

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE  
COMBUSTIBLE CON REGULACIÓN AUTOMÁTICA DEL CAUDAL DE  
BIOGÁS PARA UN GRUPO ELECTRÓGENO DE 2,5 kW”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**Elaborada por:**

**CARLOS ALEX CONTRERAS PAREDES**

**LUIS ALBERTO ALTAMIRANO CÓRDOVA**

**PROMOCIÓN 2013-I**

**LIMA-PERÚ**

**2015**

**DEDICATORIA:**

*A mis padres, Marina y Efraín, por su apoyo incondicional durante mi formación como ingeniero y a mis tíos Dina y Alfredo por ser el ejemplo de esfuerzo y dedicación inculcados en mi persona durante el arduo camino de convertirme en un profesional.*

**Luis Alberto Altamirano Córdova**

**DEDICATORIA:**

*A mi mamá, Acela, que con su gran amor y sabiduría, inculcó en mí el respeto al conocimiento y la pasión por descubrir cada día algo nuevo.*

**Carlos Alex Contreras Paredes.**

# I

## INDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	1
<b>SIMBOLOGÍA Y ABREVIACIONES</b> .....	4
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	6
1.1 Justificación del tema propuesto: .....	6
1.2 Planteamiento de estudio: .....	8
1.3 Objetivos: .....	9
1.3.1 General: .....	9
1.3.2 Específicos: .....	9
1.4 Antecedentes: .....	9
1.4.1 Internacionales: .....	9
1.4.2 Locales: .....	12
1.5 Limitaciones del trabajo:.....	19
<b>CAPITULO II: ESTUDIO TEÓRICO DEL BIOGÁS, SU OBTENCIÓN Y REQUERIMIENTOS COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA</b> .....	20
2.1 Biogás: .....	20
2.2 Propiedades físico-químicas del biogás: .....	26
2.2.1 Densidad: .....	26
2.2.2. Poder calorífico: .....	27
2.2.3 Humedad: .....	28
2.2.4 Viscosidad: .....	29
2.2.5 Relación aire-combustible estequiométrica del biogás: .....	31
2.2.6 Número de octano: .....	32
2.3 Métodos de obtención de biogás: .....	32
2.4 Biodigestores: .....	34
2.5 Factores que influyen en la producción de biogás: .....	40
2.5.1 Temperatura: .....	40
2.5.2 Acidez: .....	40
2.5.3 Proporción sólido – líquido: .....	41
2.5.4 Proporción carbono – nitrógeno: .....	42
2.5.5 Tiempo de retención hidráulico (TRH): .....	43

## II

2.6 Análisis de demanda: .....	43
<b>CAPITULO III: PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE CON REGULACIÓN AUTOMÁTICA DEL CAUDAL DE BIOGÁS.....</b>	<b>46</b>
3.1 Descripción del sistema de alimentación – Componentes y funcionamiento: .....	46
3.1.1 Al sistema de alimentación: .....	48
3.1.2 Al sistema de arranque: .....	51
3.1.3 Al sistema de regulación: .....	51
3.2 Regulador-dosificador:.....	51
3.2.1 Funcionamiento y componentes:.....	51
3.2.2 Parámetros de diseño – Fórmulas: .....	52
3.3 Mezclador:.....	58
3.3.1 Funcionamiento y componentes:.....	58
3.3.2 Parámetros de diseño – Fórmulas: .....	61
<b>CAPITULO IV: MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS CONSTRUCTIVOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR A BIOGÁS .....</b>	<b>64</b>
4.1 Fundamentación y consideraciones adicionales del modelo matemático: .....	64
4.1.1 Cálculo de la constante de rigidez de los resortes:.....	65
4.1.2 Coeficiente de descarga ( $Cd$ ): .....	66
4.1.3 Número de Reynolds:.....	66
4.1.4 Coeficiente de descarga de un mezclador simple: .....	67
4.1.5 Coeficiente de descarga de un mezclador aerodinámico: .....	69
4.1.6 Cálculo de las propiedades de la mezcla de gases: .....	72
4.1.7 Cálculo del máximo número posible de agujeros del mezclador.....	73
4.1.8 Cálculo de la eficiencia volumétrica ( $\eta_v$ ): .....	74
4.1.9 Cálculo del diámetro de la mariposa del carburador de gasolina ( $D_{mar}$ ): .....	77
4.1.10 Cálculo del área de paso a través de la válvula mariposa ( $A_d$ ).....	77
4.1.11 Cálculo del flujo másico a través de la válvula de mariposa ( $\dot{m}_{a1}$ ):.....	78
4.1.12 Cálculo del ángulo máximo de apertura de la mariposa ( $\psi_{max}$ ): .....	81
4.1.13 Cálculo de la eficiencia del motor con biogás: .....	81
4.1.14 Cálculo de las pérdidas mecánicas:.....	82
4.1.15 Cálculo de la potencia efectiva del motor a biogás:.....	83

### III

4.1.16 Cálculo de la potencia nominal del motor con gasolina: .....	84
4.1.17 Método numérico de la bisección: .....	86
4.2 Diagramas de flujo: .....	87
4.2.1 Diagrama de flujo del programa biogasenew.m: .....	88
4.2.2 Diagrama de flujo del sub-programa venturi2.m: .....	89
4.2.3 Diagrama de flujo del sub-programa efvolnew3.m: .....	90
4.2.4 Diagrama de flujo del sub-programa c_descarga.m: .....	92
4.3 Algoritmos de cálculo: .....	92
4.4 Resultados numéricos del modelo matemático: .....	99
<b>CAPITULO V: CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA REGULADOR- DOSIFICADOR Y MEZCLADOR DE BIOGÁS</b> .....	110
5.1 Dimensionado del regulador-dosificador: .....	110
5.2 Procedimiento de fabricación: .....	110
5.3 Costos de fabricación: .....	116
5.4 Dimensionado del mezclador: .....	117
5.5 Procedimiento de fabricación: .....	117
5.6 Costos de fabricación: .....	119
5.7 Ensamble de los componentes: .....	119
<b>CAPITULO VI: ESTUDIO EXPERIMENTAL</b> .....	122
6.1 Características del banco de pruebas: .....	122
6.2 Instrumentación utilizada: .....	125
6.3 Metodología experimental: .....	126
6.3.1 De las pruebas experimentales: .....	126
6.3.2 De la incertidumbre de la medición: .....	127
6.4 Fórmulas utilizadas: .....	129
6.4.1 De los parámetros de funcionamiento del grupo electrógeno: .....	129
6.4.2 De la incertidumbre de la medición: .....	130
6.5 Análisis y discusión de los resultados experimentales: .....	132
6.5.1 Voltaje y frecuencia: .....	132
6.5.2 Nivel de ruido: .....	133
6.5.3 Consumo de combustible: .....	134
6.5.4 Coeficiente de exceso de aire: .....	138

## IV

6.5.5 Eficiencia efectiva:.....	139
6.5.6 Composición de los gases de escape:.....	140
6.6 Validación del modelo matemático:.....	145
<b>CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>151</b>
7.1 Conclusiones: .....	151
7.2 Recomendaciones:.....	152
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO A: CATÁLOGOS DEL GRUPO ELECTRÓGENO.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO B: PROTOCOLOS DE PRUEBAS.....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO C: EQUIVALENCIAS DE SIMBOLOGÍA .....</b>	<b>162</b>
<b>ANEXO D: PROGRAMAS DE CÁLCULO .....</b>	<b>166</b>
<b>PLANOS DE FABRICACIÓN DE LAS COMPONENTES.....</b>	<b>179</b>

## PRÓLOGO

Un grupo electrógeno es una máquina que mueve un generador eléctrico accionado por un motor de combustión interna. Una de sus utilidades más comunes en nuestro país es la generación de energía eléctrica en lugares que no cuentan con acceso al sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN); nos referimos, en general, a zonas apartadas de poca infraestructura y población. También se utilizan en lugares públicos de alta concurrencia como hospitales, fábricas, empresas, etc., que a falta de suministro eléctrico de la red utilizan fuentes de energía alterna para abastecerse. Los grupos electrógenos requieren de fuentes de energía fósil para su funcionamiento, siendo la gasolina el combustible más utilizado en el caso de los grupos pequeños que cuentan generalmente con motores de encendido por chispa. Sin embargo, los productos de la combustión de estos fósiles son los principales responsables de la contaminación ambiental, tema de suma preocupación actual, razón por la cual se están buscando fuentes de energía alterna cuyo efecto sobre el medio ambiente no sea tan perjudicial.

