen de carga.

**3.2.2.6 Electro válvula:** Este elemento fue utilizado para aumentar la seguridad del sistema, mediante el corte automático del flujo de biogás al apagarse el motor . Se colocó en serie con la válvula de regulación del biogás y la energía eléctrica que consumía le era suministrada por el generador eléctrico, el cual ,a su vez, era accionado por el motor Diesel que usaba petróleo y biogás.

**3.2.2.7 Conductos de biogás :** Estos fueron utilizados para conducir el biogás desde el biodigestor hacia el motor.

En el sistema de suministro de biogás utilizado, los conductos desde el biodigestor hasta el filtro de biogás son tubos de PVC de 3/4'' , y desde el filtro de biogás hasta el mezclador de aire y biogás es una manguera de 3/4'' que permite cierto desplazamiento del motor y la fácil colocación de algunos instrumentos como el medidor de volumen del biogás consumido por el motor.

### **3.3 Sistema de control de velocidad en función de la carga**

El sistema de control de velocidad en función de la carga es importante ya que

en muchos casos es un requisito fundamental, para una adecuada operación, mantener la misma velocidad del motor, a pesar de que varíe la carga impuesta .

**3.3.1 Tipos de control :** Para un motor Diesel que usa un sistema dual Diesel-biogás, siendo el biogás suministrado por el múltiple de admisión, existen tres tipos de control [8]:

- Control manual;
- Control automático; y
- Control semiautomático;

**3.3.1.1 Control manual:** En este tipo de control se debe conservar el sistema original de regulación de velocidad del motor Diesel, el cual mantiene una velocidad aproximadamente constante con una variación de  $\pm 2$  al  $\pm 5\%$ .

Cuando el motor es prendido en el sistema Diesel y la válvula de biogás es abierta lentamente el sistema de regulación original detecta un incremento de la velocidad , que es resultado de un incremento de la cantidad de combustible total y que origina un aumento de la fuerza centrífuga en el sistema de regulación , lo que provoca también una disminución de la cantidad del petróleo Diesel suministrado. Cuanto más biogás se suministre será menor la cantidad de diesel suministrado por el sistema de regulación original . Al llegar el flujo de petróleo Diesel al mínimo (en ralenti), el cual puede ser establecido como combustible piloto (por ejemplo un 15 a 20% de lo utilizado para producir la potencia nominal) el control es ahora realizado **manualmente** variando sólo el suministro de biogás hasta

que éste llegue a ser un poco menos que el valor requerido para obtener la potencia y velocidad necesarias, y el sistema de regulación original vuelva a incrementar el flujo de petróleo Diesel a una cantidad mayor de la correspondiente al del trabajo en ralenti.

En el caso de que el sistema de regulación original no tenga establecido una posición para el suministro de mínimo combustible piloto, y la cantidad de biogás suministrado sea excesiva, la cantidad de petróleo Diesel suministrado se reducirá gradualmente a menos del 10 al 15% de la cantidad original, por lo cual no se garantiza un encendido y el motor finalmente se apagará.

La máxima cantidad posible de ingreso de biogás es alcanzada justo antes de que el motor empiece a funcionar irregularmente, es decir que aumente notoriamente la opacidad de los gases de escape o que aumenten los niveles de ruido por el golpeteo producido en los cilindros. La posición adecuada de la válvula de biogás debe ser marcada o establecida para prevenir una sobrealimentación de biogás, sin embargo la posición de la válvula de control de biogás deberá ser ajustada para la potencia o velocidad requerida.

Este tipo de control necesita, en conclusión, una carga constante garantizada o un operario cerca para controlar el flujo de biogás, mediante la válvula correspondiente, de acuerdo a la carga establecida al motor.

**3.3.1.2 Control automático:** Este tipo de control es requerido para algunas aplicaciones como, por ejemplo, para los generadores eléctricos en donde la

potencia eléctrica requerida sea muy estable con pequeñas fluctuaciones de velocidad o frecuencia. Una válvula mariposa tiene que controlar el flujo de biogás y debe ser operada entre las posiciones de completamente cerrada y completamente abierta mediante movimientos cortos, como por ejemplo de 90° ó menos, y con aplicación de poca fuerza .

Esta válvula mariposa puede ser controlada por un mecanismo con solenoide (posicionador-actuador) el cual recibe sus impulsos de una unidad de control electrónica y éste a su vez tiene un sensor para la frecuencia del generador o para la velocidad de rotación del motor . La cantidad mínima de combustible Diesel para el encendido es establecida en un punto fijo en la bomba de inyección mientras que el sistema de regulación original (el gobernador) es bloqueado, esto implica que la cantidad de petróleo Diesel inyectado no varía con alteraciones de velocidad.

Este control requiere una protección segura para evitar el exceso de velocidad del motor como, por ejemplo, para el caso de que la carga llegue a ser mínima por lo cual el motor podría embalsarse, en este caso el gobernador no podría reducir la cantidad de combustible piloto y si el control no cierra inmediatamente la válvula de control de gas el motor podría destruirse. El dispositivo de control de máxima velocidad tendrá que actuar sobre los suministros de aire y/o de petróleo Diesel usando válvulas solenoides.

En el caso de que se tenga que operar el motor utilizando tan sólo petróleo Diesel, será necesario apagar el motor para desplazar o retirar el elemento

que fue colocado para bloquear el movimiento normal de los componentes del sistema de regulación original; por lo cual, si existe aún un bajo suministro de biogás el motor trabajará normalmente ya que el regulador original, nuevamente activado, suministrará la cantidad necesaria de petróleo Diesel para satisfacer potencia y velocidad requeridas.

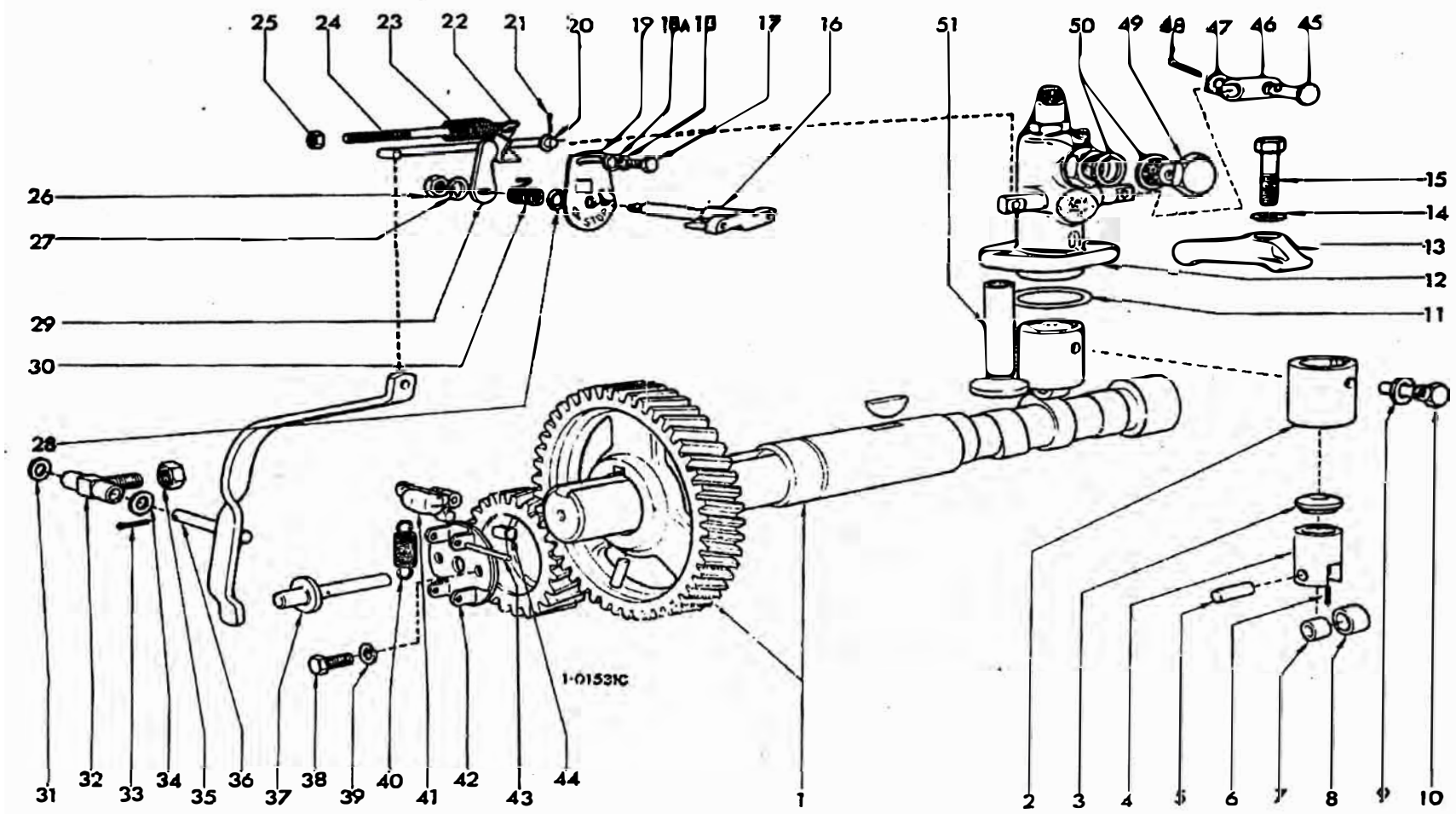
**3.3.1.2 Control semiautomático:** El sistema de regulación original del motor Diesel puede ser utilizado para controlar el flujo de petróleo Diesel suministrado, utilizando al mismo tiempo una cierta cantidad de biogás, el cual es introducido al motor, mezclado con el aire, por el múltiple de admisión . Esto se puede realizar cuando se usa una cantidad de biogás menor a la máxima que se puede suministrar (esta es una cantidad que sólo necesita de un 10 a un 20% de petróleo Diesel como combustible piloto [8] ), esto quiere decir que en este caso se utiliza una cantidad mayor de petróleo Diesel que la necesaria para el encendido . Esta mayor porción de petróleo Diesel permite al sistema de regulación original controlar la velocidad y potencia del motor incrementando o disminuyendo la cantidad de petróleo Diesel suministrado, mientras que la porción de biogás suministrado es establecida en un valor aproximadamente constante. Si, por ejemplo, se suministra al motor un 60% del biogás necesario para reemplazar a la cantidad de petróleo Diesel con la que se desarrolla la potencia nominal , la porción de petróleo Diesel sería el 40%, pero podría disminuir hasta el 15% (cantidad mínima aproximada de combustible piloto) con lo que el 25% de disminución de petróleo Diesel brindaría un intervalo en

el que el regulador original pueda controlar la potencia de salida del motor.

**3.3.2 Sistema de control utilizado :** El sistema de control utilizado en el presente trabajo es el semiautomático, sistema que se escogió por los siguientes motivos:

- Sería el tipo de control más económico, porque podría utilizarse el regulador de velocidad original del motor.
- Permite pasar rápidamente del sistema con combustible dual al sistema con solo petróleo Diesel y viceversa.
- Es de fácil operación y mantenimiento para el operario, comparado con los otros dos tipos de regulación.

El tipo de sistema de regulación utilizado se basa en el sistema de regulación original del motor el cual se muestra en la figura 3.5 . La nominación de los componentes según los fabricantes se muestra en la tabla 3.2.



*Figura 3.5: Sistema de regulación de la velocidad del motor utilizado*



***Tabla 3.2: Nominación de los componentes del sistema de regulación[16]***

<b>Número</b>	<b>Nombre</b>
1	Ensamble del árbol de levas y de la rueda dentada
2	Guía para la varilla de levantamiento del surtidor de petróleo
3	Casquillo De la varilla de levantamiento del surtidor de petróleo
4	Varilla de levantamiento del surtidor de petróleo
5	Perno del rodillo de la varilla de levantamiento
6	Perno de retención para el perno de rodillo
7	Pasador del rodillo de la varilla de levantamiento
8	Rodillo de la varilla de levantamiento
9	Arandela de los pines de centrado de la Guía
10	Pines de centrado de la guía
11	Laina de la guía de combustible
12	Surtidor de petróleo
13	Abrazadera del surtidor de petróleo
14	Arandela de la abrazadera
15	Perno de la abrazadera
16	Ensamble de la placa de la palanca de mando
17	Tornillo de presión de la placa
18	Arandela de la placa
19	Placa que localiza la palanca de mando

***Tabla 3.2: Nominación de los componentes del sistema de regulación[16]******(Continuación)***

---

20	Arandela de acoplamiento del Gobernador
21	Perno del acoplamiento del gobernador
22	Ensamble del acoplamiento del gobernador
23	Resorte del reductor de velocidad del gobernador
24	Palanca de ajuste del gobernador
25	Tuerca para el tornillo de reglaje
26	Tuerca para la palanca de mando
27	Arandela de resorte de la palanca de mando
28	Arandela plana de palanca de mando
29	Palanca de mando
30	Resorte de la palanca de mando
31	Arandela de cojinete
32	Cojinete de la palanca del gobernador
33	Pasador
34	Arandela de cojinete
35	Tuerca para el cojinete
36	Montaje de la palanca del gobernador
37	Manga del gobernador
38	Perno del soporte de las pesas del gobernador

***Tabla 3.2: Nominación de los componentes del sistema de regulación[16]******(Continuación)***

---

39	Arandela de resorte
40	Resorte de las pesas del gobernador
41	Pesas del gobernador
42	Soporte de las pesas del gobernador
43	Perno de las pesas del gobernador
44	fijador de las pesas del gobernador
45	Perno de parada en sobrecarga
46	Manga de parada en sobrecarga
47	Arandela Plana
48	Pasador
49	Enchufe de unión del eslabón giratorio
50	Arandela de cobre
51	Varilla de levantamiento de la válvula

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL**

### **4.1. Descripción del Banco de Pruebas**

El estudio experimental fue hecho en el Instituto de Motores de Combustión Interna, en el banco de pruebas Merlín, y en la caseta que se tuvo a disposición en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI (UNITRAR) para el desarrollo del proyecto de investigación “Diseño, Construcción y Pruebas de los sistemas de alimentación de biogás y de regulación de la velocidad de rotación de un motor Diesel”. El esquema del banco de ensayos utilizado se muestra en la figura 4.1, en donde:

1. Toma de biogás
2. Filtro de H<sub>2</sub>S
3. Medidor de volumen de biogás
4. Mezclador de aire y biogás
5. Tobera de ingreso de aire
6. Tanque cilíndrico para medición del flujo de aire
7. Manómetro en U

8. Motor Lister SL2
9. Arrancador eléctrico
10. Termómetro para la medición de temperatura del aire de refrigeración
11. Pipeta graduada para la medición del volumen de petróleo consumido
12. Cronómetro
13. Tacómetro digital
14. Generador eléctrico
15. Pinza amperimétrica
16. Multitester
17. Banco de focos
18. Termocupla
19. Silenciador
20. Opacímetro

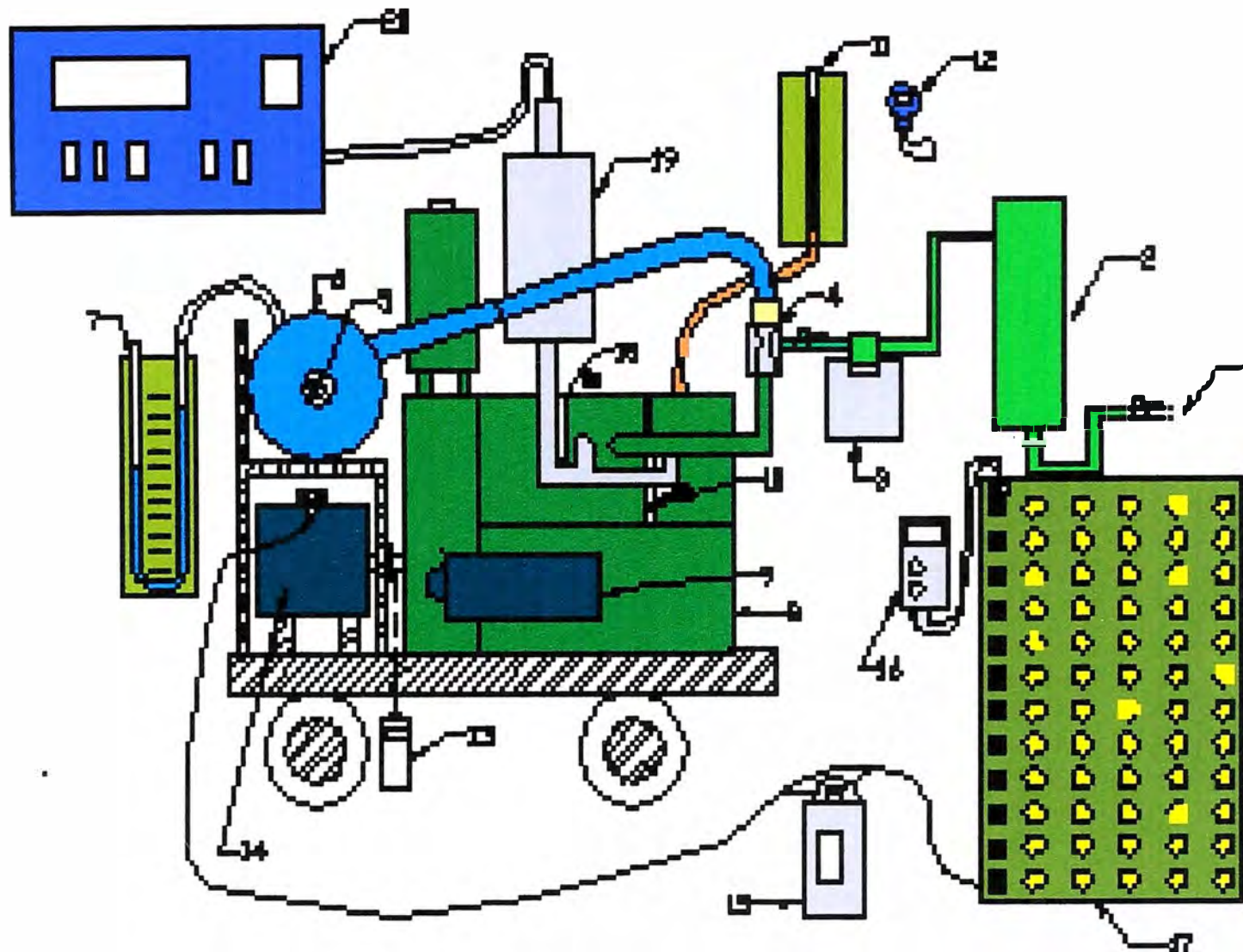


Figura 4.1: Esquema del banco de pruebas del motor Lister a biogás y petróleo

El motor generador y los instrumentos utilizados en los ensayos se describen a continuación:

#### **4.1.1. Características del motor y del generador utilizado:**

##### Del Motor:

-Marca	: Lister
-Tipo	: SL2
-Potencia nominal	: 8,5 HP (6,34kW) a 1800 RPM
-DxS	: 80,96 x 88,9 mm
-Cilindrada	: 916 cm <sup>3</sup>
-Relación de compresión	: 19,5/1
-Presión de inyección	: 150 atm. (15,19 Mpa)
-Consumo aproximado de combustible a plena carga y máximas revoluciones	: 2,7 L/h
-Consumo de aceite lubricante a plena carga y máximas revoluciones	: 0,038 L/h
-Peso neto del motor	: 187 kg
-Ángulo de avance a la inyección	: 30° antes del PMS

**Del generador eléctrico de corriente alterna**

- Marca : Frapil
- Tipo : AG1M18
- Frecuencia : 60 Hz
- Velocidad : 1800 RPM
- Voltaje : 220V
- Motor primario: 8,5 CV (8,38 HP)
- Potencia : 4,8 kW
- Rendimiento : 77%

**4.1.2 Descripción de la instrumentación**

- Instrumento de medición indirecta del flujo de aire:

Esta compuesta de:

- Un tanque cilíndrico 35 cm de diámetro y 65 cm de generatriz que tiene 3 agujeros en uno de los cuales se encuentra una tobera por la que ingresa el aire, un segundo agujero por el que sale el aire del tanque hacia el múltiple de admisión, el último es por el que se acopla un manómetro en U.
- Tobera: Esta pieza del instrumento tiene un diámetro de garganta de 18,8mm y un coeficiente de descarga de 0,98.
- Manómetro en U: éste sirvió para medir la diferencia entre las presiones de entrada y de salida del flujo de aire en la tobera, es con esta diferencia de



presiones que utilizando la primera ley de la termodinámica, la ecuación de continuidad, y considerando un proceso de compresión isentrópico en un volumen de control en la tobera, se obtiene el flujo másico de aire que ingresa al motor.