Este trabajo se presenta como una mejora de trabajos anteriormente realizados, principalmente en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, y que estuvieron abocados a la adaptación de estos motores para su funcionamiento con biogás. Las metas de estos trabajos fueron producir componentes de fácil implementación a motores existentes en el mercado, de tal manera que estos permitan la utilización de los motores con este combustible alternativo. Dichos componentes fueron diseñados para el arranque en frío del motor; para la operación en ralentí y normal funcionamiento del motor con biogás; y para efectuar la transición de biogás a gasolina cuando sea necesario, esto último para mejorar la confiabilidad del sistema. Para tal fin se adquirió un grupo electrógeno de 2,5 kW al cual se le adaptó los nuevos componentes diseñados. Posteriormente, el motor fue sometido a pruebas experimentales a fines de obtener indicadores de su comportamiento con este nuevo sistema de alimentación de biogás.

La mejora que se propone en este trabajo es el desarrollo de un sistema de alimentación de biogás confiable, sencillo y, sobre todo, económico, con regulación automática de la alimentación de biogás en motores de combustión interna, para grupos electrógenos de baja potencia (menor de 5 kW). Con el objeto de ahorrar tiempo y recursos materiales y humanos se emplearán modelos matemáticos desarrollados para mezcladores y reguladores-dosificadores de flujo de biogás para un grupo electrógeno de 2,5 kW, los cuales se compararán finalmente con los resultados experimentales, obtenidos con la finalidad de validar el modelo y hacer las correcciones necesarias para su mejor precisión.

La presente tesis consta de ocho capítulos los cuales tratan de:



- **En el capítulo I**, denominado **“Introducción”**, se incluye una reseña histórica de los antecedentes del presente trabajo donde se mencionan sus principales aportes y limitaciones, también se exponen los motivos que impulsaron el desarrollo del tema propuesto y los objetivos que se plantean alcanzar.
- **En el capítulo II**, denominado **“Estudio teórico del biogás, su obtención y requerimientos como combustible en motores de combustión interna”**, se describe el biogás, sus propiedades físico-químicas como combustible. Los métodos de su obtención, requerimientos para adaptarlo al motor de combustión de encendido por chispa y los factores que influyen en su producción. Se proporciona un alcance acerca de los biodigestores, proceso de obtención de biogás que se utiliza en la presente investigación. Por último, se hace un análisis de requerimientos de la materia prima para la carga eléctrica demandada.
- **En el capítulo III**, denominado **“Parámetros de diseño de los principales componentes del sistema de alimentación de combustible con regulación automática del caudal de biogás”**, se presenta un exhaustivo análisis de los parámetros y ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del sistema de alimentación adaptado al grupo electrógeno conociendo previamente las partes componentes de nuestro sistema a diseñar. Se presentan los parámetros del diseño del mezclador de aire-biogás y las ecuaciones respectivas. Así mismo, se describen los parámetros y ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del regulador-dosificador de biogás.
- **En el capítulo IV**, denominado **“Modelo matemático para la determinación de los principales parámetros constructivos del sistema de alimentación y de funcionamiento del motor a biogás.”**, se resuelven simultáneamente las ecuaciones, del capítulo anterior, de conservación de la masa a través de las diferentes secciones de paso de flujo de biogás y de equilibrio de fuerzas en el balancín del reductor, mediante algoritmos de cálculo; seguidamente, se detalla el programa desarrollado mediante un diagrama de flujo. Por último, se presentan los resultados numéricos obtenidos para su posterior contrastación con los resultados experimentales.
- **En el capítulo V**, denominado **“Construcción del sistema regulador-dosificador y mezclador de biogás”**, se detalla el procedimiento de fabricación del mezclador y el regulador-dosificador de biogás, y los aspectos que se deben tener en cuenta para el dimensionado de estos componentes. Se mencionan las limitaciones que pueden surgir durante la construcción de los componentes y las recomendaciones del caso. Adicionalmente, se incluye un análisis de costos asociado al proceso de manufactura, que tiene como objetivo que éste sea el más económico posible.

- **En el capítulo VI**, denominado **“Estudio experimental”**, se describen las características del banco de pruebas implementado, el tipo de instrumentación utilizada, la metodología experimental para la obtención de datos y las ecuaciones utilizadas. Luego, se presentan los datos obtenidos en forma de gráficas que describen el comportamiento de nuestro sistema para diferentes regímenes de carga. Por último, se hace un análisis de los resultados obtenidos.
- **En el capítulo VII**, denominado **“Conclusiones y recomendaciones”**, se detallan los resultados de la presente investigación cumpliendo con los objetivos planteados inicialmente, las recomendaciones a tener en cuenta para la construcción de este sistema y algunas observaciones útiles hechas durante el desarrollo de la tesis.

En el anexo se incluyen la simbología utilizada durante el desarrollo del modelamiento matemático y del diagrama de flujo, así como los protocolos de pruebas experimentales. También, se incluyen catálogos del grupo electrógeno.

Se incluyen, además, al final del informe, los planos de fabricación del mezclador y del regulador-dosificador de biogás, presentándose los planos de ensamble y luego el plano detallado de cada componente para su fabricación.

Cabe mencionar que el inicio de la presente investigación se realizó en el marco del “XX Congreso y Exposición Internacional de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica, Eléctrica y Ramas Afines, XX CONEIMERA, Lima-UNI 2013” donde se planteó como objetivo adaptar la tecnología desarrollada en un proyecto solicitado por el Jockey Club del Perú. En el mencionado proyecto, llevado a cabo en enero del 2011, el Dr. Juan Guillermo Lira Cacho y el Bach. Alex Contreras Paredes desarrollaron un sistema de regulación automática del sistema de alimentación de biogás para un motor de combustión interna de 58 kW (potencia original con GLP). Para ello se utilizó una planta de tratamiento de biogás de propiedad del hipódromo de Monterrico. La finalidad del proyecto presentado al XX CONEIMERA era adaptar esta tecnología a grupos electrógenos de baja potencia (menor a 5 kW) de tal manera que facilite su fabricación a escala y se pueda implementar y replicar este proyecto en lugares remotos sin acceso al SEIN.

Queremos hacer presente un agradecimiento especial al señor Luis Alberto Fernández Simichi por las facilidades brindadas en el taller de su empresa, lo cual nos permitió realizar parte de la experimentación.