Este instrumento tiene las siguientes características:

Rango : de 0 a 65 cm de columna de H<sub>2</sub>O

Precisión : 1 mm de columna H<sub>2</sub>O

- Medidor de volumen de biogás: este instrumento sirvió para medir la cantidad de biogás que ingresa al motor. Sus características son:

Marca : BK4 KROM SCHRODER, modelo G4

Rango : de 0,04 a 6 m<sup>3</sup>/h

- Pipeta graduada para la medición del volumen de petróleo consumido por el motor.

Rango : de 0 a 8 ml

Precisión : 0,1 ml

- Cronómetro: fue utilizado para medir los tiempos en los que se consumían un determinado volumen de biogás y de petróleo. Tiene una precisión de 0,1 s .
- Banco de focos incandescentes que fue utilizado para dar carga al motor, está compuesto por 60 focos de 100 W cada uno.
- Multitester: fue utilizado para medir el voltaje (V) y la frecuencia (Hz) de la corriente generada en el generador eléctrico acoplado al motor. Este instrumento de marca Tektronix TX3 tiene las siguientes características:

<b>Rango:</b>	<b>Voltaje</b>	0,000- 9999.9 V;
	<b>Amperaje</b>	0,00 -99,9 A
	<b>Frecuencia</b>	0,00-100,00 Hz
	<b>Temperatura</b>	5-50°C
<b>Precisión:</b>	<b>Voltaje</b>	0,005 mV
	<b>Amperaje</b>	0,005 A
	<b>Frecuencia</b>	0,01 Hz
	<b>Temperatura</b>	0,01°C

- **Pinza amperimétrica:** Este instrumento sirvió para medir el amperaje de la corriente eléctrica generada, con lo que conjuntamente con el banco de focos y el multitester se pudo medir la potencia eléctrica. Sus características son:

<b>Marca</b>	:Clamp meter
<b>Rango</b>	:0-200 A
<b>Precisión</b>	: 0,01 A

- **Tacómetro digital:** este instrumento sirvió para medir la velocidad de rotación (en RPM) del motor. Sus características son:

<b>Rango</b>	: de 0 a 3000 rpm
<b>Precisión</b>	: 0,5 rpm

- **Opacímetro:** este equipo fue utilizado para medir la opacidad de los gases de escape del motor Diesel. La medición de la opacidad está basada en la absorción de la luz visible de los gases de escape.

Marca : OPAX 2000 II

Rango : de 00,0% a 99,9%

Precisión : 0,1%

- Manómetro en U: Este patrón manómetro en U sirvió para medir la presión de succión generada a la entrada del biogás del mezclador

Rango : de 0 a 35 cm de H<sub>2</sub>O

Precisión : 0,1 cm de H<sub>2</sub>O

- Termómetro del alcohol: Fue usado para medir la temperatura de salida del aire de refrigeración (ubicado en la base de los cilindros)

Rango : de 0 a 100 °C

Precisión : 1 °C

- Termocupla: Este instrumento fue utilizado por medir la temperatura de los gases de escape

Marca : ENDA

Rango : de 0 a 500°C

Precisión : 1°C

- Manómetro de Bourdon: se utilizó para medir la presión del aceite del motor

Marca : Lister

Rango : de 0 a 80 kg/cm<sup>2</sup> (7,84 Mpa)

Precisión : 10 kg/cm<sup>2</sup> (0,98 MPa)

## 4.2 Fórmulas empleadas

Las fórmulas empleadas para calcular los parámetros del motor Lister se pueden dividir en aquellas utilizadas cuando el motor utiliza sólo petróleo Diesel y cuando utiliza el sistema dual petróleo Diesel-biogás:

### 4.2.1 Funcionamiento con combustible Diesel:

- Potencia Eléctrica Generada:

$$P=V.I/1000, \text{ [kW]}$$

Siendo:

V : Voltaje (V)

I : Intensidad de corriente (A)

- Consumo horario de combustible

$$G_{C_{D-2}} = \frac{V}{t}, \text{ [L/h]}$$

Siendo:

V : Volumen consumido de petróleo Diesel (L)

T : Tiempo (horas)

- Consumo específico de combustible:

$$g_{e,D-2} = \frac{G_{C_{D-2}}}{P}, \text{ (L/(kWh))}$$

$G_c$  : Consumo horario de diesel (L/h)

$P$  : Potencia eléctrica generada (kW)

- Flujo de aire de admisión :

$$G_a = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \rho_f \cdot \rho_a} \cdot 3600, \text{ [kg/h]}$$

Siendo:

$C_d$  : Coeficiente de descarga de la tobera del tanque de medición de flujo de aire ( $C_d = 0,98$ )

$A$  : Área de la sección de flujo de la tobera del tanque ( $m^2$ )

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$h$  : diferencia de alturas entre los niveles de agua en el manómetro en u (m)

$\rho_f$  : Densidad del agua ( $kg/m^3$ )

$\rho_a$  : Densidad del aire ( $kg/m^3$ )

-Eficiencia Volumétrica :

$$\eta_v = \frac{G_a}{(60/\tau) \cdot V_h \cdot n \cdot \rho_a}$$

Siendo:

$G_a$  : Flujo másico de aire de admisión (kg/h)

$\tau$  : 2 (motor de cuatro tiempos)

$V_h$  : cilindrada del motor ( $m^3$ )

$n$  : velocidad del cigüeñal (rpm)

$\rho_0$  : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )

-Eficiencia térmica efectiva :

$$\eta_e = \frac{P \cdot 3600}{\rho_{c,D-2} \cdot G_{c,D-2} \cdot H_u \cdot \eta_g}$$

Siendo:

$P$  : Potencia eléctrica generada (kW)

$G_{c,D-2}$  : Consumo horario de diesel ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\rho_{c,D-2}$  : Densidad del diesel ( $\text{Kg/m}^3$ )

$H_u$  : Poder calorífico (kJ/kg)

$\eta_g$  : Eficiencia del generador ( $\eta_g = 77\%$ )

-Coeficiente de exceso de aire

$$\alpha = \frac{G_a / G_c}{l_0}$$

Siendo:

$G_a$  : Flujo másico de aire de admisión (kg/h)

$G_c$  : Consumo de combustible (kg/h)

$L_0$  : Cantidad teórica necesaria para quemar 1 kg de  
petróleo Diesel (kg)

**Funcionamiento con el sistema de alimentación dual :** En este caso la potencia eléctrica generada, el consumo horario de combustible, el flujo de aire de admisión, y la

**Funcionamiento con el sistema de alimentación dual :** En este caso la potencia eléctrica generada, el consumo horario de combustible, el flujo de aire de admisión, y la eficiencia volumétrica se calculan con las mismas fórmulas anteriores. Las nuevas formulas a considerar son:

- Consumo específico de combustible de diesel y de biogás:

$$g_{e,D-2} = \frac{G_{CD-2}}{P} \quad (\text{L}/(\text{kW.h}))$$

$$g_{e,bio} = \frac{G_{Cbio}}{P} \quad (\text{L}/(\text{kWh}))$$

Siendo:

$G_{CD-2}$  : Consumo horario de diesel en el modo dual (L/h)

$G_{Cbio}$  : Consumo horario de biogás en el modo dual ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$P$  : Potencia eléctrica generada (kW)

- Eficiencia térmica efectiva

$$\eta_e = \frac{P.3600}{(\rho_{D-2}.G_{CD-2}.Hu_{D-2} + \rho_{bio}.G_{Cbio}.Hu_{bio})\eta_g}$$

$P$  : Potencia eléctrica generada (kW)

$\rho_{D-2}$  : Densidad del diesel (kg/L)

$\rho_{bio}$  : Densidad del biogás ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$G_{CD-2}$  : Consumo horario del diesel en el modo dual (L/h)

$G_{Cbio}$  : Consumo horario del biogás en el modo dual ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$Hu_{D-2}$  : Poder calorífico del diesel (kJ/kg)

$H_{u_{bio}}$  : Poder calorífico del biogás (kJ/kg)

$\eta_g$  : Eficiencia del generador ( $\eta_g \approx 80\%$ )

Coeficiente de exceso de aire global

$$\alpha_g = \frac{(r_{a/c})_r}{l_{0d}}$$

Siendo:

$r_{a/cr}$  : Cantidad real de aire utilizada para quemar 1kg de combustible dual diesel-biogás

$$(r_{a/c})_r = \frac{m_{aire}}{m_{D-2} + m_{biogas}} = \frac{G_a}{G_{cD-2} \cdot \rho_{D-2} + G_{c_{bio}} \cdot \rho_{bio}}$$

$G_a$  : Flujo de aire de admisión (kg/h)

$G_{c_{D-2}}$  : Consumo horario de diesel en el modo dual (L/h)

$G_{c_{bio}}$  : Consumo horario de biogas en el modo dual (m<sup>3</sup>/h)

$\rho_{D-2}$  : Densidad del diesel (kg/L)

$\rho_{bio}$  : Densidad del biogás (kg/m<sup>3</sup>)

$l_{0d}$  : Cantidad de aire teóricamente necesaria para quemar 1kg del combustible dual diesel-biogás

$$l_{0d} = f_{m_{D-2}} \cdot l_{0D-2} + f_{m_{bio}} \cdot l_{0bio}$$

$f_{m_{D-2}}$  y  $f_{m_{bio}}$  : fracciones másicas del diesel y del biogás respectivamente



$l_{0D-2}$  y  $l_{0bio}$  : cantidades teóricamente necesarias para quemar  
1kg de petróleo Diesel y de biogás,  
respectivamente

Coefficiente de exceso de aire aparente del biogás :

$$\alpha_{bio} = \frac{(r_{a/c})_{bio}}{l_{0bio}}$$

Siendo:

$(r_{a/c})_{bio}$  : Cantidad real de aire utilizada para quemar una  
cantidad de combustibe dual diesel-biogás que  
contenga 1kg de biogás.

$l_{0 bio}$  : cantidad teóricamente necesaria para quemar 1 kg de  
biogás

### **4.3 Errores experimentales**

Los errores de medición son inherentes a todo trabajo experimental ,por lo cual se presentan en la tabla IV.2 los errores relativos aproximados de los parámetros medidos [11]. Además, se muestran los errores relativos aproximados de los parámetros calculados ,estos últimos se obtienen considerando la propagación del error y en base a la tabla IV.1.

**Tabla IV.1: Errores absolutos y relativos de algunas funciones**

Función	Error absoluto	Error relativo
$A + B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) /  A + B $
$A - B$	$\Delta A + \Delta B$	$(\Delta A + \Delta B) /  A - B $
$A \cdot B$	$A\Delta B + B\Delta A$	$\Delta A /  A  + \Delta B /  B $
$A/B$	$(A\Delta B + B\Delta A)/B^2$	$\Delta A /  A  + \Delta B /  B $
$A^n$	$nA^{n-1} \cdot \Delta A$	$n\Delta A /  A $
$A^{1/n}$	$(A^{(1-n)/n} \cdot \Delta A)/n$	$\Delta A / (n  A )$

**Tabla IV.2: Errores relativos de los parámetros medidos en las pruebas**

Parámetros	Error relativo menor a:
<b>Parámetros Medidos</b>	
Voltaje	$\pm 0,5\%$
Amperaje	$\pm 0,25\%$
Frecuencia eléctrica	$\pm 0,5\%$
Frecuencia de rotación del cigüeñal	$\pm 0,5\%$
Presiones medidas en cm de H <sub>2</sub> O	$\pm 0,5\%$
Presiones medidas en mm de Mercurio	$\pm 0,4\%$
Volumen consumido de petróleo	$\pm 1\%$
Volumen consumido de biogás	$\pm 2\%$

Tiempo medido por el cronómetro	$\pm 0,2\%$
Temperatura ambiental	$\pm 4\%$
Temperatura del aire de refrigeración saliente	$\pm 5\%$
Temperatura de los gases de escape	$\pm 4\%$
Opacidad de los gases de escape	$\pm 5\%$
Ruido	$\pm 1\%$

#### Parámetros Calculados

Potencia eléctrica generada	$\pm 0,75\%$
Consumo horario de petróleo	$\pm 1,2\%$
Consumo específico de petróleo	$\pm 1,75\%$
Consumo horario de biogás	$\pm 2,2\%$
Consumo específico de biogás	$\pm 2,75\%$
Densidad del aire	$\pm 4,4\%$
Flujo del aire de admisión	$\pm 2,7\%$
Eficiencia volumétrica	$\pm 7,6\%$
Eficiencia térmica efectiva	$\pm 3\%$

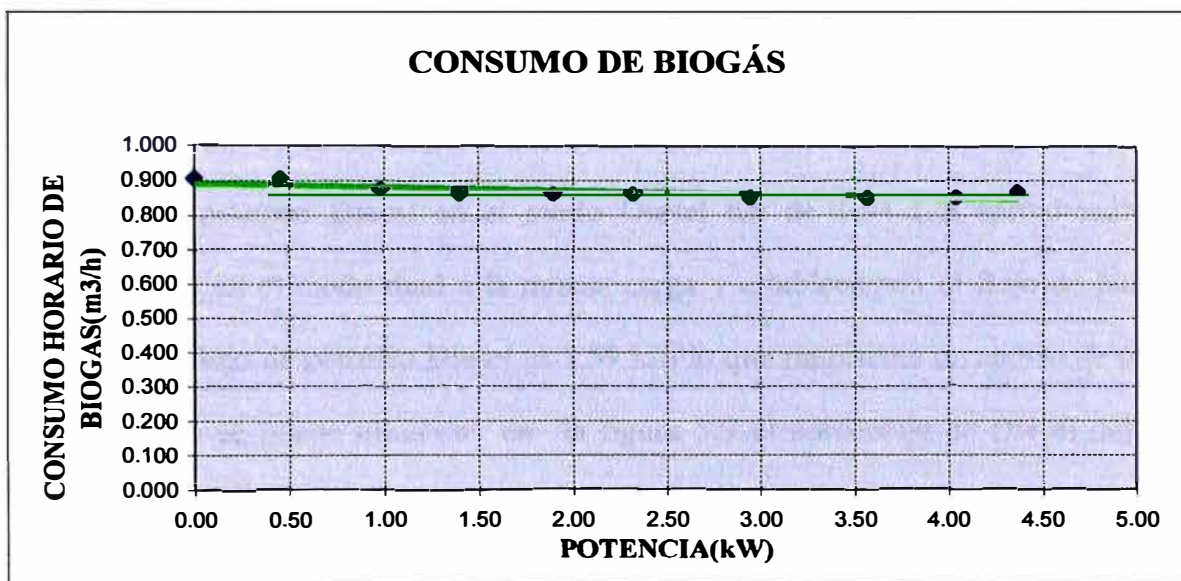
---

## **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Las pruebas realizadas fueron hechas en el motor Diesel Lister y adoptando una regulación semiautomática de la velocidad de rotación del motor para mantenerla aproximadamente constante e igual a 1800rpm.

El parámetro referencial de las pruebas realizadas fue el **flujo de biogás** establecido al empezar cada una de las pruebas, cuando al motor se le sometió a la carga máxima preestablecida (por motivos de seguridad, fue al prender 45 focos de 100W), por lo que ,considerando una eficiencia de 77% del generador eléctrico, el motor entregaba aproximadamente el 88% de su potencia nominal que es de 6,34 kW (8,5HP) . El flujo de biogás establecido al empezar las pruebas permaneció aproximadamente constante, con una cierta tendencia al aumento al disminuir la carga, esto se debe a que la velocidad de rotación del cigüeñal es aproximadamente constante, por acción del sistema de regulación de velocidad, pero aumenta ligeramente al disminuir la carga, lo que significa un aumento de la succión en el mezclador de aire y biogás, generándose entonces un mayor flujo de biogás.

En la figuras 5.1 se puede observar el flujo aproximadamente constante de biogás mantenido en las pruebas.



***Figura 5.1:*** Variación del flujo de biogás con respecto a la potencia.

*El flujo de biogás preestablecido al empezar la prueba fue 0,87 m<sup>3</sup>/h.*

*Prueba del 12/01/2004.*

Con la intención de predecir con aproximación el comportamiento de otros motores Diesel a los que se le suministre biogás en condiciones similares , se puede tomar como parámetro referencial al **porcentaje de petróleo dejado de utilizar** al empezar cada prueba con la máxima carga establecida al motor ,este porcentaje es función del **flujo constante de biogás** mencionado en el párrafo anterior.

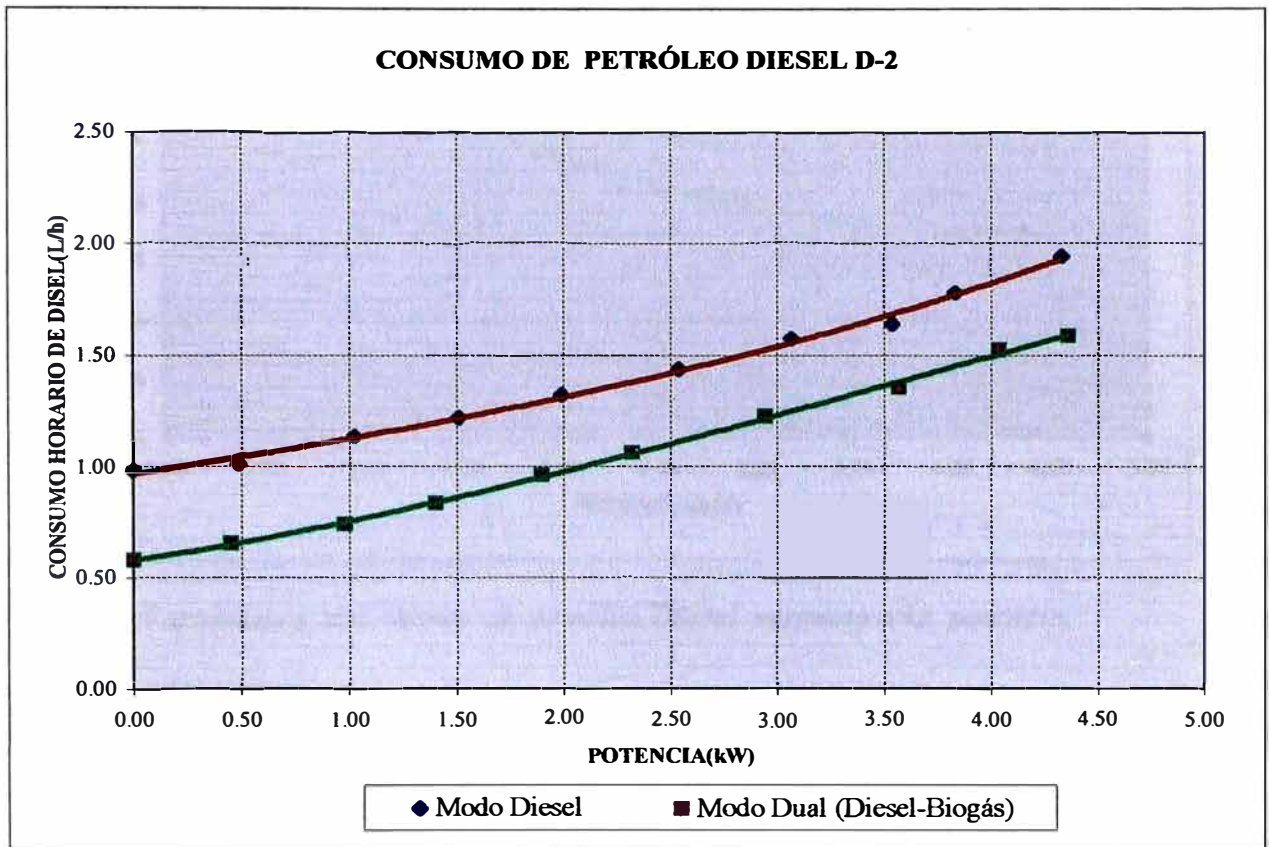
### **5.1 Análisis comparativos**

Luego de realizar los ensayos experimentales se pudo hacer el siguiente análisis de resultados:

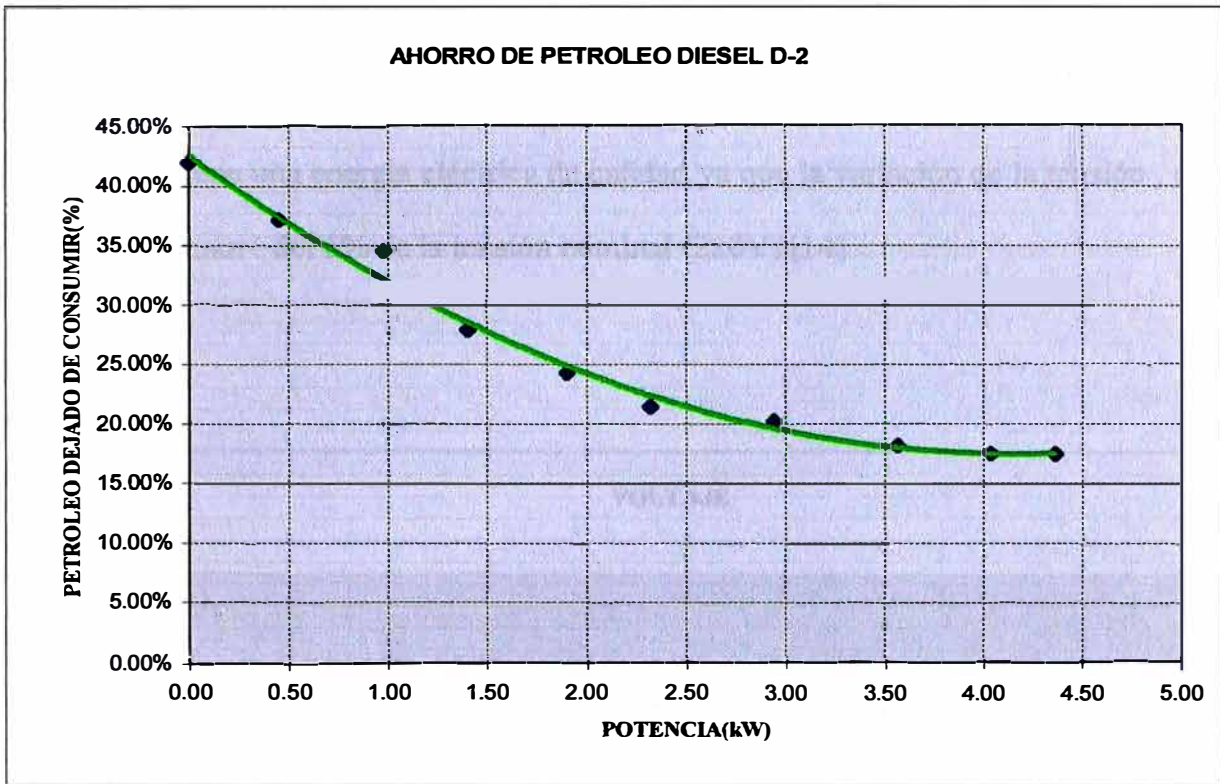
- **Consumo de petróleo.**

En el gráfico 5.2 se observa que al someter al motor a la máxima carga de prueba el consumo de petróleo Diesel en el modo Diesel fue de 1,94 L/h aproximadamente, mientras que en el modo dual a la misma carga y estableciendo el flujo de biogás en 0,87 m<sup>3</sup>/h el flujo de petróleo Diesel es 1,59 L/h lo que representa un ahorro de petróleo Diesel. Como se puede observar en la figura 5.3 el porcentaje de Diesel dejado de consumir aumenta conforme disminuye la carga impuesta al motor, y llega hasta un 42% para cuando al motor no se le somete a alguna carga externa; esta tendencia se debe a que al disminuir la carga, la cantidad de combustible total requerido es menor, sin embargo, la cantidad de biogás permanece aproximadamente constante por lo que el consumo de petróleo Diesel disminuye, de ahí el menor consumo de petróleo Diesel y el mayor ahorro a bajas cargas. De otras pruebas realizadas durante este proyecto, para un flujo de biogás preestablecido mayor se obtiene un mayor ahorro de Diesel que llega hasta aproximadamente un 60%.

Obviamente, al utilizar biogás, el consumo de petróleo es menor ya que el porcentaje de biogás utilizado reemplaza a una cantidad de petróleo equivalente en poder calorífico.



**Figura 5.2:** Variaciones del consumo horario del Diesel con respecto a la potencia. El flujo de biogás preestablecido al empezar la prueba fue  $0,87\text{m}^3/\text{h}$ . Prueba del 12/011/2004.



***Figura 5.3*** Variaciones del ahorro de petróleo Diesel respecto a la potencia.

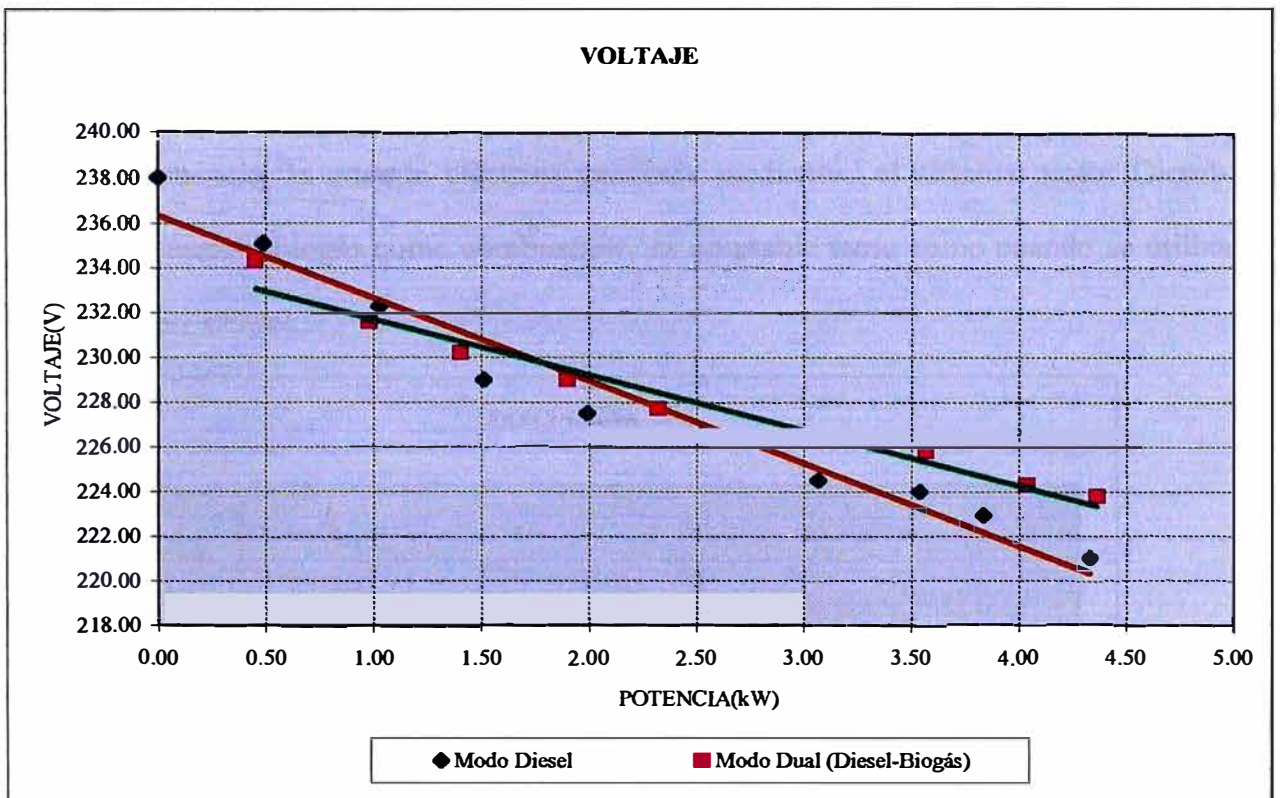
*Prueba del 05/12/2003.*

- **Voltaje y frecuencia.**

En las figura 5.4 se observa la variación del voltaje respecto a la potencia generada, de lo cual se puede mencionar que en el modo Diesel el voltaje varía aproximadamente desde un máximo de 238V (8,2% más que el valor nominal) cuando está sin carga (en vacío), hasta un mínimo de 221V (0,4% más que el valor nominal) con la máxima carga establecida. Al establecer el modo dual el valor máximo del voltaje es 234 V (6,3% más



que el valor nominal) y el mínimo es de 223,8 V (1,7% más que el valor nominal) ; y se puede afirmar que en los modos Diesel y dual, y con una carga impuesta mayor a 1,3 kW se obtiene una energía eléctrica de calidad ya que la variación de la tensión , en ese rango es menor del 5% de la tensión nominal (220V) [14]

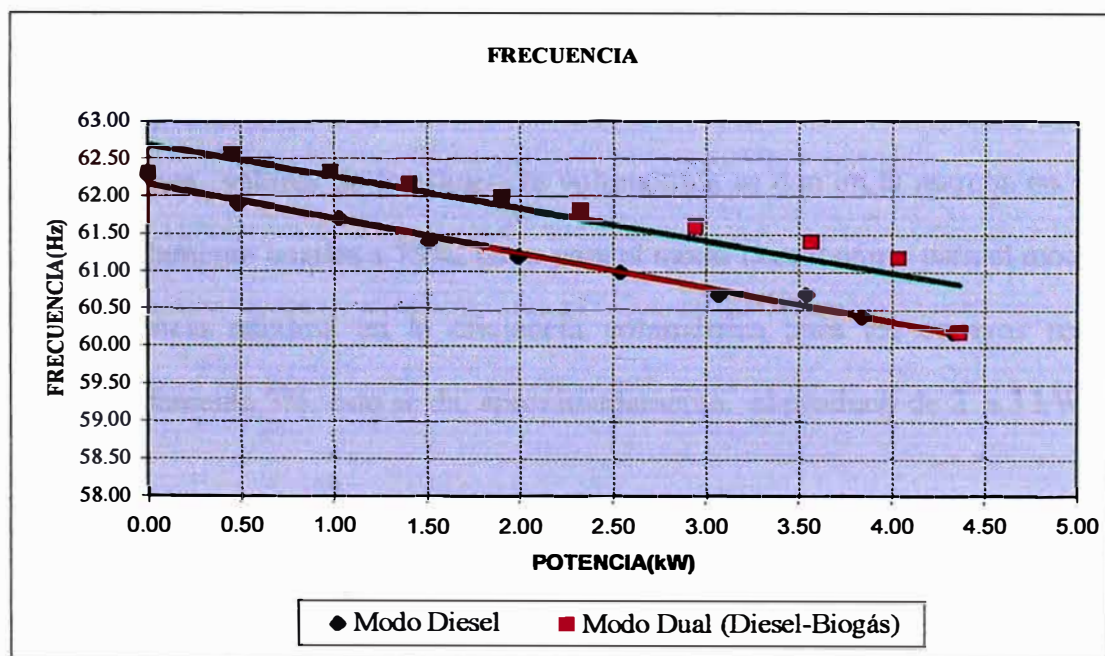


***Figura 5.4:*** Variaciones del voltaje con respecto a la potencia.

*Prueba del 12/01/2004.*

En las figuras 5.5 se observa que los valores de la frecuencia en el modo Diesel varían desde un máximo de 62,3Hz (3,8% más que el valor nominal) hasta un mínimo de 60,2Hz (0,3% más que el valor nominal). En el modo dual las frecuencias varían desde un máximo de 62,7 Hz (4,5% más que el valor nominal), hasta un mínimo de 60,7 Hz (1,16% más que el nominal), por lo que se puede afirmar que el sistema de regulación establecido mantiene la variación de la frecuencia dentro de los límites permisibles (<5%)[14], tanto en el modo Diesel como en el modo dual.

En consecuencia, la energía eléctrica generada mediante el sistema motor Diesel-generador, usando biogás como combustible, es aceptable tanto como cuando se utiliza sólo petróleo Diesel.



**Figura 5.5:** Variaciones de la frecuencia de la corriente eléctrica con respecto a la potencia. Prueba del 12/01/2004

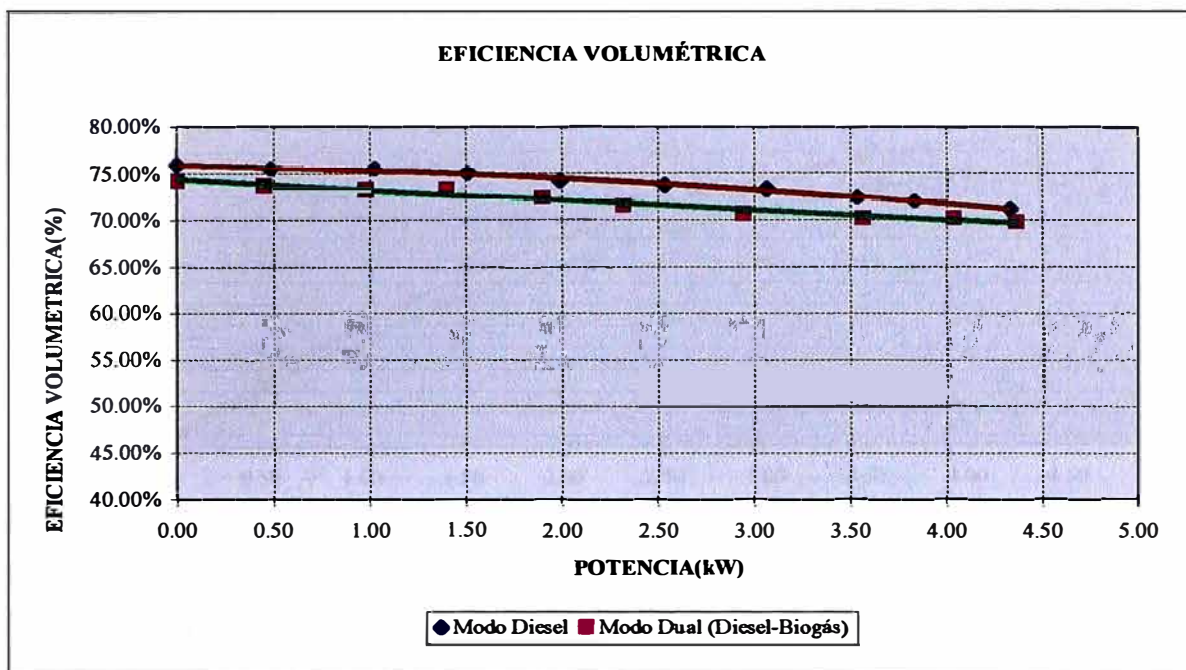
La variación aceptable de la frecuencia nos confirma la validez del tipo de regulación utilizado para mantener aproximadamente constante la velocidad de rotación del cigüeñal.

- **Eficiencia volumétrica.**

En las figura 5.6 se observa que la eficiencia volumétrica del motor en el modo Diesel varía de un mínimo de 71,1% ,a máxima carga, a un máximo de 75,9% en vacío ; y en el modo dual varía desde un mínimo de 69,7% , a máxima carga, hasta un máximo de 74,2% en vacío. Se puede notar que en el modo dual la eficiencia volumétrica es menor que en el modo Diesel, esta disminución en la eficiencia volumétrica esta sustentada en el hecho de que, en el modo dual, al mezclarse el aire con el biogás antes de ingresar al múltiple de admisión, el biogás desplaza a un porcentaje del aire que ingresaría normalmente con el modo Diesel.

Los máximos valores de la eficiencia volumétrica se dan en la marcha en vacío y son aproximadamente iguales a 75%, tanto para el modo Diesel como para el modo dual.

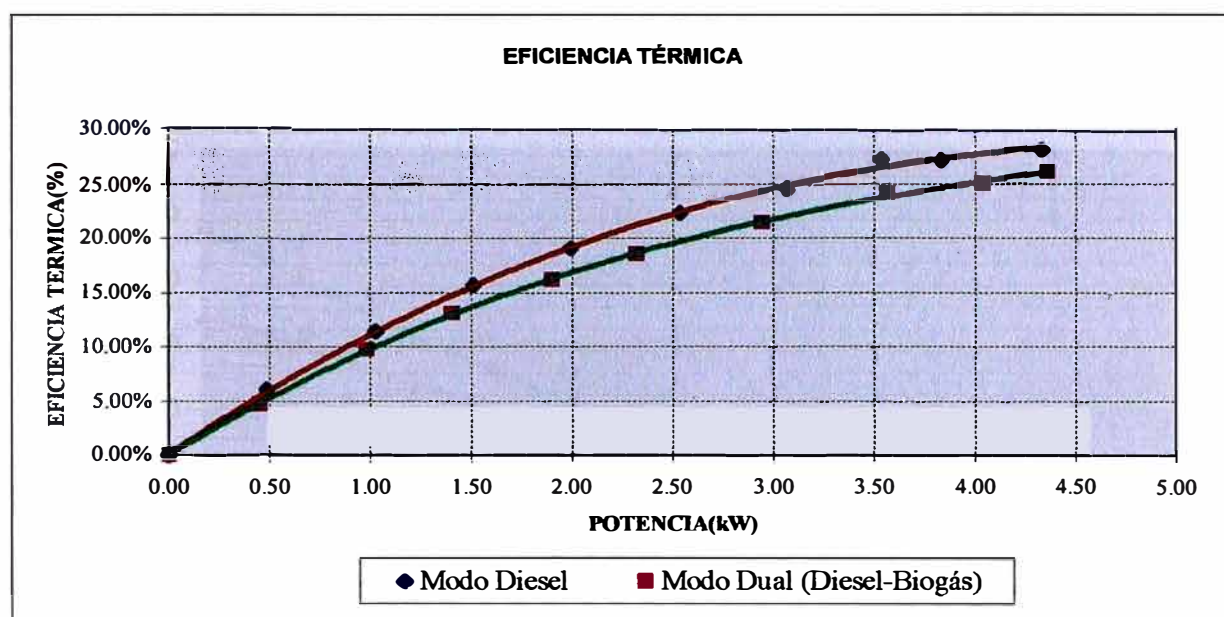
.La diferencia máxima en la eficiencia volumétrica para los ensayos realizados es aproximadamente 3%. esto se da, aproximadamente, al producir de 2 a 3 kW.