Finalmente, queremos manifestar nuestro profundo y sincero agradecimiento al Dr. Juan Guillermo Lira Cacho por su apoyo continuo, paciencia y dedicación desde el principio del trabajo; apoyo sin el cual no hubiera sido posible la elaboración de la presente tesis.

En general, agradecemos a todas las personas que en algún momento contribuyeron con sus aportes a lograr los objetivos propuestos.

## SIMBOLOGÍA Y ABREVIACIONES

$D$ : Diámetro cualquiera o Diámetro del pistón del motor.  
 $d$ : Diámetro.  
 $d_g$ : Diámetro de la sección más pequeña o de garganta.  
 $C_d$ : Coeficiente de descarga.  
 $K, C_r$ : Coeficiente de resistencia.  
 $L$ : Longitud o relación aire combustible.  
 $x$ : Contracción inicial que sufren los resortes.  
 $h$ : Altura.  
 $A$ : Área.  
 $A_{ef}$ : Área efectiva.  
 $\alpha$ : Ángulo.  
 $\beta$ : Ángulo.  
 $\psi$ : Ángulo de apertura de la mariposa.  
 $V$ : Volumen o voltaje.  
 $I$ : Intensidad de corriente.  
 $\dot{V}$ : Flujo volumétrico.  
 $\dot{m}$ : Flujo másico.  
 $\rho$ : Densidad.  
 $p$ : Presión.  
 $p_k$ : Presión después de la válvula mariposa del carburador.  
 $\Delta p$ : Caída de presión o diferencia de presión.  
 $\Delta V$ : Consumo volumétrico.  
 $T$ : Temperatura.  
 $\eta_v$ : Eficiencia volumétrica.  
 $\eta_e$ : Eficiencia efectiva.  
 $\eta_i$ : Eficiencia indicada.  
 $n$ : Velocidad de rotación.  
 $N$ : Número de agujeros, espiras o número de moles.  
 $i$ : Número de cilindros.  
 $V_H$ : Cilindrada del motor.  
 $u$ : Relación de brazos de palanca.  
 $r_L$ : Relación de longitudes.  
 $r_d$ : Relación de diámetros.  
 $r_n$ : Relación de velocidades.  
 $r_A$ : Relación de áreas.  
 $k$ : Exponente adiabático o constante de rigidez de un resorte.  
 $R_u$ : Constante universal de los gases.

$R_g$ : Constante particular de un gas.

$N_e$ : Potencia efectiva.

$N_i$ : Potencia indicada.

$g_e$ : Consumo específico.

$Re$ : Número de Reynolds.

$v$ : Velocidad.

$H_u$ : Poder calorífico.

$\mu$ : Viscosidad dinámica.

$\nu$ : Viscosidad cinemática.

$\lambda$ : Coeficiente de exceso de aire.

$f$ : Fracción másica.

$y$ : Fracción molar.

$\bar{M}$ : Masa molar.

$a, b, c$ : Brazos de palanca.

$G$ : Módulo de corte.

$S$ : Carrera del pistón del motor.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Justificación del tema propuesto:**

Actualmente, la humanidad vive con una constante preocupación por los problemas asociados a la contaminación ambiental y el cambio climático, que si bien, son efecto del desarrollo económico e industrial de las metrópolis, tienen su contraparte en el fuerte impacto ambiental que estas actividades causan a nuestro entorno natural. Prueba de ello son las distintas conferencias, foros, y congresos internacionales donde el tema principal a debatir son las medidas para frenar la degradación de nuestro ecosistema. Se perciben cambios de patrones alimenticios y migratorios de aves, extraños cambios climáticos en lugares que históricamente tienen registrado un tipo específico de clima, aumento de los valores en registros de temperatura a nivel mundial, deshielo de glaciares polares y el consecuente aumento del nivel de agua del mar. Estos son consecuencia directa de fenómenos conocidos como el efecto invernadero y el calentamiento global.

Después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) ocupa el segundo lugar en cuanto a gases de efecto invernadero causados por las actividades humanas. El metano tiene un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el  $\text{CO}_2$  en un lapso de 100 años (ver tabla 1.1), hecho que hace notar su trascendencia, razón por la cual urgen sistemas de captación del metano que resulten además de mucho beneficio ambiental, energético y económico. El metano, como combustible, representa energía limpia que mejora la calidad de vida y a la vez genera beneficios económicos. El uso del metano contribuiría a la reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y material particulado; evitando el consumo de otros combustibles de mayor emisión de energía tales como carbón, derivados del petróleo y la madera.

**Tabla 1.1** Potencial de los gases de efecto invernadero.

<b>Potencial de calentamiento global (PCG) de gases de efecto invernadero (comparado al CO<sub>2</sub>)</b>		
<b>Gas de efecto invernadero</b>	<b>PCG después de 20 años</b>	<b>PCG después de 100 años</b>
Dióxido de carbono	1	1
Metano	62	23
Óxido de nitrógeno	275	296
HFC-23	9400	12000
HFC-125	5900	3400
HFC-134a	3300	1300
HFC-143a	5500	4300
CF <sub>4</sub>	3900	5700
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	8000	11900
SF <sub>6</sub>	15100	22200

**Fuente:** <http://www.tuimpaco.org/alto-potencial-de-calentamiento-global.php>

Estos sistemas de captación de metano constituyen entonces un tipo de tecnología importante que instituciones como la Universidad Nacional de Ingeniería se ha encargado de investigar e implementar a fin de lograr los objetivos descritos líneas arriba. Estos son los biodigestores, los cuales son recintos de fermentación anaeróbica de residuos orgánicos. Es así como proyectos multidisciplinarios auspiciados por el Instituto General de Investigación (IGI-UNI), el Instituto de Motores de Combustión Interna (IMCI-FIM), el Centro de Energías Renovables (CER-UNI) y las facultades de Ingeniería Mecánica (FIM), Ingeniería Química (FIQ) e Ingeniería Ambiental (FIA) han sentado las bases para la utilización de esta fuente de energía limpia en los motores de combustión interna (ver antecedentes). Adicionalmente, existen también trabajos de titulación profesional donde se han profundizado estos estudios con el fin de lograr la implementación de esta tecnología en el Perú.

Es esta la razón que motiva la redacción de la presente tesis y representa una mejora importante de trabajos anteriores a fin de facilitar la implementación de esta tecnología en lugares que tengan necesidad energética y comunidades remotas del Perú. De esta manera estaremos cada vez más cerca de lograr los objetivos propuestos por las primeras investigaciones de este tipo.

## 1.2 Planteamiento de estudio:

La generación de energía eléctrica a partir del biogás tiene dos principales dificultades: la baja presión de suministro al motor de combustión (no supera el límite de 60 mbar) y el alto contenido de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ). La primera es la que complica en mayor grado la regulación automática del caudal de biogás en función de la carga. Además que este tipo de sistemas no se ofertan en el mercado local por lo que hay necesidad de diseñarlo, construirlo y fabricarlo especialmente. El segundo factor, el ácido sulfhídrico contenido en el biogás (de 0,10 a 0,50 % en volumen), tiene propiedades corrosivas que degradarían rápidamente las partes internas componentes del motor, por lo que es necesario la utilización de filtros que disminuyan su concentración.