**Figura 5.6:** Variaciones de la eficiencia volumétrica con respecto a la potencia. Prueba del 12/01/2004.

- **Eficiencia térmica efectiva.**

A partir de la figura 5.7 se puede afirmar que la eficiencia térmica varía, tanto en el modo Diesel como en el modo dual, desde cero, cuando el motor está sin carga, hasta un máximo valor cuando al motor se le impone la máxima carga, el máximo valor para la eficiencia térmica es de 28,1% para el modo Diesel y de 26,1% para el modo dual. Esta eficiencia, para una potencia generada mayor que cero, es menor en el modo dual que en el modo Diesel, siendo la caída máxima de esta eficiencia de 3%, aproximadamente, y dándose en los puntos de mayor carga.



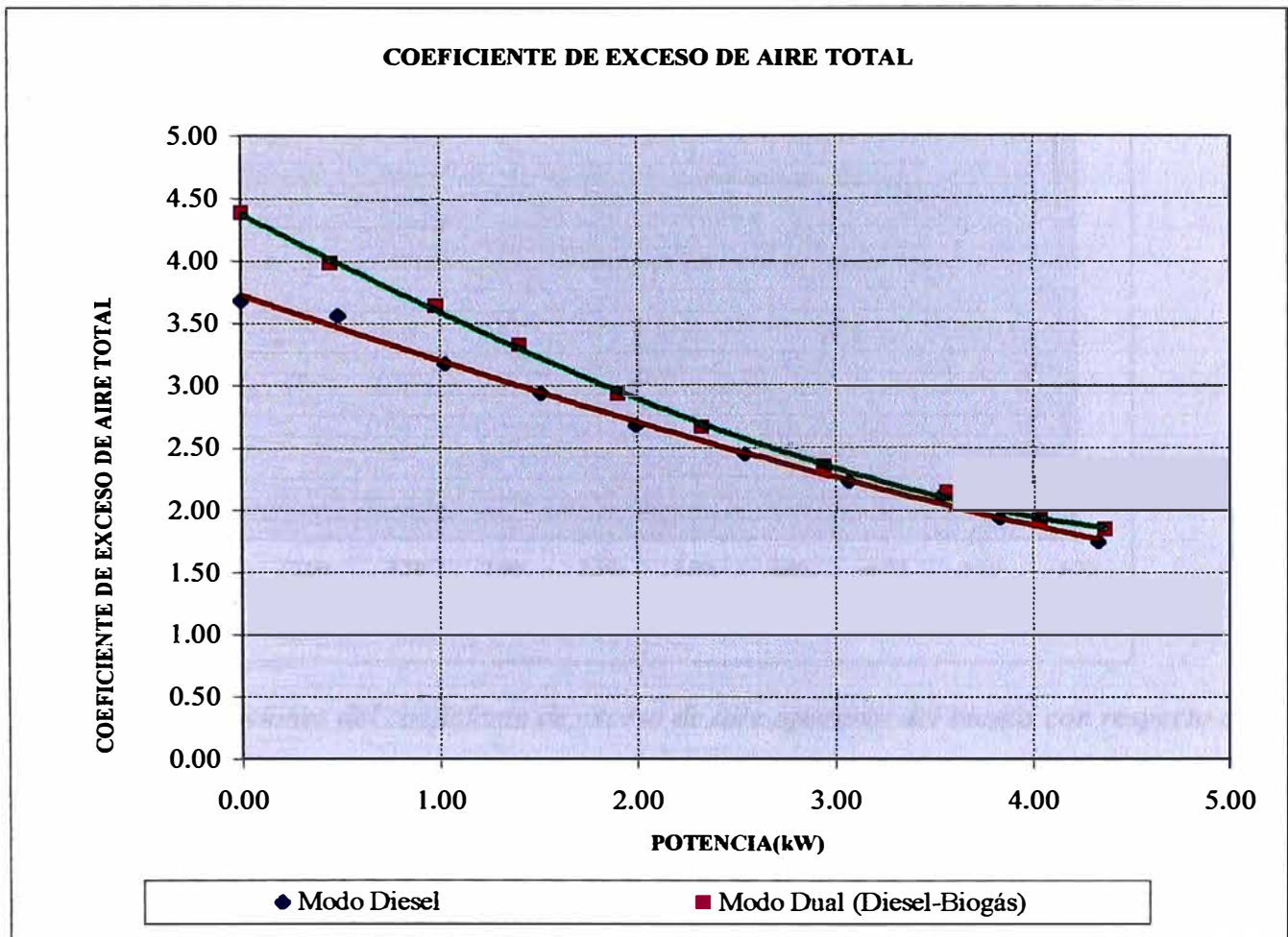
**Figura 5.7:** Variaciones de la eficiencia térmica con respecto a la potencia.

*Prueba del 12/01/2004.*

- **Coefficiente de exceso de aire total.**

La figura 5.8 muestran la tendencia que sigue el coeficiente de exceso de aire total para ambos modos dual y Diesel, siendo mínimo y aproximadamente iguales a 1,75 a máxima carga, sin embargo, este coeficiente va aumentando al disminuir la carga y toma su máximo valor en marcha en vacío, siendo este valor de 3,7 para el modo Diesel y de 4,4 para el modo dual. Como se puede observar este coeficiente es siempre mayor en el modo dual que en el modo Diesel, y la diferencia, se incrementa al disminuir la carga, tomando el máximo valor de 0,7 en marcha en vacío.



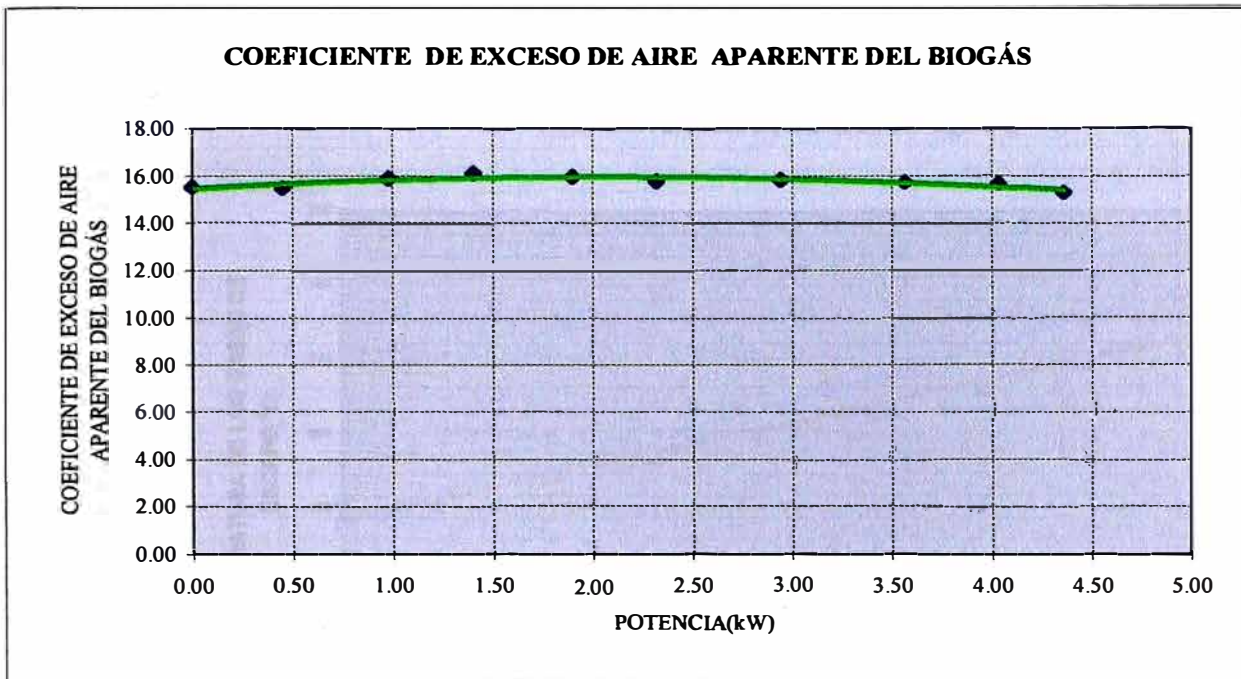


**Figura5.8:** Variaciones del coeficiente de exceso de aire con respecto a la potencia.

Prueba del 12/01/2004.

- **Coeficiente de exceso de aire aparente para el biogás.**

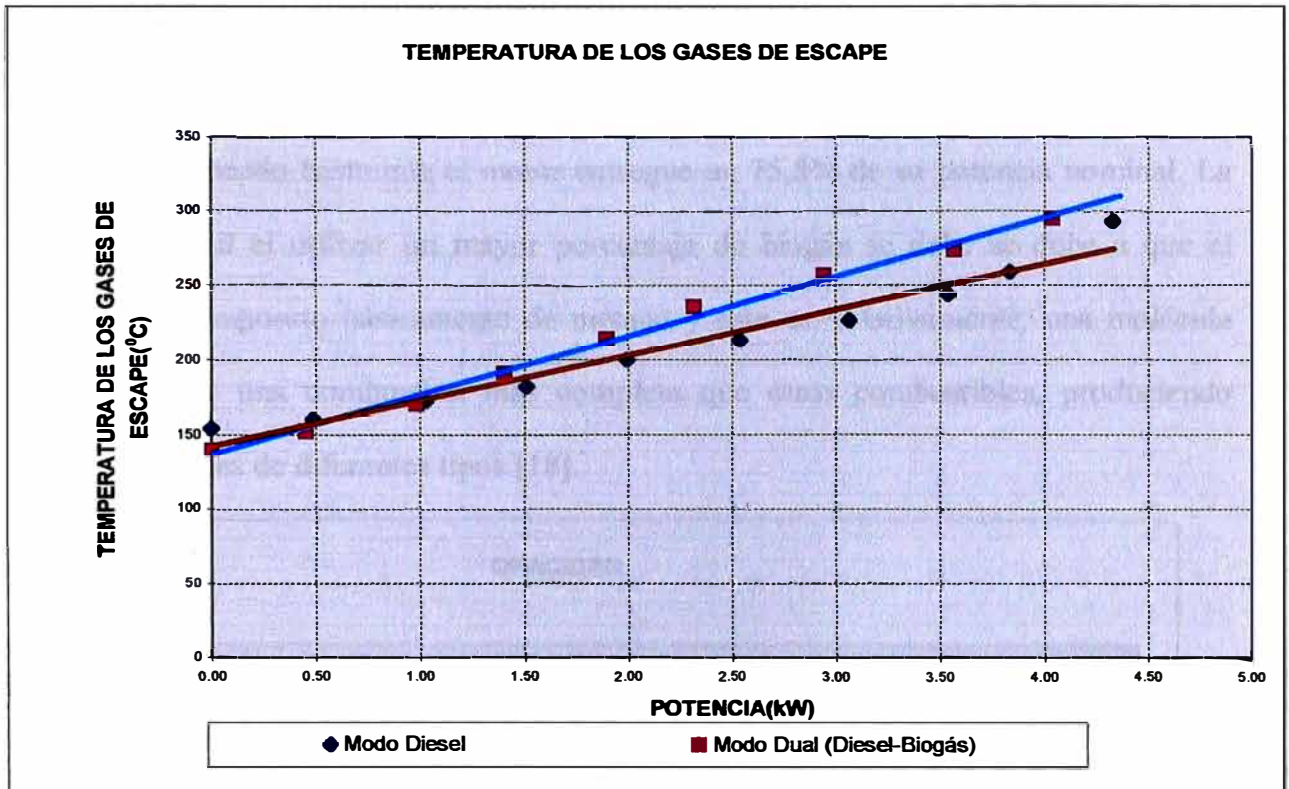
Según la figura 5.9 el coeficiente de exceso de aire aparente para el biogás, ya definido en el capítulo anterior, es aproximadamente constante y toma valores cercanos a 16; esta tendencia se debe a que tanto el flujo de aire que ingresa al motor así como el flujo de biogás son aproximadamente constantes al variar la potencia debido a que la velocidad de rotación del motor es, también, aproximadamente constante (1800rpm).



**Figura5.9:** Variaciones del coeficiente de exceso de aire aparente del biogás con respecto a la potencia. Prueba del 12/01/2004

- **Temperatura de los gases de escape.**

En la figura 5.10 se puede observar que temperatura de los gases de escape es aproximadamente la misma para los modos Diesel y dual cuando el motor no es sometido a cargas externas, sin embargo conforme la carga impuesta al motor va aumentando, la temperatura de los gases de escape en el modo dual es mayor a esta temperatura en el modo Diesel, siendo el incremento hasta en un 13%, lo que se da cuando se genera una potencia eléctrica de 4,3 kW es decir cuando el motor entrega, aproximadamente, un 88% de su potencia nominal.



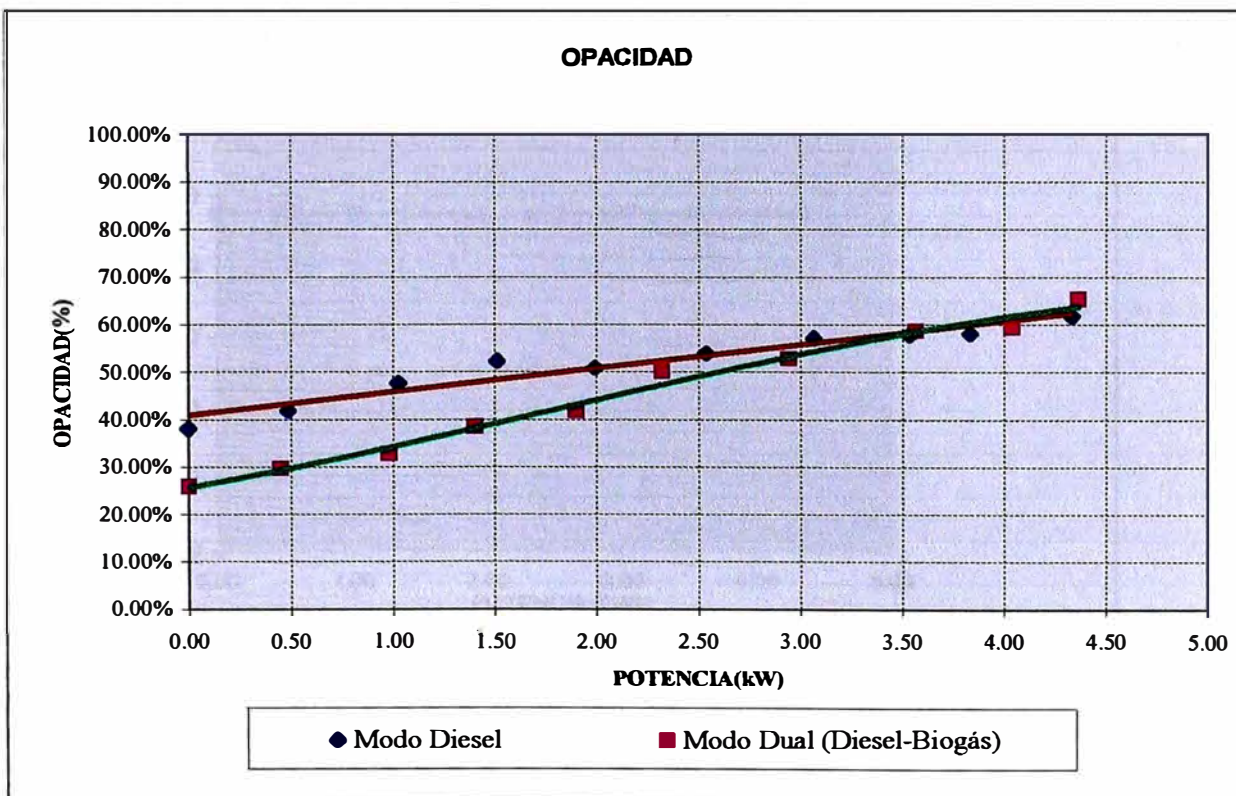
**Figura5.10:** Variaciones de la temperatura de los gases de escape con respecto a la potencia. Prueba del 12/01/2004

• **Opacidad.**

En el siguiente gráfico se puede observar que la opacidad sigue una tendencia ascendente al aumentar la carga, tanto en el modo Diesel como en el modo dual. La opacidad toma su mínimo valor en marcha en vacío y es de 40% para el modo Diesel y de 25,9% para el modo dual, el máximo valor se da en la máxima carga y es de 61,7% para el modo Diesel y de 65,3% para el modo dual



De la prueba realizada se puede observar que la opacidad, en marcha en vacío, en el modo Dual es 14,1% menos que en el modo Diesel, y continua siendo menor hasta que la potencia generada es 3,7kW, es decir, que con el modo dual se logra menores valores de humeado hasta que el motor entregue un 75,8% de su potencia nominal. La menor opacidad al utilizar un mayor porcentaje de biogás se debe a que el biogás está compuesto básicamente de metano y este es, relativamente, una molécula simple y tiene una combustión más completa que otros combustibles, produciendo menos emisiones de diferentes tipos [18].



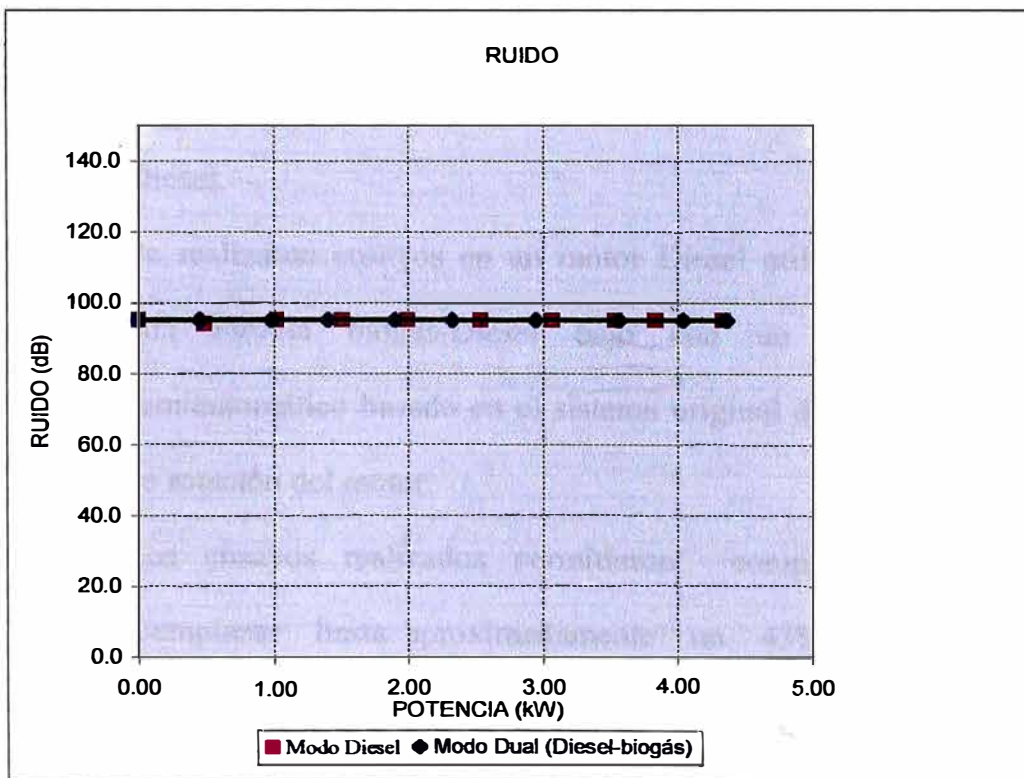
**Figura 5.11:** Variaciones de la opacidad con respecto a la potencia.

Prueba del 12/01/2004.

- **Ruido.**

Por las pruebas realizadas y según la figura 5.12 se puede ver que los niveles de ruido son aproximadamente constantes respecto a la potencia generada, tanto en el modo Diesel como en el modo dual y toman aproximadamente el valor de 95 db.

Se debe mencionar además que, al realizar las pruebas en el modo dual, el decibelímetro utilizado no captó el golpeteo producido por el excesivo flujo de biogás hacia el motor,



***Figura 5.12: Variaciones del ruido con respecto a la potencia.***

*Prueba del 12/01/2004.*

## **CONCLUSIONES**

1. Es posible utilizar el combustible dual petróleo Diesel- biogás en un motor Diesel.
2. Se realizaron ensayos en un motor Diesel utilizando como combustible una mezcla biogás-Diesel bajo con un sistema de regulación semiautomático basado en el sistema original de regulación de velocidad de rotación del motor.
3. Los ensayos realizados permitieron comprobar la posibilidad de reemplazar hasta aproximadamente un 43% de petróleo Diesel por biogás en marcha en vacío, y un 18% en plena carga.
4. El sistema de regulación establecido permite el cambio inmediato en el modo de funcionamiento del motor ,es decir, del modo Diesel normal al modo dual ,y viceversa.
5. Con el sistema de regulación establecido se asegura una generación de corriente eléctrica de calidad tanto en el modo Diesel como en el modo dual.

6. Con el uso de la mezcla biogás-Diesel como combustible se logró una disminución en la opacidad de los gases de escape, la opacidad, en marcha en vacío, en el modo Dual es 14,1% menos que en el modo Diesel, y continua siendo menor hasta que la potencia generada es 3,7kW, es decir, que con el modo dual se logra menores valores de humeado hasta que el motor entregue un 75,8 % de su potencia nominal.

Luego del desarrollo del presente trabajo se puede, además, plantear las siguientes observaciones:

1. Para hacer funcionar otros motores Diesel utilizando biogás, basándose en los resultados del presente trabajo, se debe establecer el flujo máximo de biogás de tal manera de que cuando a los motores se les imponga la carga máxima estos sigan trabajando en condiciones aceptables, es decir fundamentalmente con una opacidad menor al 72,5% [19], con una temperatura de salida del flujo refrigerante (aire o agua) dentro del límite permisible para el motor y con el mismo nivel de ruido que se presenta cuando el motor utiliza solo petróleo Diesel.
2. Realizar el modelamiento de la combustión del combustible bifásico biogás-Diesel de tal manera que se pueda predecir, con mayor

aproximación, el comportamiento de un motor Diesel al utilizar biogás como combustible

3. Luego de tener el conocimiento de como se comporta el motor petrolero estacionario al utilizar como combustibles petróleo Diesel y biogás simultáneamente es conveniente realizar el estudio de los requerimientos para utilizar estos dos combustibles en motores de automóviles .
4. Por último, recomiendo seguir investigando las diversas formas de utilizar las energías renovables en nuestro medio, con la intención de cuidar el medio ambiente y mejorar el nivel de vida de las personas

## BIBLIOGRAFÍA

### Referente a los antecedentes ,al biogás, propiedades y usos:

- [1] **Oliveros Donohue, A.**, Informe Final. Proyecto de investigación : “Uso del biogás en motores”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú. Febrero del 2000.
- [2] **Lira Cacho, G.**, Informe Técnico. Proyecto de Investigación : “Diseño, construcción y pruebas del sistema de suministro de biogás para un motor de combustión interna”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. Marzo del 2003.
- [3] **Lira Cacho, J.G., Oliveros Donohue, A., Figueroa Reynoso, R.**, “Generación Eléctrica a partir de biogás”, Revista TECNIA Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Octubre del 2000.
- [4] **Oliveros Donohue, A.**, “Tecnología Energética y Desarrollo”, Ediciones Tecnología y Sociedad, Editorial Tarea. Lima, Perú. 1990.
- [5] **Trelles Salvador, J. P.**, Tesis de Competencia Profesional: “Modelamiento y optimización del diseño de un carburador para biogás”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. 2001.
- [6] **Constant, M., Naveau, H., Ferrero, G., Nyns, E.**, “Biogás end-use in the European Community”, Commission of the European Communities.
- [7] **Ortega Rodríguez, Mario**, “Energías Renovables”, editorial Paraninfo. España. 2000 .

**Referente a Motores de Combustión Interna :**

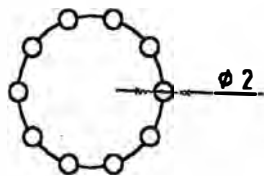
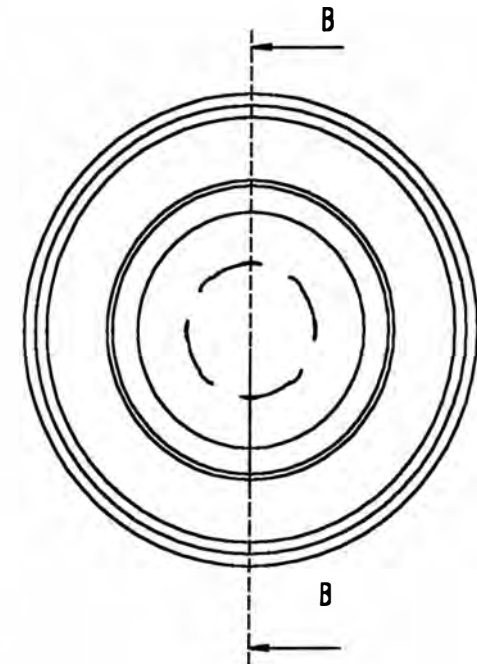
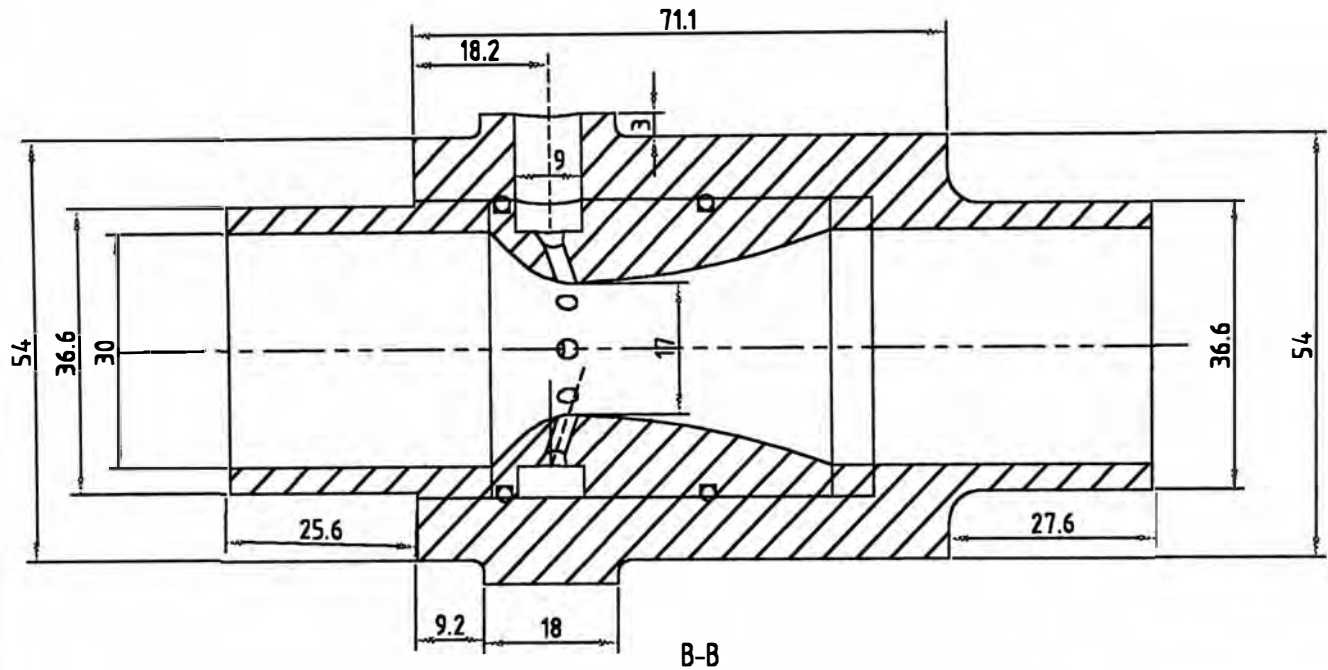
- [8] **Mitzlaff, k. Von**, “Engines for biogás”, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE. Alemania. 1988.
- [9] **Jovaj, M. S.**, “Motores de Automóvil”, Editorial MIR. Moscú. 1982.
- [10] **Heywood, J. B.**, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, Editorial McGraw-Hill, Massachusetts, United States of America. 1988.
- [11] **Vsórov, B.A.**, “Manual de Motores Diesel para tractores”, Editorial Mir, Moscú. 1986.
- [12] **Lira Cacho, J.G., Oliveros Donohue, A., Barrera Jordán**, “Sistema de Alimentación de Biogás para un motor de Combustión Interna” Revista TECNIA Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Julio del 2003.
- [13] **Lira Cacho, J.G.**, “Inyección de gas licuado de petróleo en los motores Diesel”, Revista TECNIA Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Noviembre de 1996.

**Otros:**

- [14] **Ministerio de Energía y Minas**, “Eficiencia energética”, Proyecto para ahorro de energía, Lima, Perú, 1999.
- [15] **Bernard Lewis, Guenther von Elbe**, “Combustion, flames and explosions of gases”, Academic Press Inc., New York, EE.UU., 1961.
- [16] **Manual LISTER**, “Instruction book and parts list”, R. A. Lister and Co. Ltd. Inglaterra, 1980.
- [17] <http://mail.inenco.net/~asadedit/averma3/06-09.pdf>
- [18] <http://www.hsph.harvard.edu/press/releases/press01102000.html>
- [19] <http://www.aladi.org/nsfaladi/zonasfrancas.nsf/zonafrancaweb/26BA9B6925E21B1B03256DEF00560BB9>

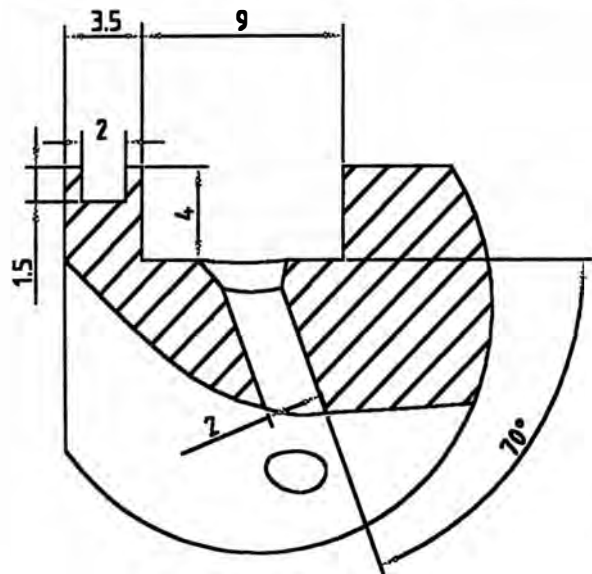
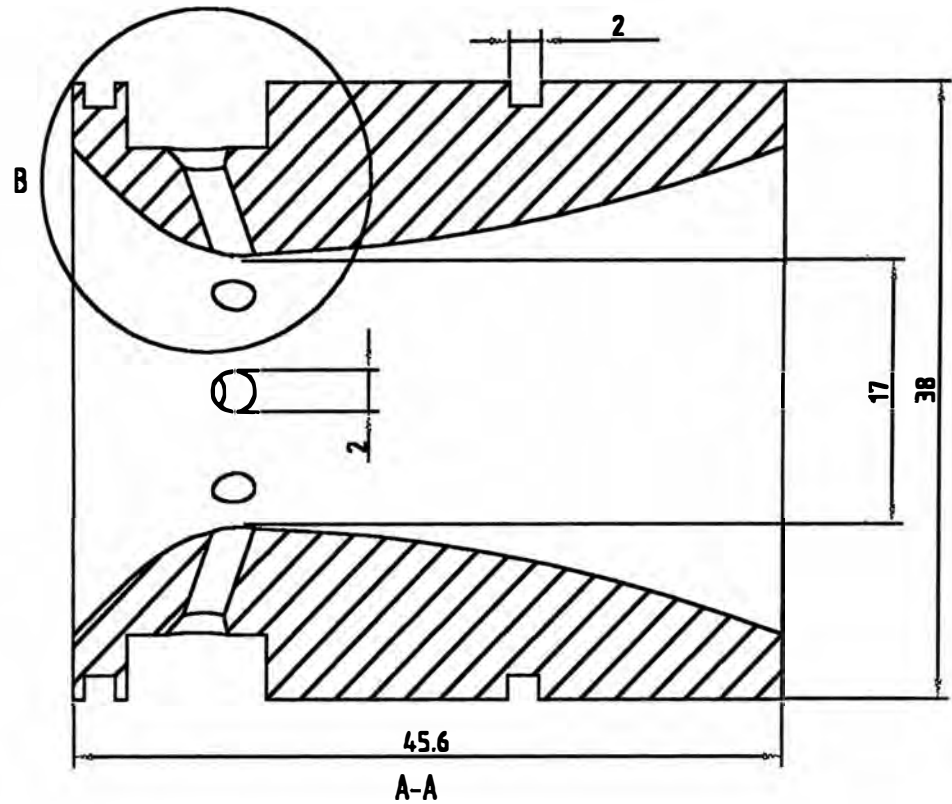
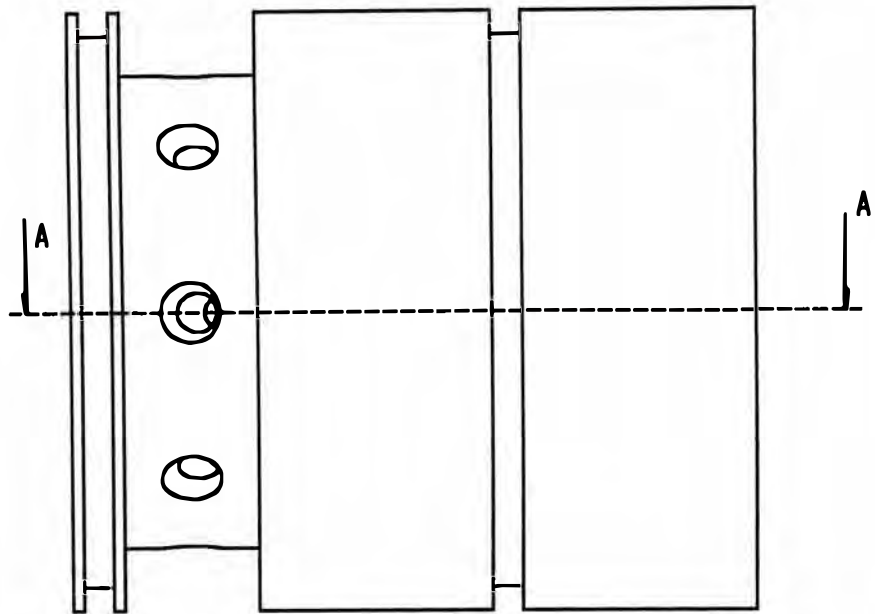
# PLANOS





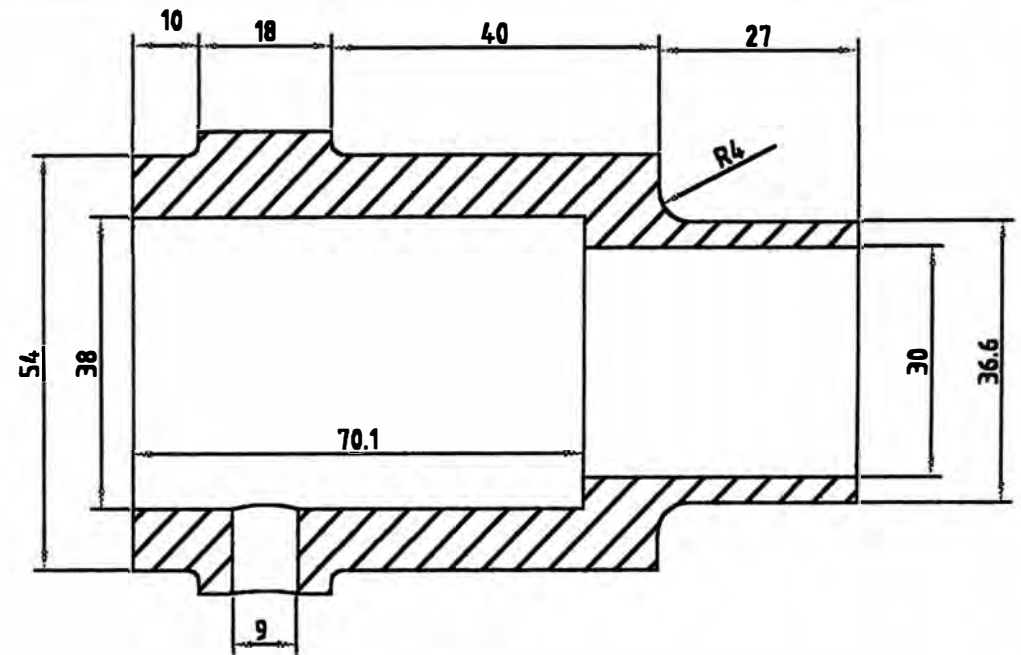
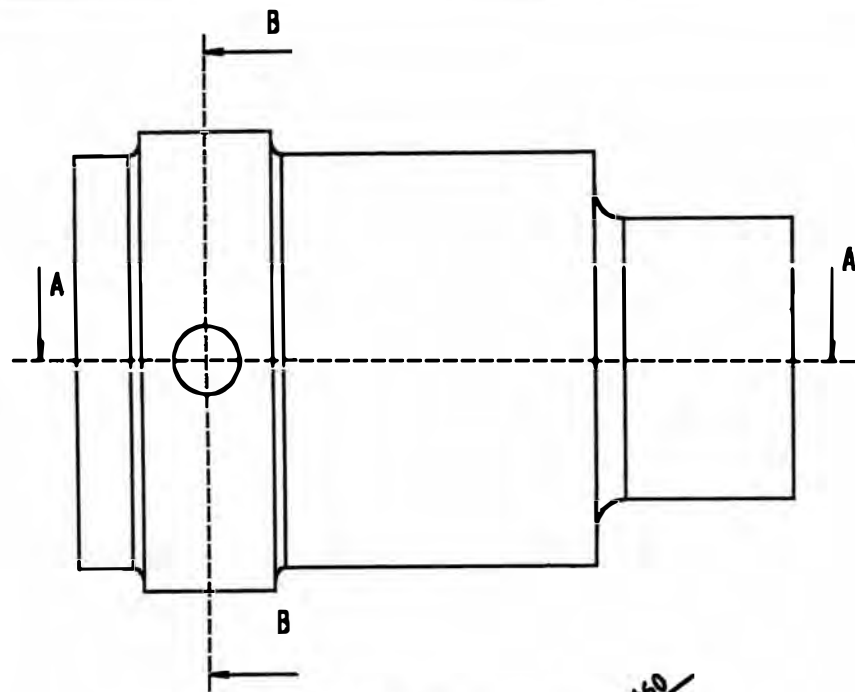
Agujeros en la garganta