Adicionalmente a estas dos principales dificultades, existe el problema de arranque (en frío y en caliente) del motor con biogás. Esto es debido a las propiedades intrínsecas del combustible, siendo la principal razón su bajo poder calorífico (el poder calorífico inferior del biogás es  $21,6 \text{ MJ/m}^3$ ) [Ref. 17]. Ante tal situación existe la necesidad de mantener el carburador de gasolina original del motor y el regulador de velocidades, con la finalidad de utilizar una pequeña cantidad de gasolina contenida en el carburador para el arranque e inmediatamente cambiar el tipo de combustible (de gasolina a biogás). Entonces, por esta razón, el nuevo sistema de regulación de biogás tiene que acoplarse con el carburador y filtro de aire originales del motor, de manera que al cerrar la válvula de ingreso de gasolina se apertura la llave del conducto de biogás.

Otro aspecto importante es la estabilidad de funcionamiento del motor a su velocidad nominal (3600 rpm) que equivalen generar corriente eléctrica de 60 Hz. En algunos trabajos anteriores de investigación esto se conseguía con la ayuda de un operario que, manual y simultáneamente, regulaba la válvula de alimentación de biogás y la válvula mariposa del carburador, en correspondencia con la carga del motor. Cabe resaltar que, de esta manera, dependíamos de la habilidad y el trabajo atento de dicho operario para regular el flujo de combustible ante una variación de la carga eléctrica.

Ante esta necesidad, surgió la idea de investigar e implementar un sistema que además de permitir un fácil arranque del motor y el uso eventual de gasolina en caso de escasear el biogás, permita una adecuada mezcla del biogás con el aire mediante regulación automática del combustible bajo distintos regímenes de carga.

### **1.3 Objetivos:**

#### **1.3.1 General:**

- Generar energía eléctrica utilizando biogás en un grupo electrógeno de baja potencia (2,5 kW) mediante un sistema de alimentación de combustible sencillo, confiable y económico en los diferentes regímenes de funcionamiento del motor.

#### **1.3.2 Específicos:**

- Diseñar y construir un sistema de alimentación de biogás con regulación automática en función de la carga en un grupo electrógeno con motor de combustión interna de encendido por chispa.
- Desarrollar un modelo matemático para determinar los parámetros constructivos del sistema de alimentación de biogás y validarlo en un banco de ensayos.

### **1.4 Antecedentes:**

#### **1.4.1 Internacionales:**

El comienzo de la historia del biogás se puede fijar en unos 5000 años atrás. Fuentes muy antiguas indican que el uso de desechos y los “recursos renovables” para el suministro de energía no son conceptos nuevos, pues ya eran conocidos y utilizados mucho antes de nuestra era. Los inicios del biogás se han fijado en base a hechos históricos que dicen que, alrededor de 3000 años a.C., los sumerios ya practicaban la limpieza anaerobia de los residuos. También hay datos que están basados en el relato del viaje de Marco Polo a China, en el que se describen unos tanques cubiertos en donde se almacenaban las aguas residuales en la antigua China, pero no está claro si capturaban el gas o si le daban alguna utilidad. También hay otras fuentes que citan como primer uso del biogás el calentamiento del agua de los baños públicos en Asiria, allá por el siglo X a.C. [Ref. 1].

Ya en nuestra era, el estudioso romano Plinio describió, alrededor del año 50 d.C., el brillo de unas luces que aparecían por debajo de la superficie de los pantanos.



Se atribuye a Jan Baptista Van Helmont la primera anotación científica sobre el biogás, en la primera mitad del siglo XVII (1630), quien determinó que de la descomposición de la materia orgánica se obtenían unos gases que eran inflamables. Otros autores atribuyen a Shirley o Shierley en 1667 el descubrimiento del biogás o gas de los pantanos, identificándolo como el causante de los denominados “fuegos fatuos”, aunque parece ser que Shirley se basó en las conclusiones que escribió Van Helmont, con anterioridad. Unos años más tarde, en 1682, R. Boyle y su asistente Denis Papin predijeron la posibilidad de obtener un gas a partir de residuos animales y vegetales en descomposición.

En el nuevo continente, en 1764, Benjamín Franklin describió que el biogás pudo ser el causante de que se prendiera fuego en la superficie de un lago poco profundo en New Jersey. De esto informó a Joseph Priestly en Inglaterra, quien publicó en 1790 sus propias experiencias con el denominado “aire inflamable”.

En 1806, William Henry dedujo la identidad probable del gas de los pantanos.

En 1808, Humphry Davy, químico inglés, produce gas metano en un laboratorio con estiércol de ganado. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Labor que continua, en parte, su alumno y luego célebre físico inglés Faraday, realizando algunos experimentos con el gas de los pantanos y el hidrocarburo identificado como parte de él.

En 1821, Avogadro elucidó por primera vez la estructura química final del metano ( $\text{CH}_4$ ).

En 1890, se construye el primer biodigestor a escala real en la India y, ya en 1896, en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad.

A finales del siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de fermentación anaerobia. Es entonces cuando en el sur de China se construyen las primeras plantas de biogás, tal y como se conocen actualmente.

En 1906, Sohngen acumuló acetato en un proceso de dos etapas. Encontró que el metano se forma a partir de dos compuestos básicos: el hidrógeno y el dióxido de carbono. En ese mismo año, el técnico Imhoff comenzó la construcción de unidades de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en el Ruhr, Alemania. El instaló el llamado “tanque Imhoff” con espacios separados para la sedimentación y la digestión. El tiempo de residencia del bio-desecho era de 60 días.

En Europa, los primeros digestores para obtener biogás a partir de residuos orgánicos se instalan en Gran Bretaña en 1911.

Tras las guerras mundiales comienzan a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyos productos se empleaban en tractores y automóviles de la época. En todo el mundo se difunden los denominados tanques Imhoff para el tratamiento a aguas cloacales colectivas. El gas producido se utilizó para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se lo llegó a inyectar en la red de gas comunal.

En 1984, se construye la primera planta centralizada de biogás en Dinamarca, y se comenzó un ambicioso proyecto de demostración desarrollado conjuntamente por el Ministerio de Agricultura y el de Medioambiente danés, en un esfuerzo por demostrar el potencial de las grandes plantas como productoras de energía eléctrica.

Con la nueva legislación eléctrica de los años 90 del siglo pasado, en Alemania, se produjo una nueva oleada de construcción de digestores, que todavía se mantiene gracias al pago por kW.h producido, que es mejorada con la nueva ley de energías renovables. De hecho, al final de los años 90 del pasado siglo, se construyeron y se implementaron numerosas plantas para el tratamiento mecánico-biológico de las basuras. La tecnología estaba basada en procesos anaerobios con algún compostaje aerobio. El proceso anaerobio demostró ser ventajoso ya que demostró proporcionar bastante energía para la propia planta [Ref. 1].

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al nuevo material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos que actúan en condiciones anaeróbicas. Estos progresos en la comprensión del proceso microbiológico han estado acompañados por importantes logros de la investigación aplicada obteniéndose grandes avances en el campo tecnológico.

Los países generadores de tecnología más importantes en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Reino Unido, Suiza, Italia, E.E.U.U., Filipinas y Alemania.

A nivel latinoamericano se ha desarrollado tecnología propia en Argentina para el tratamiento de vinazas, residuo de la industrialización de la caña de azúcar. En Brasil y en Colombia se encuentran utilizando sistemas europeos bajo licencia.

El avance de esta técnica ha permitido que importantes ciudades del mundo, como el caso de Santiago de Chile en América Latina, incluyan un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente en la red de distribución urbana de gas natural [Ref. 2].