Observaciones	Código	Escala	Reemplazado por:			
Denominación	TOBERA $\phi$ int.17 - CARCASA MONTAJE		Reemplazo de:	Fecha	Nombre	Area
		1:1	Diseño	Equipo Inv.		
			Dibujo	06 - 2003	R. O. Castro	
			Aprobado			
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA		Modificado	a			
Facultad de Ingeniería Mecánica			b			
			c			
			d			

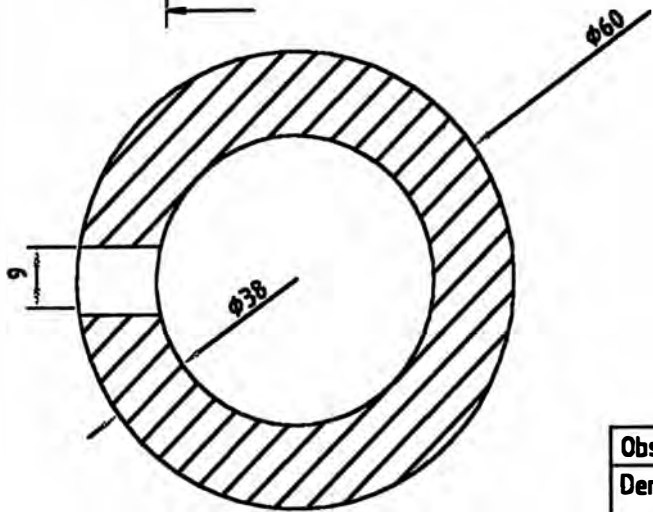


B (3:1)

Observaciones	Código	Escala	Reemplazado por:		
Denominación			Reemplazo de:		
TOBERA $\phi$ int.17		2:1	Fecha	Nombre	Area
			Diseño	Equipo Inv.	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Facultad de Ingeniería Mecánica			Dibujo	06 - 2003	R. O. Castro
			Aprobado		
Modificado	a				
	b				
	c				
	d				



A-A



B (3:1)

Observaciones	Código	Escala	Reemplazado por:		
Denominación		1:1	Reemplazo de:		
CARCASA DEL MEZCLADOR				Fecha	Nombre
		Diseño		Equipo Inv.	
		Dibujo	06 - 2003	R. O. Castro	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA		Modificado	a		
Facultad de Ingeniería Mecánica			b		
			c		
			d		

# PROTOSCOLOS DE PRUEBAS

**PROYECTO: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS Y DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN MOTOR DIESEL”**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS**

**TIPO DE ENSAYO: COMPORTAMIENTO DEL MOTOR LISTER FUNCIONANDO CON DIESEL**

**CONDICIONES DE ENSAYO:**

MODELO DEL MOTOR : SL2  
 RELACIÓN DE COMPRESIÓN : 19,5  
 DIÁMETRO DE LA TOBERA : 17mm (con 8 agujeros de  $\phi$  2mm )

**CONDICIONES AMBIENTALES:**

Po : 754.3 mmHg  
 To : 22 °C  
 $\rho_{\text{aire}}$  : 1,187 (kg/m<sup>3</sup>)  
 FECHA: 12/01/2004  
 DURACIÓN DE LA PRUEBA: 35'

**PROTOCOLO N°1**

(Parte 1: Parámetros medidos)

N° de focos	RPM	Frec.(Hz)	Voltaje(V)	Corriente(A)	Flujo de Petróleo		Flujo de aire dh(cm h2O)	Gases de escape		Ruido (db)	Tairerefrig-sal (°C)
					Vol(cc)	t(s)		Opacidad(%)	Temp (°C)		
0	1866	62.27	238.06	0.00	3	10.97	8.9	38.10%	154	95.0	46.0
5	1861	61.90	235.10	2.07	3	10.68	8.8	41.90%	160	94.0	47.0
10	1856	61.70	232.30	4.42	3	9.52	8.8	47.70%	172	95.0	48.0
15	1844	61.40	229.00	6.60	3	8.87	8.7	52.30%	182	95.0	50.0
20	1838	61.20	227.50	8.76	3	8.18	8.5	50.90%	200	95.0	52.0
25	1835	61.00	226.70	11.20	3	7.52	8.4	53.90%	214	95.0	53.0
30	1825	60.70	224.50	13.66	3	6.86	8.3	57.10%	227	95.0	54.5
35	1823	60.70	224.00	15.79	3	6.59	8.1	57.80%	244	95.0	57.0
40	1816	60.40	222.90	17.20	3	6.07	8.0	58.00%	259	95.0	59.0
45	1806	60.20	221.00	19.60	3	5.56	7.8	61.70%	294	95.0	63.0



**PROYECTO: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS Y DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN MOTOR DIESEL”**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS**

**TIPO DE ENSAYO: COMPORTAMIENTO DEL MOTOR LISTER FUNCIONANDO CON DIESEL**

**PROTOCOLO N°1**

**(Parte 2: Parámetros calculados)**

Potencia eléctrica (KW)	Consumo de diesel(Gc) (L/h)	Consumo específico de D2 (L/(KWh))	Flujo de aire de admisión (Ga) (kg/h)	$\eta$ volumétrica	$\eta$ térmica efectiva	Coef. de exceso de aire
0.00	0.98		44.60	75.9%	0.0%	3.68
0.49	1.01	2.078	44.35	75.5%	6.1%	3.57
1.03	1.13	1.105	44.35	75.5%	11.4%	3.18
1.51	1.22	0.806	44.09	75.1%	15.7%	2.94
1.99	1.32	0.662	43.58	74.2%	19.0%	2.68
2.54	1.44	0.566	43.33	73.8%	22.3%	2.45
3.07	1.57	0.513	43.07	73.3%	24.6%	2.22
3.54	1.64	0.463	42.55	72.4%	27.2%	2.11
3.83	1.78	0.464	42.28	72.0%	27.2%	1.93
4.33	1.94	0.448	41.75	71.1%	28.1%	1.75

**PROYECTO: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS Y DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN MOTOR DIESEL”**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS**

**TIPO DE ENSAYO: COMPORTAMIENTO DEL MOTOR LISTER FUNCIONANDO CON DIESEL Y BIOGÁS**

**CONDICIONES DE ENSAYO:**

MODELO DEL MOTOR : SL2  
 RELACIÓN DE COMPRESIÓN : 19,5  
 DIÁMETRO DE LA TOBERA : 17mm (con 8 agujeros de  $\phi$  2mm )

**CONDICIONES AMBIENTALES:**

Po : 754.3 mmHg  
 To: 22 °C  
 $\rho_{\text{aire}} : 1,187 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

FECHA: 12/01/2004

DURACIÓN DE LA PRUEBA: 45'

**PROTOCOLO N°2**

(Parte 1: Parámetros medidos)

N° de focos	RPM	Frec.(Hz)	Voltaje(V)	Corriente(A)	Flujo de Petróleo		Flujo de Biogás		Flujo de aire dh(cm h2O)	Gases de escape		Ruido (db)	Tairerefrig- sal (°C)
					Vol(cc)	t(s)	Vol(L)	t(s)		Opacidad(%)	Temp (°C)		
0	1869	62.30	235.0	0.00	3	18.62	10	39.70	8.5	25.90%	140	95.0	54.0
5	1869	62.58	234.3	1.93	3	16.45	10	39.80	8.4	29.70%	152	95.0	54.5
10	1866	62.32	231.6	4.24	3	14.59	10	41.09	8.3	32.80%	170	95.0	56.0
15	1861	62.16	230.2	6.10	3	12.96	10	41.70	8.3	38.50%	191	95.0	58.5
20	1860	61.99	229.0	8.30	3	11.23	10	41.80	8.1	41.70%	215	95.0	60.0
25	1855	61.80	227.7	10.20	3	10.17	10	41.86	7.9	50.10%	236	95.0	62.0
30	1849	61.60	226.5	13.00	3	8.83	10	42.50	7.7	52.80%	257	95.0	64.0
35	1845	61.40	225.8	15.80	3	7.98	10	42.50	7.6	58.60%	274	95.0	65.5
40	1838	61.19	224.3	18.00	3	7.09	10	42.38	7.6	59.30%	295	95.0	66.5
44	1829	60.20	223.8	19.50	3	6.81	10	41.52	7.5	65.30%	321	95.0	69.0

**PROYECTO: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS Y DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN MOTOR DIESEL”**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS**

**TIPO DE ENSAYO: COMPORTAMIENTO DEL MOTOR LISTER FUNCIONANDO CON DIESEL Y BIOGÁS**

**PROTOCOLO N°2**

**Parte 2: Parámetros calculados**

Pot. eléctrica (KW)	Consumo de diesel(Gc) (L/h)	Consumo específico de D2 (ge_D2) (L/(KWh))	Flujo de aire de admisión (Ga) (kg/h)	$\eta$ volumétrica	$\eta$ térmica ef.	Coef. de exceso de aire
0.00	0.58		43.58	74.2%	0.0%	4.38
0.45	0.66	1.452	43.33	73.8%	4.7%	3.98
0.98	0.74	0.754	43.07	73.3%	9.8%	3.64
1.40	0.83	0.593	43.07	73.3%	13.1%	3.33
1.90	0.96	0.506	42.55	72.4%	16.2%	2.94
2.32	1.06	0.457	42.02	71.5%	18.5%	2.67
2.94	1.22	0.415	41.48	70.6%	21.4%	2.35
3.57	1.35	0.379	41.21	70.2%	24.1%	2.14
4.04	1.52	0.377	41.21	70.2%	25.0%	1.93
4.36	1.59	0.363	40.94	69.7%	26.1%	1.85

Consumo horario de Biogás (Gb) (m <sup>3</sup> /h)	Consumo específico de Biogás (ge_bio) (m <sup>3</sup> /(KWh))	Porcentaje másico de D2	Diesel dejado de consumir (%)
0.91		40.0%	0.42
0.90	2.00	43.1%	0.3714
0.88	0.89	46.8%	0.3451
0.86	0.61	50.1%	0.2786
0.86	0.45	53.8%	0.2424
0.86	0.37	56.3%	0.2142
0.85	0.29	60.1%	0.2026
0.85	0.24	62.5%	0.1818
0.85	0.21	65.1%	0.1758
0.87	0.20	65.6%	0.175



# ANEXOS

---

**ANEXO 1: PROGRAMA Mezclador\_DieselBiogas**


---

```

%%% MODELACIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN MEZCLADOR DE AIRE Y BIOGAS %%%
%%% - MEZCLADOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS EN UN MOTOR DIESEL- %%%
mezclador_DieselBiogas
%CONSIDERACIONES:
%flujo estacionario, sin desprendimiento de la capa límite,
%compresible, subsónico, turbulento desde el inicio, gases ideales.
%REQUIERE DEL SUBPROGRAMA: MOODY
clear,clc
t0=cputime;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARÁMETROS DEL PERFIL: %%%%%%%%%
disp(' ')
fprintf(' PARÁMETROS DEL PERFIL \n');
D=input(' diámetro de ingreso (mm) :'); %30.3mm
d=input(' diámetro de la garganta (mm) :'); %17mm D/d <1.25 1.67>
alfa=input(' ángulo de ingreso (°) <40-50° :'); %45°
beta=input(' ángulo de salida (°) <15-25° :'); %20°
L_h=input(' razón L/h <6.5-7.5 :'); %7.0
Ll_L=input(' razón Ll/L <0.20-0.25 :'); %0.22
L0=input(' longitud anterior (mm) :'); %10
Lpos=input(' longitud posterior (mm) :'); %10
dg=input(' diámetro de los agujeros (mm) :'); %<2 4>=2.5
naguj=input(' número de agujeros :'); %8

alfa=alfa*pi/180; % (rad) ángulo inicial del perfil
beta=beta*pi/180; % (rad) ángulo final del perfil
R=D/2; % (cm) radio del ducto
h=R-d/2; % (cm) máxima altura (en la garganta)
L=L h*h; % (cm) longitud del perfil
Ll=Ll_L*L; % (cm) longitud a la altura h

dg=dg/1000; % (m) diámetro de los agujeros para el biogás
fiaguj=2*pi/naguj; % (rad) ángulo entre agujeros
RA=naguj*dg^2/(.01)^2; % (naguj*Agujeros/Aanillo de alimentación)<0.5
Cdg=.98; % coeficiente de descarga de los agujeros

dz=Ll/15;

%TRAMO ANTERIOR:
z0=-L0:dz:-dz;
y0=z0*0;
dy0=z0*0;
%PRIMER TRAMO:
M=[1 0 0 0;
 1 Ll Ll^2 Ll^3;
 0 1 0 0;
 0 1 2*Ll 3*Ll^2];
B=[0 h tan(alfa) 0]';
A=inv(M)*B;
P1=[A(4) A(3) A(2) A(1)];

```

```

dP1=polyder(P1);
z1=0:dz:L1;
y1=polyval(P1,z1);
dy1=polyval(dP1,z1);
%SEGUNDO TRAMO:
M=[1 L1 L1^2 L1^3;
    0 1 2*L1 3*L1^2;
    1 L L^2 L^3;
    0 1 2*L 3*L^2];
B=[h; 0; 0; tan(pi-beta)];
A=inv(M)*B;
P2=[A(4) A(3) A(2) A(1)];
dP2=polyder(P2);
z2=L1+dz:dz:L;
y2=polyval(P2,z2);
dy2=polyval(dP2,z2);
%TRAMO POSTERIOR:
z3=L+dz:dz:L+Lpos;
y3=z3*0;
dy3=z3*0;

z=[z0 z1 z2 z3];
y=[y0 y1 y2 y3];
dy=[dy0 dy1 dy2 dy3];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% AIRE Y COMBUSTIBLE GASEOSO: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%datos ambientales:
Patm=101.3;           %(kPa)presión atmosférica
Tamb=22+273.16;      %(K)temperatura ambiente

%datos del aire:
Cpaire=1.0035;       %(kJ/kg/K)calor específico
Raire=.287;         %(kJ/kg/K)constante del aire
kaire=1.438-.00015*Tamb;%exponente adiabático del aire
roaire=Patm/Raire/Tamb; %(kg/m^3)densidad del aire
mu=175e-7;          %(N.s/m^2)viscosidad dinámica del aire

%datos del gas:
Pgas=Patm+0*.1020736216;   %(kPa)presión del gas
%(1kPa=102.073621604mmH2O)
Tgas=Tamb+2;              %(K)temperatura del gas
%composición volumétrica: [N2 CO2 CH4 C2H6 C3H8 O2]
CV=[0 0.4 0.6 0 0 0];    %(línea 93) BIOGÁS
%CV=[.006 .002 .884 .104 .004]; %GAS NATURAL
porN2=CV(1);
porCO2=CV(2);
porCH4=CV(3);
porC2H6=CV(4);
porC3H8=CV(5);
porO2=CV(6);
%pesos moleculares:
pmN2=28.01;
pmCO2=44.01;

```

```

pmCH4=16.04;
pmC2H6=30.07;
pmC3H8=44.09;
pmO2=36;
%composición másica: fm
MT=porN2*pmN2+porCO2*pmCO2+porCH4*pmCH4+porC2H6*pmC2H6+...
    porC3H8*pmC3H8+porO2*pmO2;
fmN2=porN2*pmN2/MT;
fmCO2=porCO2*pmCO2/MT;
fmCH4=porCH4*pmCH4/MT;
fmC2H6=porC2H6*pmC2H6/MT;
fmC3H8=porC3H8*pmC3H8/MT;
fmO2=porO2*pmO2/MT;
%relación aire - combustible estequiométrica:
lo=6.056; %
=137.28*(2*porCH4+3.5*porC2H6+5*porC3H8)/(16*porCH4+30*porC2H6+44*porC3H8
+44*porCO2+28*porN2)(cambiar esta formula);

%constantes particulares de los gases: (kJ/kg/K)
RN2=.2968;
RCO2=.18892;
RCH4=.51835;
RC2H6=.2765;
RC3H8=.18855;
RO2=.2598;
Rgas=fmN2*RN2+fmCO2*RCO2+fmCH4*RCH4+fmC2H6*RC2H6+fmC3H8*RC3H8+fmO2*RO2;
%calor específico a presión constante: (kJ/kg/K)
%Cp= f(T): (valido 300 - 1500K)
th=Tgas/100;
CpN2=(39.06-512.79*th.^-1.5+1072.7*th.^-2-820.4*th.^-3)/pmN2;
CpCO2=(-3.7357+30.529*th.^(.5)-4.1034*th+.024198*th.^2)/pmCO2;
CpCH4=(-672.87+439.74*th.^(.25)-24.875*th.^(.75)+...
    323.88*th.^(-.5))/pmCH4;
CpC2H6=(6.895+17.26*th-.6402*th.^2+.00728*th.^3)/pmC2H6;
CpC3H8=(-4.042+30.46*th-1.571*th.^2+.03171*th.^3)/pmC3H8;
CpO2=(37.432+0.020102*th.^1.5-178.57*th.^-1.5+236.88*th.^-2)/pmN2;
Cpgas=fmN2*CpN2+fmCO2*CpCO2+fmCH4*CpCH4+fmC2H6*CpC2H6+...
    fmC3H8*CpC3H8+fmO2*CpO2;
%calor específico a volumen constante: (kJ/kg/K)
Cvgas=Cpgas-Rgas;
%exponente adiabático del gas:
kgas=Cpgas/(Cpgas-Rgas);
%densidad del gas: (kg/m^3)
rogas=Pgas/Rgas/Tgas;

%%%%%%%%%% MOTOR PARA COMBUSTIBLE GASEOSO: %%%%%%%%%%%
disp(' ')
fprintf('      DATOS DEL MOTOR      \n')
Vhi=input(' cilindrada del motor (cc)           :'); %916cc
Nnom=input(' velocidad nominal (RPM)           :'); %1800RPM
Vhi=Vhi/1e6; % (m^3)cilindrada del motor
Nv=.80; %eficiencia volumétrica
Ne=6.34; % (kW)potencia nominal

```

```

dm=Vhi*Nv*roaire*Nnom/2/60; %(kg/s)gasto másico nominal de aire

%%% EXPONENTE DEL PERFIL DE VELOCIDADES TURBULENTO %%%%%%%%%%%
% según la ley de la potencia de Prandtl n = f(Re)
Redata=[4e3 2.3e4 1.1e5 1.1e6 2e6 3.2e6];
Relog=log(Redata);
ndata=[6 6.6 7 8.8 10 10];
pp=spline(Relog,ndata);

%%%%%%%%%% VARIABLES: %%%%%%%%%%%
nh=length(z); %número de nodos horizontales
nv=round(.4*nh); %número de nodos verticales
zn=zeros(nv,nh); %divisiones en el eje z
rn=zeros(nv,nh); %divisiones en el eje r
d=zeros(1,nh); %(mm)espesor de la capa límite
Vm=zeros(1,nh); %(m/s)velocidad media del aire
Vzmax=zeros(1,nh);%(m/s)velocidad máxima del aire
Vz=zeros(nv,nh); %(m/s)velocidad axial
Vr=zeros(nv,nh); %(m/s)velocidad radial
V=zeros(nv,nh); %(m/s)velocidad
ro=ones(nv,1); %(kg/m^3)densidad en una seccion
P=zeros(nv,nh); %(kPa)presión en la tobera
Pm=zeros(1,nh); %(kPa)presión media en la tobera
mud2V=zeros(1,nh);%mu*d^2V/dr^2|(r=R-y)

%%%%%%%%%% DESARROLLO: %%%%%%%%%%%
%volumen de influencia:
jm=round((L1+L0)/dz);%posición de los agujeros (h)
j0=jm-2; %posición inicial en z
jfin=jm+5; %posición final en z
i0=nv-3; %posición inicial en r
ifin=nv; %posición final en r
Vol=0; %volumen de influencia
Pcp=0; %contrapresión al flujo de gas

%condiciones iniciales:
Vm(1)=dm/pi/R^2/roaire*1e6;
Vzmax(1)=Vm(1);
Re=roaire*Vm(1)*R/500/pi/mu;
Pm(1)=Patm;
ro=roaire*ro;
Tm=Tamb;
H=Pm(1)/roaire+Vm(1)^2/2000;
dH=0;
d(1)=eps; %sin desarrollar
%d(1)=R-eps; %completamente desarrollado
dP(1)=0;
aux=0;
j_intersec=1;

r=0:1/(nv-1):1; %radio adimensional
dPm=1e-4;

```

```

for j=1:nh
    zn(:,j)=z(j);
    %Corección por energía cinética
    a=1;%< 1 (n+1)^3*(2*n+1)^3/(n+3)/(2*n+3)/4/n^4 >;
    %rugosidad absoluta de la geometría
    if z(j)>0 & z(j)<L,
        rug=.05e-3; %bronce pulido
    else
        rug=.12e-3; %acero
    end
    %Factor de fricción
    f=MOODY(rug/2/(R-y(j))*1000,Re);
    %Exponente ley de la potencia de Prandtl
    if Re<2e6,
        n=ppval(pp,log(Re));
    else
        n=10;
    end %n=f^-0.5
    %Energía específica
    if j>1
        dH=f*Vm(j)^2/2000*sqrt(1+dy(j)^2)/2/(R-y(j))*dz;
        H=H-dH;
    end
    %Propiedades medias
    if j<nh
        %Presión
        Pm(j+1)=Pm(j)-dPm;
        for l=1:20 %Newton - Raphson
            F=kaire*Raire/(kaire-1)*Tm*(1-(Pm(j+1)/Pm(j))^(1-1/kaire))-...
                a*Vm(j)^2/2000*((R-y(j))/(R-y(j+1)))^4*(Pm(j)/Pm(j+1))...
                ^((2/kaire)-1)-dH;
            dF=-kaire*Raire/(kaire-1)*Tm*(1-1/kaire)/Pm(j)^(1-1/kaire)/...
                Pm(j+1)^(1/kaire)-a*Vm(j)^2/2000*((R-y(j))/(R-y(j+1)))...
                ^4*(-2/kaire)*Pm(j)^(2/kaire)/Pm(j+1)^(1+2/kaire);
            Pm(j+1)=Pm(j+1)-F/dF;
            if abs(F/dF)<1e-5, break
        end
    end
    %Velocidad media
    Vm(j+1)=Vm(j)*((R-y(j))/(R-y(j+1)))^2*(Pm(j)/Pm(j+1))^(1/kaire);
    %Temperatura
    Tm=Tm*(Pm(j+1)/Pm(j))^(1-1/kaire);
    %Exponente adiabático
    kaire=1.438-.00015*Tm;
    %Densidad
    roaire=roaire*(Pm(j+1)/Pm(j))^(1/kaire);
    %Número de Reynolds
    Re=roaire*Vm(j+1)*(R-y(j+1))/500/pi/mu;
end
%Espesor de la capa límite y velocidad máxima
if j>1
    if d(j-1)<=R-y(j)&aux==0, %Runge Kutta 4

```

```

C1=(n+1)*(n+2)*(2*n+1)*(R-y(j-1))*f/8/n/((2*n+1)*(R-y(j-1))+...
(n+2)*d(j-1));
C2=(R-y(j-1))^2/((R-y(j-1)-d(j-1))^2+...
2*n^2/(2*n+1)/(n+1)*d(j-1)^2);
C3=2*(R-y(j-1)-d(j-1))*dy(j-1)/(R-y(j-1))^2;
C4=C3/(R-y(j-1))^2*(4*n^2*d(j-1)/(n+1)/(2*n+1)-...
2*(R-y(j-1)-d(j-1)));
d1=dz*(C1/C2^2-C3*d(j-1))/(1-C4*d(j-1));
yaux=.5*(y(j-1)+y(j));
C1=(n+1)*(n+2)*(2*n+1)*(R-yaux)*f/8/n/((2*n+1)*(R-yaux)+...
(n+2)*(d(j-1)+d1/2));
C2=(R-yaux)^2/((R-yaux-(d(j-1)+d1/2))^2+...
2*n^2/(2*n+1)/(n+1)*(d(j-1)+d1/2)^2);
C3=2*(R-yaux-(d(j-1)+d1/2))*5*(dy(j-1)+dy(j))/(R-yaux)^2;
C4=C3/(R-yaux)^2*(4*n^2*(d(j-1)+d1/2)/(n+1)/(2*n+1)-...
2*(R-yaux-(d(j-1)+d1/2)));
d2=dz*(C1/C2^2-C3*(d(j-1)+d1/2))/(1-C4*(d(j-1)+d1/2));
C1=(n+1)*(n+2)*(2*n+1)*(R-yaux)*f/8/n/((2*n+1)*(R-yaux)+...
(n+2)*(d(j-1)+d2/2));
C2=(R-yaux)^2/((R-yaux-(d(j-1)+d2/2))^2+...
2*n^2/(2*n+1)/(n+1)*(d(j-1)+d2/2)^2);
C3=2*(R-yaux-(d(j-1)+d2/2))*5*(dy(j-1)+dy(j))/(R-yaux)^2;
C4=C3/(R-yaux)^2*(4*n^2*(d(j-1)+d2/2)/(n+1)/(2*n+1)-...
2*(R-yaux-(d(j-1)+d2/2)));
d3=dz*(C1/C2^2-C3*(d(j-1)+d2/2))/(1-C4*(d(j-1)+d2/2));
C1=(n+1)*(n+2)*(2*n+1)*(R-y(j))*f/8/n/((2*n+1)*(R-y(j))+...
(n+2)*(d(j-1)+d3));
C2=(R-y(j))^2/((R-y(j)-(d(j-1)+d3))^2+...
2*n^2/(2*n+1)/(n+1)*(d(j-1)+d3)^2);
C3=2*(R-y(j)-(d(j-1)+d3))*dy(j)/(R-y(j))^2;
C4=C3/(R-y(j))^2*(4*n^2*((d(j-1)+d3))/(n+1)/(2*n+1)-...
2*(R-y(j)-(d(j-1)+d3)));
d4=dz*(C1/C2^2-C3*(d(j-1)+d3))/(1-C4*(d(j-1)+d3));

d(j)=d(j-1)+1/8*(d1+3*d2+3*d3+d4);
Vzmax(j)=(R-y(j))^2/((R-y(j)-d(j))^2+...
2*n^2/(2*n+1)/(n+1)*d(j)^2)*Vm(j);
else
aux=1;
d(j)=R-y(j);
Vzmax(j)=(n+1)*(2*n+1)/2/n^2*Vm(j);
end
end
%Velocidades
for i=1:nv
rn(i,j)=(i-1)/(nv-1)*(R-y(j));
if rn(i,j)>=R-y(j)-d(j),
Vz(i,j)=Vzmax(j)*((R-y(j)-rn(i,j))/d(j))^(1/n);
else
Vz(i,j)=Vzmax(j);
end
Vr(i,j)=Vz(i,j)*(-dy(j))*r(i);
V(i,j)=sqrt(Vr(i,j)^2+Vz(i,j)^2);

```

```

%Presión
if j>1,
    if rn(i,j)>R-y(j)-d(j),
        P(i,j)=P(i,j-1)*(1-((V(i,j)^2-V(i,j-1)^2)/2000-...
            dH*(rn(i,j)-(R-y(j)-d(j)))/d(j))*...
            ro(i)*Raire/Cpaire/P(i,j-1)^(kaire/(kaire-1)));
        ro(i)=ro(i)*(P(i,j)/P(i,j-1))^(1/kaire);
    else
        P(i,j)=P(i,j-1)*(1-((V(i,j)^2-V(i,j-1)^2)/2000)*...
            ro(i)*Raire/Cpaire/P(i,j-1)^(kaire/(kaire-1)));
        ro(i)=ro(i)*(P(i,j)/P(i,j-1))^(1/kaire);
    end
else
    if rn(i,j)>R-y(j)-d(j),
        P(i,j)=Patm*(1-((V(i,j)^2-Vm(1)^2)/2000-...
            dH*(rn(i,j)-(R-y(j)-d(j)))/d(j))*...
            ro(i)*Raire/Cpaire/Patm^(kaire/(kaire-1)));
        ro(i)=ro(i)*(P(i,j)/Patm)^(1/kaire);
    else
        P(i,j)=Patm*(1-((V(i,j)^2-Vm(1)^2)/2000)*...
            ro(i)*Raire/Cpaire/Patm^(kaire/(kaire-1)));
        ro(i)=ro(i)*(P(i,j)/Patm)^(1/kaire);
    end
end
end
%Volumen de influencia para el flujo de gas
if j>=j0&j<=jfin&i>=i0&i<=ifin
    Vol=Vol+dz/(nv-1)*fiaguj*rn(i,j);
    Pcp=Pcp+dz/(nv-1)*fiaguj*rn(i,j)*P(i,j);
end
end
%Condición de desprendimiento de la C.L.
mud2V(j)=f*roaire*Vm(j)^2/2/D*1e4; %flujo turbulento
if j>1,
    dP(j)=(Pm(j)-Pm(j-1))/dz*1e6;
    if j>round((L0+L1)/dz),
        if (abs(mud2V(j)-dP(j))<minVP)&j intersec==1,
            minVP=abs(mud2V(j)-dP(j));
            j intersec=j;
        end
    end
else
    minVP=abs(mud2V(j)-dP(j));
end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VALORES: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pcp=Pcp/Vol; % (kPa) contrapresión al flujo de gas

%flujo de gas:
Vg=sqrt(2000*Cpgas*Tgas*(1-(Pcp/Pgas)^(1-1/kgas))/...
    (1-(RA/naguj)^2*(Pcp/Pgas)^(2/kgas))); % (m/s) velocidad del gas
dmg=Cdg*naguj*pi*dg^2/4*rogas*(Pcp/Pgas)^(1/kgas)*Vg; % (kg/s) dm gas

```



```

%coeficiente de exceso de aire:
alfa=dm/dmg/lo;

%aire:
Vmax=max(Vzmax);
Remax_aire=roaire*Vmax*(D-2*max(y))/1000/mu;%número de Reynolds
Mmax_aire=Vmax/sqrt(1000*kaire*Raire*Tamb);%número de Mach

%gas:
Re_gas=rogas*(Pcp/Pgas)^(1/kgas)*Vg*dg/mu; %número de Reynolds
M_gas=Vg/sqrt(1000*kgas*Rgas*Tgas); %número de Mach

%alfa de la mezcla
add
pcbiogas=19; %28.2631;%MJ/Kg
dvdieselral=.1;% 20%de 1.94L/h %flujo volumétrico del diesel (cc/s)
dvdieselmax=2000/3600; %2700/3600;%flujo volumetrico max del
diesel (cc/s)
rodiesel=0.86;%(gr/cc)
pcdiesel=41.4840;%MJ/Kg
lodiesel=14.23;
dmd=dvdieselral*rodiesel/1000; %(Kg/s)
lomezcla=lodiesel*(dmd/dmg+dmd)+lo*(dmg/dmg+dmd);
alfamezcla=dm/(dmg+dmd)/lomezcla;
dmgrequer=(dvdieselmax*rodiesel/1000-dmd)*pcdiesel/pcbiogas*3600;
%(m^3/h)

disp(' ')
fprintf(' RESULTADOS \n')
fprintf(' Pmin=%2.2f mbar,Pcp=%2.2f mbar\n',(min(P(:,nv))-Patm)*10
,(Pcp-Patm)*10)
fprintf(' Caída de presión=%2.2f mbar\n',(Patm-Pm(length(z)))*10)
fprintf(' dm_aire=%1.2f m^3/h, dm_gas=%1.2f m^3/h \n',dm/roaire*60*60
,dmg/rogas*60*60)
fprintf(' dm_gasrequerido=%1.2f m^3/h \n',dmgrequer) %add
fprintf(' alfa_aparente=%1.2f \n',alfa)
fprintf(' alfa mezcla=%1.2f \n',alfamezcla) %add

fprintf(' Vmax_aire=%2.2f m/s,V_gas=%2.2f m/s \n',Vmax,Vg)
fprintf(' Remax_aire=%4.0f, Mmax_aire=%1.2f\n',Remax_aire,Mmax_aire)
if Mmax_aire>1, fprintf('CHOQUE EN LA GARGANTA \n'), end
fprintf(' Re_gas=%4.0f, M_gas=%1.2f\n',Re_gas,M_gas)
fprintf(' Descarga al punto de inicio del desprendimiento=%2.2f mm\n',...
(z(j intersec)-L1))
disp(' ')
fprintf(' PERFIL DE LA TOBERA (z,y) en mm \n')
z0=[z1(1:5:length(z1)) z2(1:5:length(z2))]'
y0=[y1(1:5:length(y1)) y2(1:5:length(y2))]'

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GRÁFICOS: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
figure
maxr=max(max(dP),max(mud2V));
minr=min(min(dP),min(mud2V));
plot(z,mud2V,z,dP,'r',z,y*(maxr-minr)/2/R+minr,'g',...
      z,(2*R-y)*(maxr-minr)/2/R+minr,'g',z,...
      minr*ones(size(z)),'g',z,maxr*ones(size(z)),'g')
axis([z(1) z(length(z)) minr maxr]);
text(z(55),mud2V(55),'f*ro*V^2/2/D')
text(z(25),dP(25),'dP/dz')
title('CONDICIÓN DE DESPRENDIMIENTO ','FontSize',12)
xlabel('Longitud (mm)')
ylabel('dP/dz y f*ro*V^2/2/D')
```

```
figure
subplot(2,1,1)
hold on
h=surf(zn,rn,Vr);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
h=surf(zn,-rn,Vr);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
plot3(z,(-R+y),0*z,'k',z,(R-y),0*z,'k')
view(0,90)
hold off
axis([min(z) max(z) -R R])
colorbar
title('DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD RADIAL(m/s)','FontSize',12)
ylabel('Radio (mm)')
subplot(2,1,2)
hold on
h=surf(zn,rn,V);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
h=surf(zn,-rn,V);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
plot3(z,(-R+y),0*z,'k',z,(R-y),0*z,'k')
view(0,90)
colorbar
hold off
axis([min(z) max(z) -R R])
title('DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD ABSOLUTA (m/s)','FontSize',12)
xlabel('Longitud (mm)')
ylabel('Radio (mm)')
```

```
figure
hold on
h=surf(zn,rn,(P-Patm)*10);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
h=surf(zn,-rn,(P-Patm)*10);
set(h,'FaceColor','interp','EdgeColor','none');
plot3(z,(-R+y),0*z,'k',z,(R-y),0*z,'k')
view(0,90)
colorbar
hold off
```

```

axis image
title('DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN (mbar)', 'FontSize', 12)
xlabel('Longitud (mm)')
ylabel('Radio (mm)')

fprintf('Tiempo de ejecución=%2.2f seg\n', cputime-t0)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

#### OBSERVACIONES:

- Este es el programa para el diseño del mezclador de aire y biogás a ser utilizado en un motor Diesel y se basa en el programa diseñado para el uso de biogás en motores gasolineros [5].
- el programa asume una composición volumétrica del biogás de 40% de CO<sub>2</sub> y 60% de CH<sub>4</sub>, para una nueva composición se debe hacer el cambio respectivo en la línea 93.

```

function y=MOODY(e, Re)
%laminar
if Re<2300
    f=64/Re;
end
%Transición de 2300 a 4000
if Re>=2300 & Re < 4000
    f1=64/2300;
    f2=.005;
    F_dF2=1;
    k=2*2.51/log(10)/4000;
    while abs(F_dF2)>=1e-6
        F2=f2^(-.5)+2*log10(e/3.71+2.51/4000*f2^(-.5));
        dF2=-.5*f2^(-1.5)*(1+k/(e/3.71+2.51/4000*f2^(-.5)));
        F_dF2=F2/dF2;
        f2=f2-F_dF2;
    end
    f=(f2-f1)*(Re-2300)/1700+f1;
end
%Turbulento
if Re>=4000 & Re<=1e8
    f=.005;

```