### 1.4.2 Locales:

El antecedente local de mayor data histórica es el proyecto **“Uso del biogás en motores”** realizado por la **Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIM)**, a través de su **Instituto de Motores de Combustión Interna (IMCI)** que se desarrolló entre mayo de 1998 y junio del 2000 a cargo del Ing. Alfredo Oliveros Donohue [Ref. 3]. En la propuesta del proyecto se fijaron como objetivo general el estudio del uso del biogás en motores de combustión Interna, y como objetivos específicos se fijaron la determinación del rendimiento de motores gasolineros estacionarios comerciales de baja potencia funcionando con biogás.

Para lograr los objetivos fijados, se recuperó la planta piloto de biogás construida por el antiguo Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología (ITINTEC) en la unidad del SENATI de Villa el Salvador. Dicha instalación contaba con un biodigestor, tipo Olade Guatemala, el cual generaba biogás a partir de estiércol de ganado vacuno.

En este proyecto se realizaron ensayos con un grupo electrógeno Honda de 3,5 kVA, este grupo fue montado en un banco de pruebas en el que se simuló la carga con un arreglo (panel) de focos incandescentes, donde fácilmente se podía variar la carga, prendiendo y apagando los focos. Para la correcta alimentación de biogás al motor gasolinero se desarrolló un carburador para biogás (mezclador), esto gracias al ensayo de distintas toberas y dispositivos de alimentación del biogás (chiclors y válvulas de paso).

Cabe resaltar que el proyecto llegó a cumplir los objetivos y metas descritas, dando un importante aporte tecnológico (el carburador para biogás). Esto representaba un importante paso para el uso del biogás como alternativa real de obtención de energía de forma sostenible en el Perú.

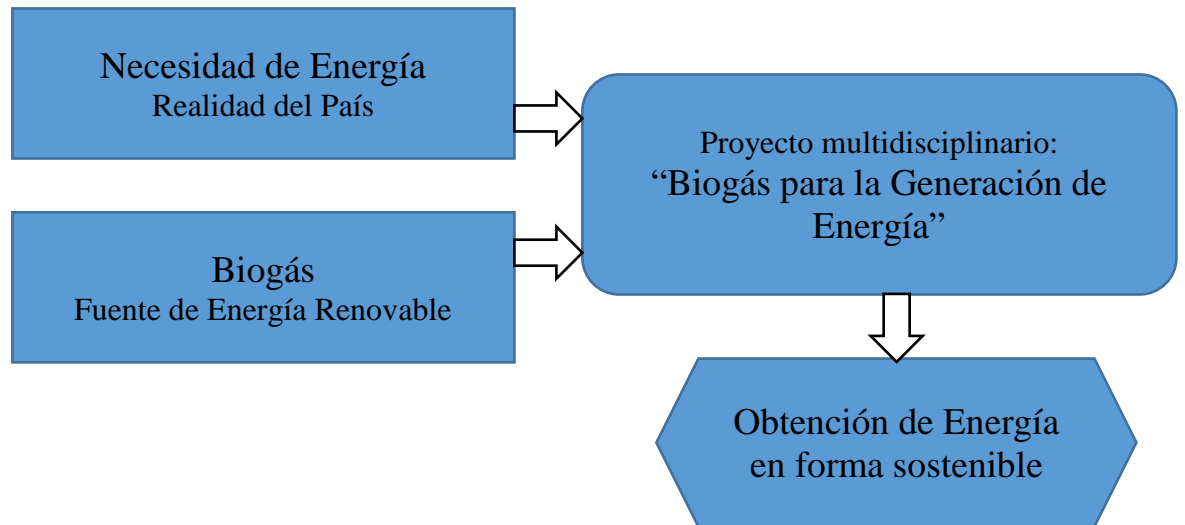
En el proyecto **“Biogás para la generación de energía”** [Ref. 4] se continuó la investigación efectuada en el proyecto **“Uso del biogás en motores”** y no solamente la continua sino que la amplía. Entre julio del 2000 y junio del 2002, la UNI ejecutó este proyecto del tipo multidisciplinario en el cual intervinieron el **Instituto General de Investigación (IGI-UNI)**, el **Centro de Energías Renovables (CER-UNI)** y las facultades de **Ingeniería Mecánica (FIM)**, **Ingeniería Química (FIQM)** e **Ingeniería Ambiental (FIA)**. En este proyecto se pretende enfocar al biogás como parte importante de una cadena energética en nuestro país, de donde se podrían obtener no solamente energía eléctrica a través de su combustión en motores, sino también energía térmica y mecánica: tal y como sucede en países desarrollados que ya cuentan con una gran cantidad de biodigestores. El proyecto **“Biogás para la generación de energía”** estaba dividido en: Investigación del proceso e investigación de la utilización del biogás.

La investigación del proceso para obtener biogás estuvo a cargo de las facultades de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental, donde se experimenta con biodigestores

cargados con estiércol de vaca, cuy, cabra y desechos orgánicos del asentamiento humano “El Carmen” colindante con la UNI. Los objetivos que perseguía esta parte del proyecto eran los siguientes: Caracterizar los diversos tipos de cargas de los biodigestores, con el fin de obtener información útil para el diseño de sistemas de generación y utilización de biogás; estudiar el uso de bacterias metanógenas que aceleren el proceso de fermentación en el biodigestor, especialmente en invierno cuando disminuye la producción de biogás; separar el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O del biogás con el fin de obtener metano de alto porcentaje de pureza.

La investigación sobre la utilización estuvo a cargo de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Las pruebas experimentales se realizaron en la **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI (ex UNITRAR)** donde se produce biogás a partir de las aguas servidas por degradación bacteriológica. Esta parte del proyecto, a cargo de la FIM, se encontraba a su vez dividido en los siguientes subproyectos:

- **Optimización del diseño del carburador para biogás.** Aquí se buscó la optimización del diseño mediante modelado matemático y experimentación. Este subproyecto fue desarrollado por el bachiller Juan Pablo Trelles Salvador en su tesis titulada “Modelamiento y Optimización del diseño de un carburador para biogás”.
- **Arranque automático del motor.** Debido a la dificultad de encender el motor con biogás (debido a su bajo poder calorífico), el encendido debía realizarse con gasolina. Entonces se propuso implementar un sistema que permita optimizar los sistemas de arranque y alimentación de combustible al motor. El sistema de arranque también debería incluir el mecanismo de regulación. Este subproyecto fue desarrollado por el bachiller Jhoany Jhordann Barrera Escobedo en su tesis titulada “Optimización del sistema de alimentación de combustible de un motor de combustión Interna de encendido por chispa a biogás, estacionario de 6 kW de potencia”.
- **Determinación del desgaste del motor funcionando con biogás.** Aquí se deseaba determinar la influencia del biogás en la vida útil del motor funcionando con este combustible, comparativamente con la vida útil del motor funcionando con gasolina.
- **Utilización térmica del biogás.** Donde se pretendía utilizar al biogás directamente en aplicaciones térmicas (quemadores y lámparas). Aquí, se desarrolló el diseño óptimo de un quemador para biogás.



**Figura 1.1** Concepción del proyecto “Biogás para la generación de energía”

En agosto del año 2002, se aprobó la realización de un nuevo proyecto multidisciplinario titulado: **“Energía y fertilizantes a mediana escala a partir de la biomasa”**, cuya ejecución estuvo a cargo de las mismas facultades que el proyecto anterior y fundamentalmente por el **Instituto General de Investigación (IGI-UNI)**. El proyecto se llevó a cabo entre abril del 2003 y marzo del 2004 y estuvo dirigida por el Dr. Johnny Nahui hasta agosto del 2003 y luego por el Ing. Rafael Espinoza hasta su término [Ref. 5]. En este proyecto se persiguen los siguientes objetivos: Generar tecnología para procesar biomasa, de origen tanto urbano como rural a nivel de planta piloto para producir energía y fertilizantes; estudiar la complementación de la energía generada por el biogás con la energía eólica; difundir la tecnología generada en los dos primeros proyectos. Además, también pretendía lograr objetivos específicos como: Desarrollar digestores modulares de una capacidad de 30 m<sup>3</sup>; desarrollar los procesos para generar metano (CH<sub>4</sub>), CO<sub>2</sub>, bioabono y biol; desarrollar los sistemas para generar energía eléctrica de hasta 15 kW de potencia; y desarrollar un aerogenerador de bajo costo.

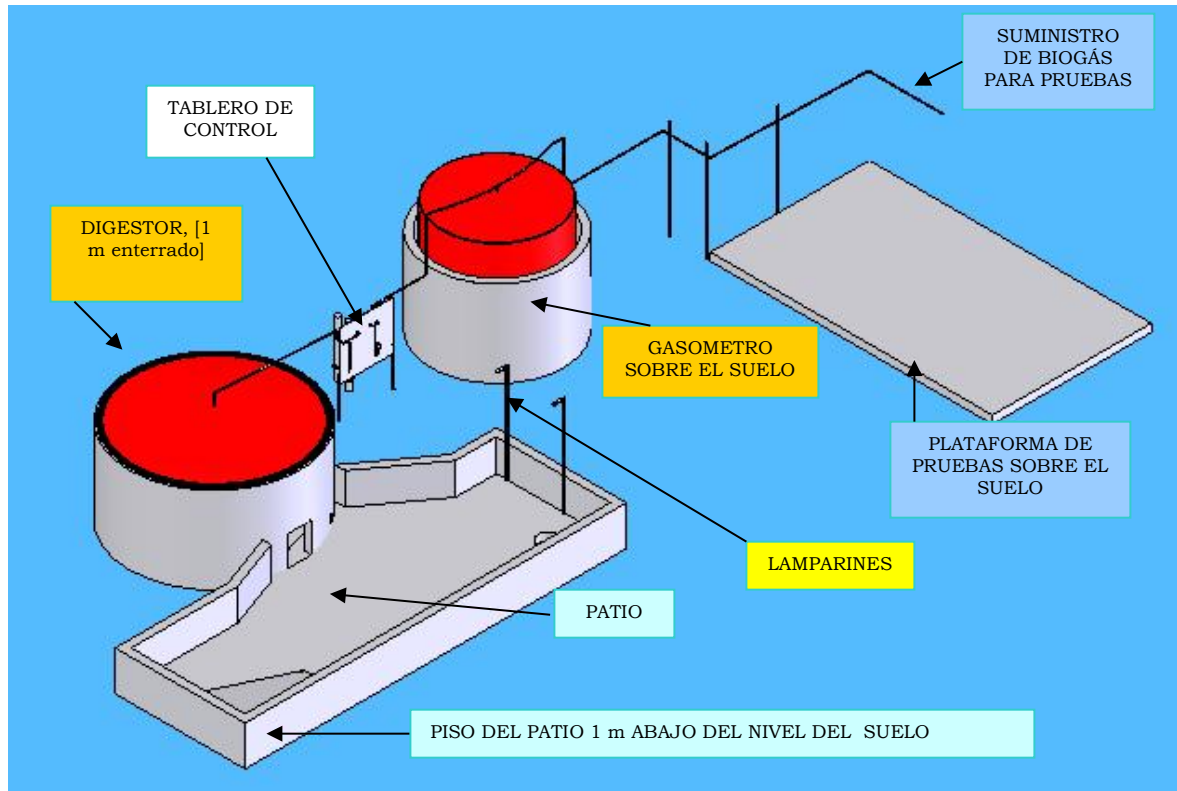
Al igual que en el proyecto anterior, las actividades relacionadas al proceso estuvieron a cargo de las facultades de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental, que tuvieron a cargo fundamentalmente el diseño de la planta (caracterización de las bacterias metanogénicas, volúmenes de biomasa a procesar, eliminadores de anhídrido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), separación del CO<sub>2</sub> y almacenamiento de biogás).

Las actividades relacionadas a la utilización del biogás estuvieron a cargo de la Facultad de Ingeniería Mecánica que divide estos en dos subproyectos: Arranque automático del motor y utilización térmica del biogás. Siendo este último el trabajo desarrollado y

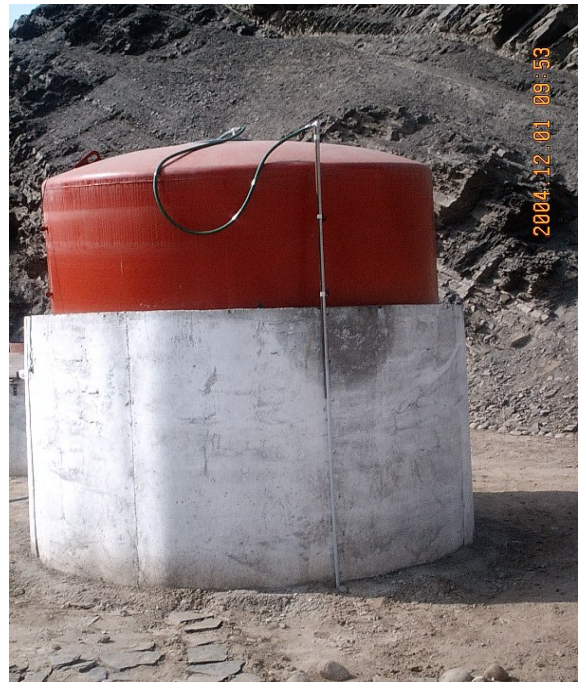
denominado “Diseño y construcción de un quemador de biogás para uso doméstico” por el tesista Marlon Max Huamaní Bellido.

Paralelamente al proyecto anterior, el **Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica (INIFIM)** impulsa el proyecto **“Generación de biogás para aplicaciones termoeléctricas”** [Ref. 6] entre mayo del 2003 y abril del 2004 teniendo a su cargo a los mismos directores del proyecto anterior. En este proyecto se proponen como objetivos los siguientes: el diseño y construcción de un biodigestor de 25 m<sup>3</sup> de capacidad en la Facultad de Ingeniería Mecánica para un estudio adecuado de la generación de biogás; la experimentación de la generación de biogás y su uso posterior en generadores eléctricos de potencias menores de 5 kW y; dar a conocer los resultados logrados en los dos proyectos anteriores.