```

F_dF=1;
k=2*2.51/log(10)/Re;
while abs(F_dF)>=1e-6
    F=f^(-.5)+2*log10(e/3.71+2.51/4000*f^(-.5));
    dF=-.5*f^(-1.5)*(1+k/(e/3.71+2.51/4000*f^(-.5)));
    F_dF=F/dF;
    f=f-F dF;
end
end
%completamente turbulento
if Re>=1e8
    f=.25/(.57-log10(e))^2;
end
%liso
if e<=1e-6 & Re<10000 &Re>4000
    f=.316/Re^.25;
end
y=f;

```

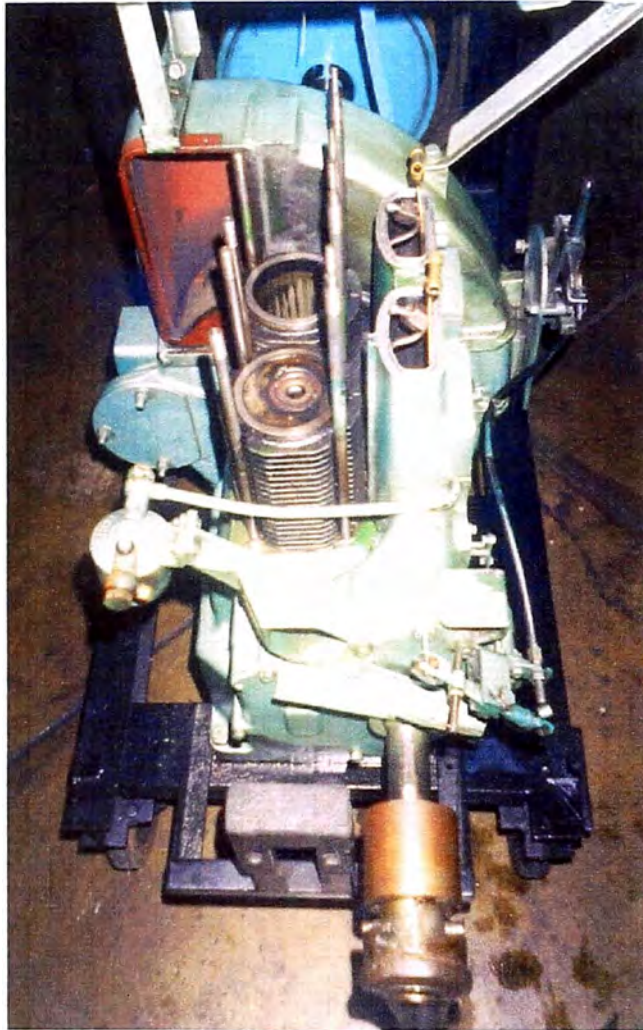


Foto 1. Motor petrolero Lister brindado para el desarrollo del proyecto, al cual se le adaptó un acople para el arranque manual.

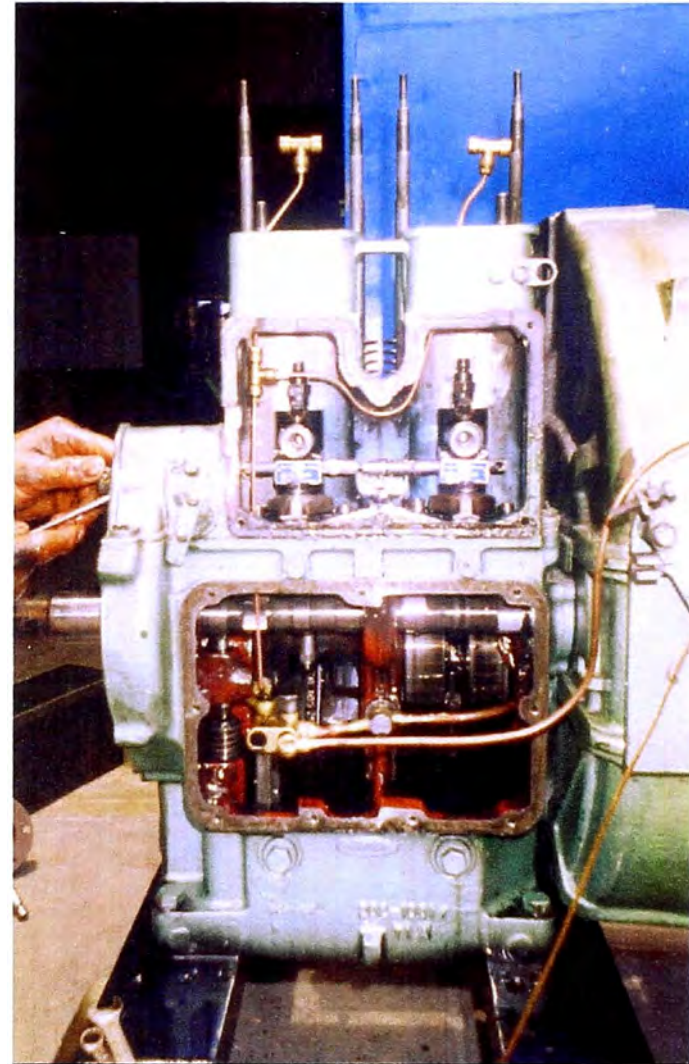


Foto 2. Mantenimiento del motor



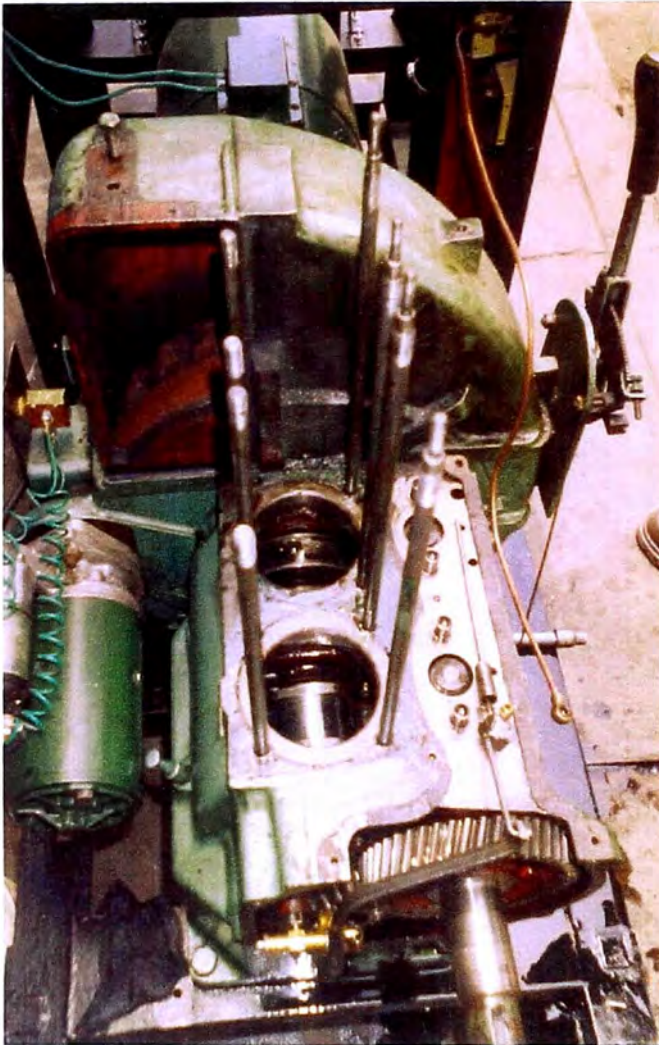


Foto 3. Motor Lister parcialmente desarmado, con arrancador eléctrico.

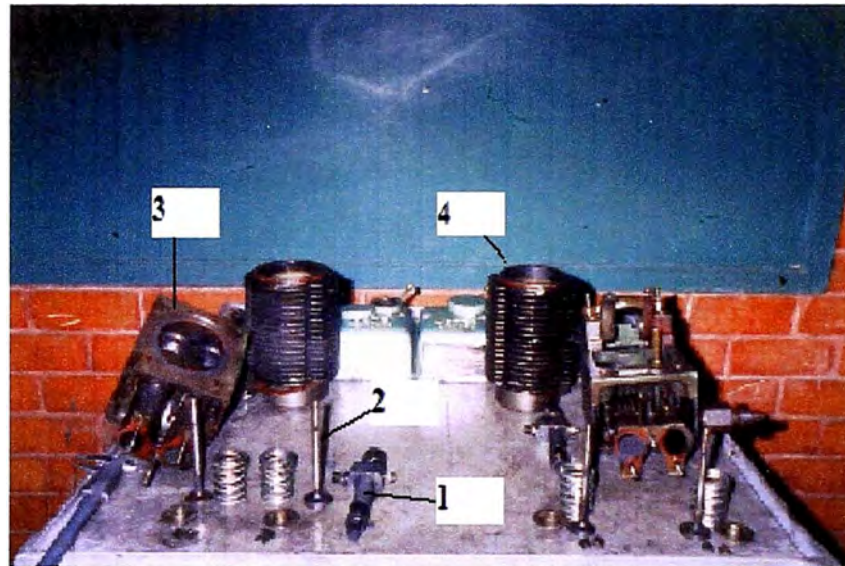


Foto 4. Algunos componentes principales del motor. 1. Inyector, 2. Válvula, 3. Culata, 4. Cilindro.



Foto 5. Motor Petrolero Lister con mezclador de aire y biogás (detalle A).

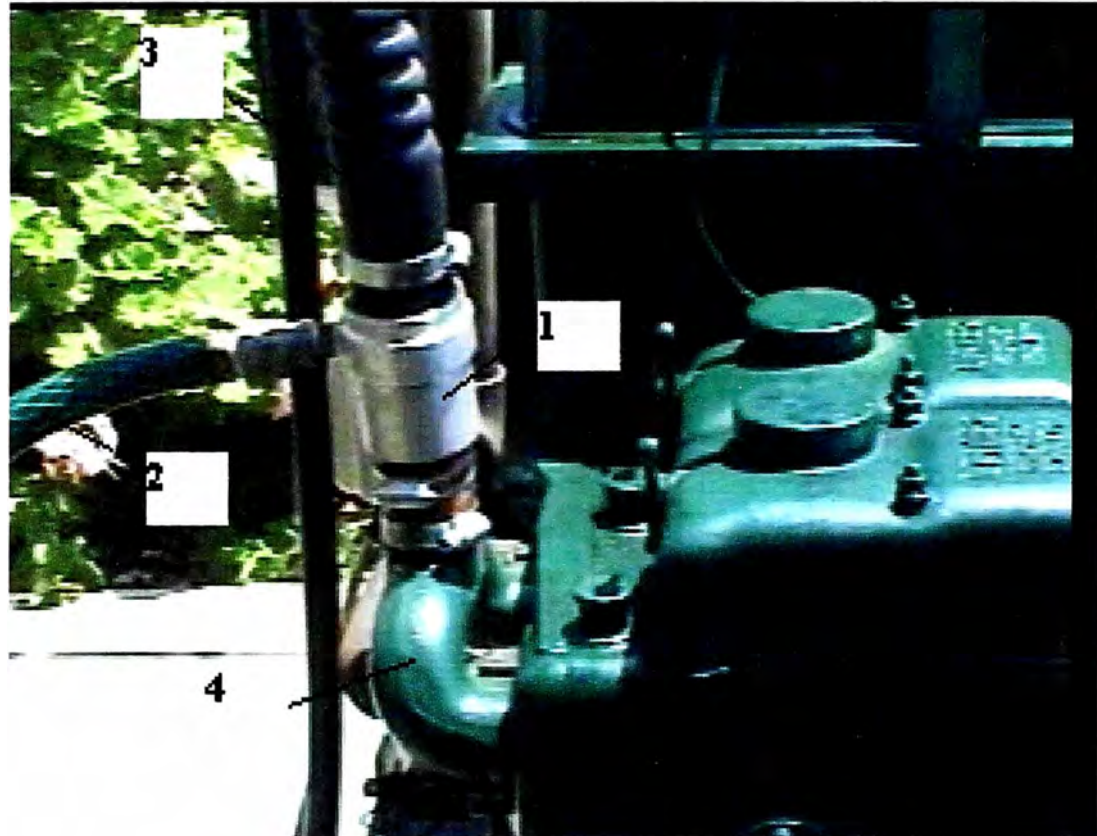


Foto 6. Detalle de la alimentación de biogás. 1. Mezclador de biogás  
2. Ingreso de biogás, 3. Ingreso de aire, 4. Múltiple de admisión.



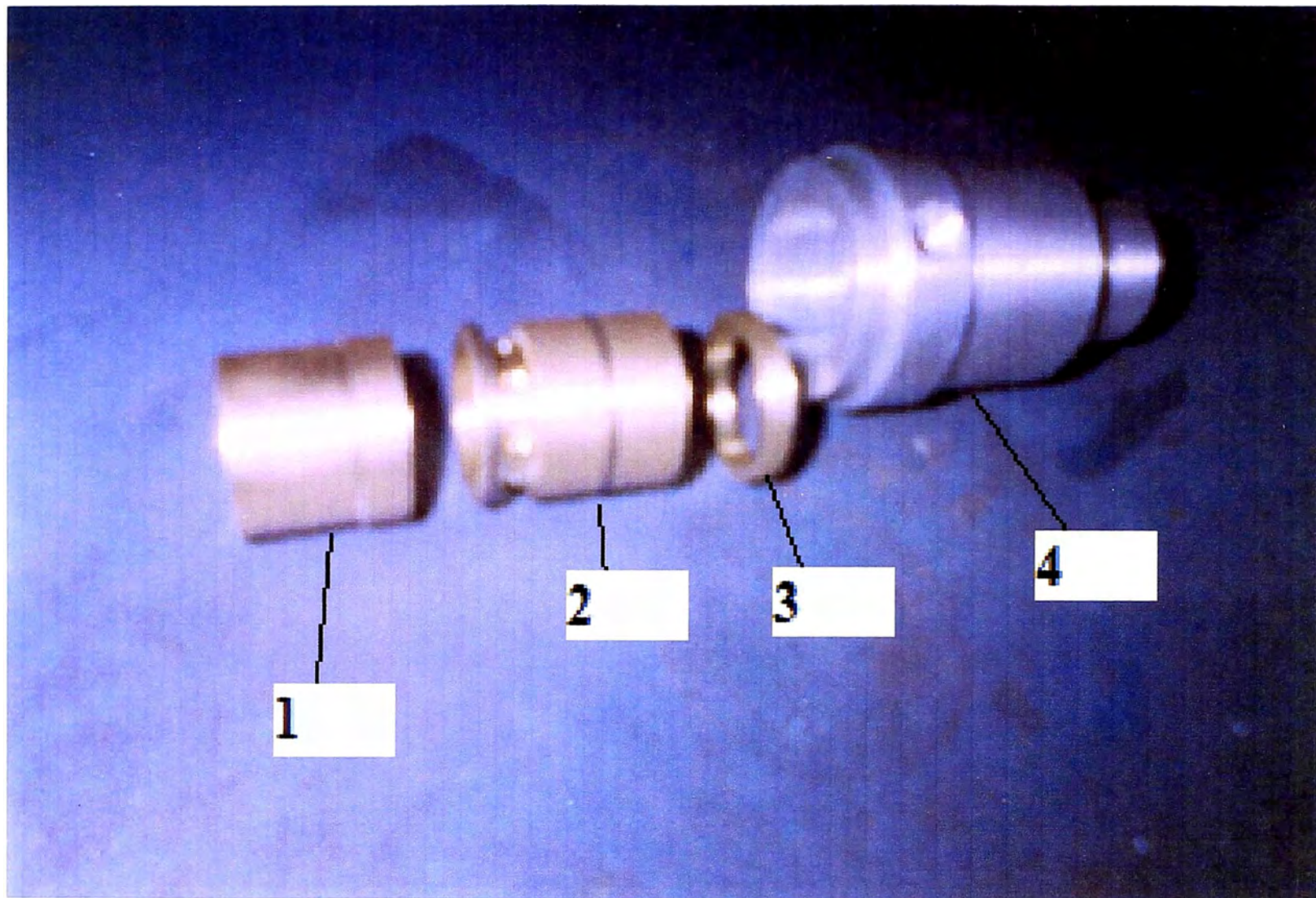


Foto 7. Detalle del mezclador de aire y biogás. 1. Suple, 2. Tobera, 3. Suple, 4. Carcasa.



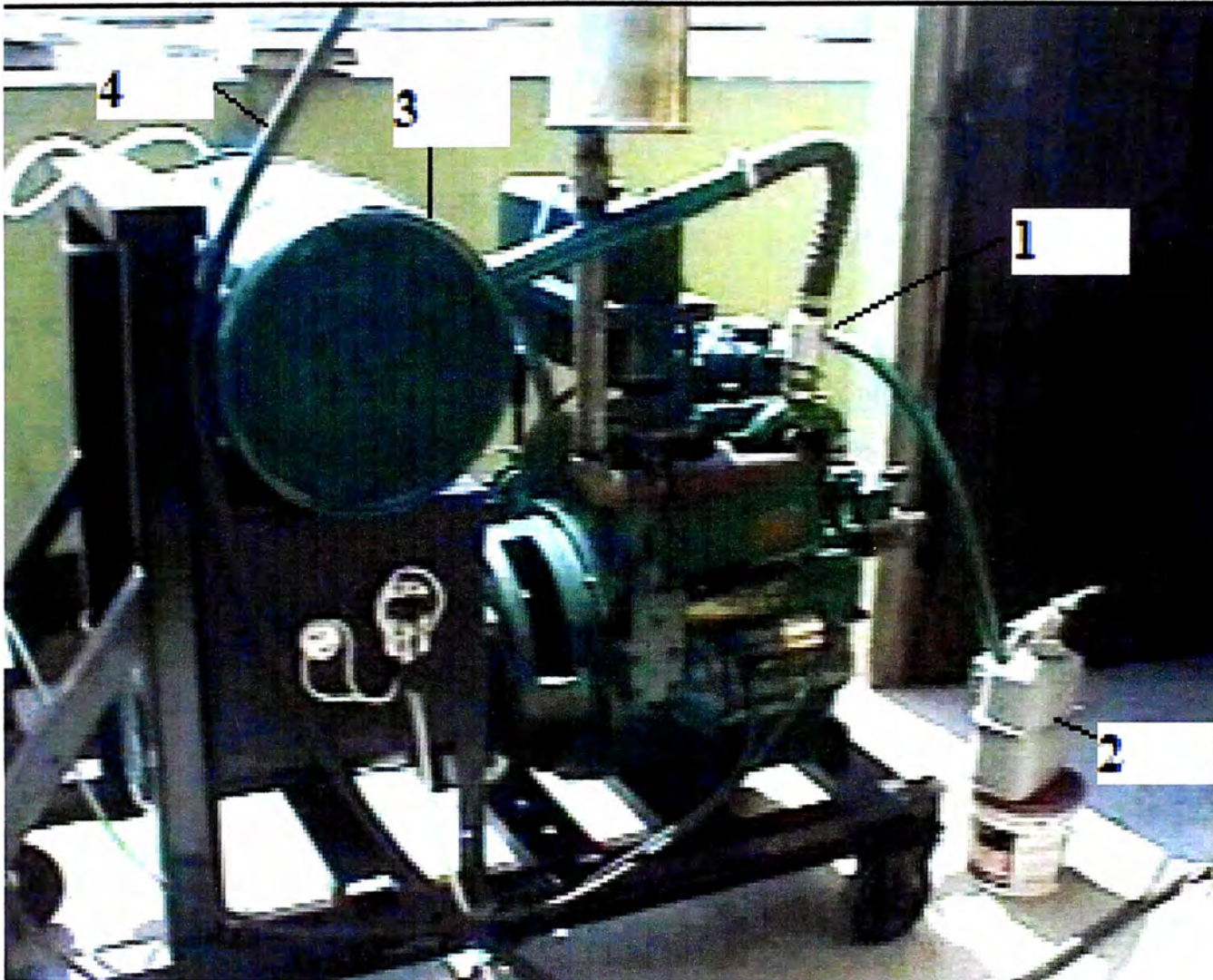


Foto 8. Motor Lister y algunos instrumentos. 1.Mezclador de aire y biogás, 2.Medidor de volumen de biogás, 3. Cilindro del sistema de medición del flujo de aire, 4. Manguera del opacímetro

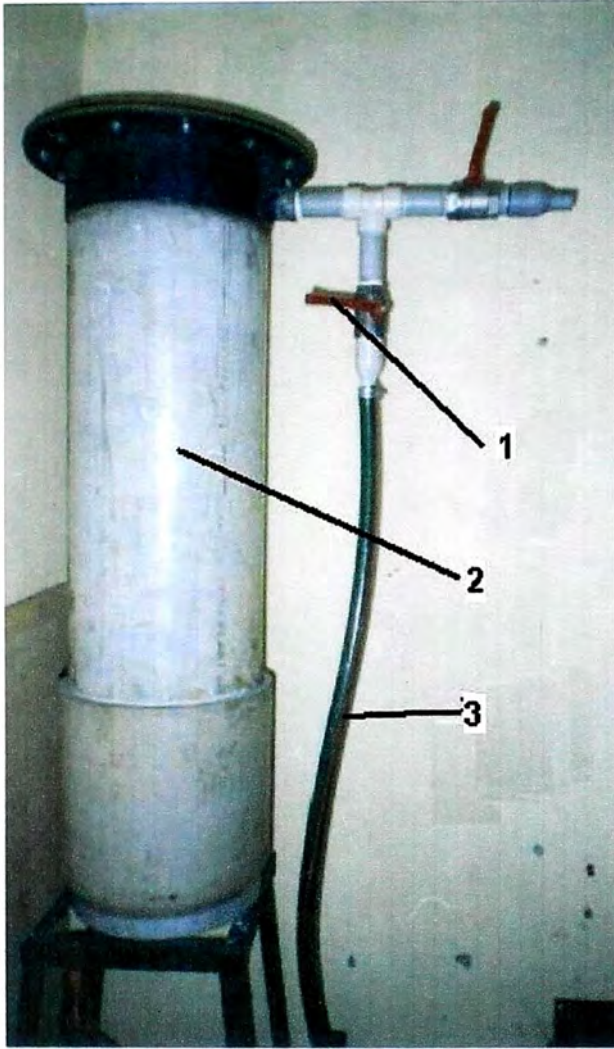


Foto 9. Filtro de biogás. 1. Válvula de regulación del máximo flujo de biogás, 2. Filtro de biogás, 3. Manguera de alimentación.



Foto 10. Bolsas de almacenamiento de biogás.