Entre abril del 2004 y agosto del 2005, se llevaron a cabo dos proyectos **“Generación y uso productivo de energía final mecánica, térmica y eléctrica a partir de la biomasa”** auspiciado por el INIFIM y **“Rentabilización de plantas de generación de biogás y fertilizantes”** auspiciado por el IGI-UNI; dirigidos por el Ing. Rafael Espinoza [Ref. 5]. Estos proyectos tuvieron como objetivo continuar la investigación de “Generación de Biogás para aplicaciones Termoeléctricas” y es así como se logra la construcción de una planta piloto de biogás en la Facultad Ingeniería Mecánica de 25 m<sup>3</sup> de capacidad (PGB25m<sup>3</sup>). El objetivo principal de estos proyectos es el acondicionamiento, instalación y mantenimiento de la planta PGB25m<sup>3</sup> y como objetivos específicos: Experimentar y analizar la generación de biogás; experimentar el uso de biogás generando energía mecánica, térmica y eléctrica; promocionar los resultados y obtener recursos para los desarrollos tecnológicos futuros (digestores de 50 a 100 m<sup>3</sup> de capacidad). Dichos proyectos contaron con el apoyo de las facultades de Ingeniería Química y Textil e Ingeniería Ambiental que se encargaron de las actividades relacionadas al proceso de generación de biogás e influencia en su composición química. En esta parte merece especial mención la labor del Ing. Enrique Neira quien realiza un interesante estudio acerca de la composición del biogás obtenido en la planta (realizado en el laboratorio de Química Aplicada de la FIQT) y también de la mezcla de estiércol de vacuno y paja utilizados para la producción; en dicho estudio se muestra la composición en porcentaje de humedad, nitrógeno y carbono de las muestras. Con lo que respecta al uso del biogás generado, se utilizó el biogás de la planta PGB25m<sup>3</sup> para realizar pruebas experimentales con los siguientes dispositivos: una cocina de biogás de diseño específico para este propósito, dos lamparines de biogás diseñados por el CER-UNI, pruebas en un moto-generador HONDA de 3,5 kW modelo GX-240 adquirido por el IGI-UNI en el año 2000, y un moto-generador nuevo marca BRIGGS STRATTON de 10 kW adquirido por el IGI-UNI. Adicionalmente, también se realizó un control de la producción de biogás de la planta de forma diurna y nocturna durante 60 días (del 15 de abril hasta el 15 de junio del 2005). Estos datos nos servirán de base para realizar el estudio teórico del biogás desarrollado en el capítulo II de la presente tesis.



**Figura 1.2** Disposición esquemática de la planta PGB25m<sup>3</sup> y sus componentes.



**Figura 1.3** Fotografías de la planta de generación de biogás PGB25m<sup>3</sup>.

Continuando con las labores realizadas en los proyectos anteriores, se desarrolló el proyecto **“Economía de las energías mecánica y eléctrica obtenidas por combustión de biogás”** impulsado por el INI-FIM, CER-UNI y dirigido por el Ing. Rafael Espinoza [Ref. 8]. Este proyecto no es más que una continuación de las labores realizadas en la planta PGB25m<sup>3</sup> donde se detallan las labores de acondicionamiento de la planta y el mantenimiento llevado a cabo durante el 2006.

Los logros importantes en este proyecto fueron:

- Se determinó que la producción nocturna de biogás superaba la producción diurna, según con el control de producción de biogás realizado entre el 23 de marzo hasta el 23 de mayo del 2006. El biogás tenía entre 52-54% de CH<sub>4</sub>.
- La temperatura ambiente afecta directamente la producción de biogás, teniendo menor producción de biogás en días de baja temperatura. Así mismo, la baja presión de alimentación de biogás (10 mbar) genera bajos niveles de potencia en la generación eléctrica de grupos electrógenos (30% de la potencia nominal).
- Los costos asociados a la construcción de la planta piloto de biogás PGB25m<sup>3</sup>, los dispositivos de experimentación y mantenimiento de la planta fueron un total de S/.24 400,00; monto que no resulta excesivo considerando que el grueso de los gastos representa la implementación del biodigestor y de los sistemas de pruebas experimentales, además se genera un ahorro energético debido a la utilización de energía casi gratuita, bajos costos de mantenimiento y generación de biol como fertilizante natural.
- Se logró una producción diaria de 10 m<sup>3</sup> de biogás utilizando una mezcla de pre compost (estiércol de vacuno y chala de maíz) más bazofia (rumen) y agua. Así mismo, se propuso experimentar con otros tipos de estiércol diferentes a los utilizados para observar y comparar con los procesos realizados.
- Se realizó pruebas experimentales con un motor de 16 HP, marca BRIGGS STRATTON, donde se logró determinar que para obtener 4 HP de potencia generada cada hora es necesario consumir 1,1 m<sup>3</sup> de biogás aproximadamente mientras que en gasolina 0,1 galones USA.

Finalmente, en los años 2010-2011, se da otro gran paso en la investigación del uso de biogás en los motores de combustión interna. La empresa Maros Green S.A.C. implementa una planta de tratamiento de biogás que transforma gran parte de los residuos orgánicos de caballos (bosta) en biogás (80 m<sup>3</sup> por día de producción) y éste a su vez en energía para uso propio del Hipódromo de Monterrico. En este proyecto conocido como **“El proyecto Jockey Club del Perú”** [Ref. 9] se realiza la implementación de un grupo electrógeno de 58 kW para su funcionamiento con biogás obtenido de la planta instalada, es entonces cuando el Dr. Guillermo Lira y el Bach.





### **1.5 Limitaciones del trabajo:**

Esta investigación se limita al acondicionamiento de grupos electrógenos de baja potencia para su funcionamiento con biogás. Los estudios con respecto a la generación de biogás, corresponden, en mayor parte, a disciplinas de otras ciencias y serían objetivo de proyectos del tipo multidisciplinarios, lo que escapa a los fines planteados. Sin embargo, se puede consultar la bibliografía de los antecedentes, donde ya se han abordado con profundidad muchos de estos temas.

Desde el principio de este trabajo se planteó el requisito de que el sistema debería ser de bajo costo y de fácil implementación, mantenimiento y reparación. Esto restringe el uso de dispositivos que, si bien contribuirían notablemente en la eficiencia de generación de energía eléctrica, encarecerían nuestro sistema y dificultarían notablemente su reparación y mantenimiento en los lugares alejados de las grandes ciudades. Como, por ejemplo, el uso de compresores para elevar la presión de alimentación de biogás o el uso de sensores y actuadores electrónicos.

El acondicionamiento del biogás para su uso en motores de combustión; específicamente, la disminución del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) contenido en el biogás, es tema también de otras disciplinas de la ciencia. Sin embargo, dado que este componente del biogás es altamente corrosivo para las partes internas del motor, el uso de filtros como pequeños tanques de viruta metálica, disminuyen notablemente la concentración de esta componente indeseable del biogás.

Los análisis económicos realizados, se limitan a determinar el costo de implementación de este sistema y el ahorro energético que supone. No es aplicable un análisis del tipo financiero, por ser este un proyecto que persigue un fin social como se mencionó anteriormente.

## CAPÍTULO II

### **ESTUDIO TEÓRICO DEL BIOGÁS, SU OBTENCIÓN Y REQUERIMIENTOS COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

#### **2.1 Biogás:**

El biogás es una mezcla de gases provenientes de la descomposición de materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno). Este proceso puede ocurrir en forma natural como en los pantanos (razón por la que se le denomina también como *gas de los pantanos*), rellenos sanitarios, etc. o en un ambiente controlado como los biodigestores.

Esta mezcla de gases está constituida principalmente por el gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pero también se encuentran pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), argón ( $\text{Ar}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), y trazas de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) [Ref. 10].

La composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta en la siguiente tabla [Ref. 11]:

**Tabla 2.1** Composición aproximada del biogás (en porcentaje).

Componentes	De plantas de biogás			De rellenos
	Wheatley (1979)	FOX (1984)	Hobson (1981)	Meynell (1983)
Metano (CH <sub>4</sub> )	52 - 95%	60 - 70%	60 - 70%	45 - 65%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	9 - 40%	30 - 40%	30 - 40%	34 - 45%
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	0,001 - 5,7%	0,05 - 2%	0,007 - 0,2%	0,5 - 10%
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0,01 - 1,2%	---	2%	0 - 1%
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,1 - 1,8%	1%	4%	0 - 1%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,02 - 6,5%	---	---	0 - 1%
Argón (A)	0,001%	---	---	---
Monóxido de carbono (CO)	0,001 - 2,1%	---	0,001 - 1%	---
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	trazas	---	---	trazas

### Propiedades de las principales componentes del biogás:

**Metano (CH<sub>4</sub>):** Es el mayor componente del biogás (entre 50 y 80%), y es el que le confiere las características de combustible. Por lo tanto, el valor energético del biogás, estará determinado por la concentración de metano. El metano es incoloro, inodoro y posee un poder calorífico inferior de aproximadamente 50 000 kJ/kg. Suele ser usado como combustible para calefacción y cocina, además de ser utilizado como combustible para algunos motores de combustión interna. En las plantas de biogás se suele limpiar el biogás de todos los demás componentes con la finalidad de obtener CH<sub>4</sub> con 100% de pureza (“lavado de biogás”), el cual suele ser usado como combustible en motores de camiones, previa compresión hasta 200 bar. De los demás componentes, algunos tienen un pequeño contenido energético, sin embargo, no participan en el proceso de combustión.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** El dióxido de carbono es el segundo componente con mayor presencia en el biogás (20 a 50%). Este gas es de gran utilidad en la industria (producción de bebidas gasificadas, hielo seco, gases de protección en el proceso de soldadura, etc.). El dióxido de carbono puede ser un agente corrosivo cuando está bajo altas presiones en presencia de agua, produciendo ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

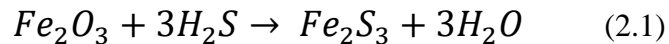
**Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S):** Esta componente se encuentra en el biogás en baja proporción (0,10 - 0,50%), de olor característico a huevo podrido y altamente corrosivo,

particularmente para el cobre, hierro y aceros. Para algunos motores se especifica como límite máximo permitido un 0,15% (equivalente a 1500 ppm) [Ref. 17], por esta razón es necesario el uso de filtros de biogás que disminuyan su concentración.

### **Remoción del ácido sulfhídrico del biogás:**

Hasta hace pocos años la explotación del biogás estaba limitada por sus compuestos corrosivos y su composición fluctuante. Además de la humedad que es un factor que acelera la corrosión (el H<sub>2</sub>S es oxidado en SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> durante la combustión y por la reacción con el vapor de agua, permitiendo la formación de H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> y ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Sin embargo, el desarrollo de tecnología para la remoción del ácido sulfhídrico del biogás, ha potenciado su utilización. En términos generales el H<sub>2</sub>S puede ser removido utilizando tecnologías “Secas” o tecnologías “Húmedas” [Ref. 13].

Las tecnologías secas se conforman de sustratos, por donde fluye el biogás libremente, reaccionando química o físicamente con el mismo; reteniendo así el H<sub>2</sub>S a su paso. El sustrato “seco” más utilizado es una forma y fuente de óxido de hierro, el cual reacciona con el H<sub>2</sub>S para formar sulfuro de hierro, un compuesto no gaseoso; por tanto el H<sub>2</sub>S no podrá seguir el flujo con el biogás.



A lo largo de la historia del biogás, existe el mito de que el uso de una alambrina de acero dentro de la tubería (Figura 2.1) será suficiente para la remoción del H<sub>2</sub>S en el biogás. Sin embargo, como se expresa en la ecuación 2.1, la reacción de H<sub>2</sub>S con “hierro”, es en realidad con óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), en otras palabras, la misma debe estar oxidada para poder surtir efecto.



**Figura 2.1** (a) Alambrina no oxidada, (b) Alambrina oxidada

Existen más de 60 formas de óxido de hierro, formando diferentes tipos de estructuras cristalinas (alfa – gamma) y cada uno tendrá una reacción química diferente con el  $H_2S$ , por tanto, su eficiencia es variable.

Entre otros sustratos “secos”, se mencionan: óxido de zinc, sólidos alcalinos (hidróxido de sodio), absorbentes (su remoción no es química sino física) tales como el carbón activado y la zeolita. Este tipo de productos son utilizados en menor grado dado sus altos costos de implementación.



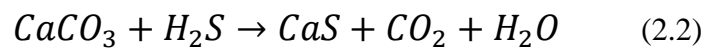
**Figura 2.2** Filtro para la remoción del H<sub>2</sub>S del biogás utilizando tecnología seca.

La otra forma de remover el H<sub>2</sub>S en el biogás es utilizando sustratos líquidos. Una de las opciones es el uso de agua, pues el H<sub>2</sub>S presenta una capacidad interesante de disolución. Para esto se utilizan equipos llamados “lavador de gases” (Figura 2.3), los cuales hacen pasar la corriente de biogás contra una “lluvia” de agua. Parte de los inconvenientes para su aplicación en hogares rurales es que el biogás debe estar comprimido, por lo que se incrementan los costos de implementación. Adicionalmente, para crear estas “lluvias” de agua se requieren bombas, lo que incrementa los costos de mantenimiento.



**Figura 2.3** Lavador de gases ubicado en E.A.R.T.H. (Escuela de agricultura de la región tropical húmeda).

Una sustancia líquida que es común mencionar es el agua de cal (carbonato de calcio disuelto en agua). Para esto se utiliza el mismo concepto de lavado de gases, pero en lugar de emplear agua se usa carbonato de calcio disuelto en agua. Químicamente, la reacción que ocurre es la siguiente:



También se utilizan sustancias líquidas para remover  $H_2S$  a nivel industrial; tales como: lodos de óxido de hierro y zinc, soluciones de hierro quilatado y otros compuestos básicos (NaOH en forma acuosa y de aminas). Sin embargo, de todas las alternativas propuestas, los sustratos sólidos representan una alternativa más viable para los hogares rurales debido a su fácil implementación y bajo costo.



## 2.2 Propiedades físico-químicas del biogás:

Las propiedades del biogás variarán de acuerdo a la composición del mismo, así como de las condiciones de entrada (presión y temperatura) a las que es suministrado para su uso correspondiente. Las propiedades físico-químicas del biogás, con diferentes porcentajes de CH<sub>4</sub>, a condiciones estándares (101,3 kPa y 273 K), se muestran en la tabla 2.2 [Ref. 10]:

**Tabla 2.2** Algunas propiedades del biogás.

Propiedad	Combustible		
	Gasolina	Biogás (60% de CH <sub>4</sub> )	Biogás (80% de CH <sub>4</sub> )
Poder calorífico Inferior [MJ/m <sup>3</sup> ]	44,0*	21,6	28,8
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	720-780	1,21	0,96
Velocidad del frente de llama laminar [m/s]	0,35 - 0,55	0,25	---
Relación estequiométrica aire combustible [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	---	5,71	7,57
Relación estequiométrica aire combustible, [kg/kg]	14,7 - 15,1	6,1	10,2
Poder calorífico por unidad de volumen de mezcla (con λ = 1) [MJ/m <sup>3</sup> ]	3,74	3,23	3,36
Número de octano (método research)	66 - 97	130**	---

\* En MJ/kg.    \*\* con 70% de CH<sub>4</sub>

### 2.2.1 Densidad:

La densidad del metano contenido en el biogás se halla de acuerdo a las relaciones de los gases ideales:

$$\rho_{CH_4,real} = \rho_{CH_4,std} \cdot \frac{p_{real}}{p_{std}} \cdot \frac{T_{std}}{T_{real}} \quad (2.3)$$

Donde:

Los subíndices “real” y “std” identifican a las condiciones reales (presión y temperatura de suministro del gas) y estándar respectivamente.

$$(p_{std} = 1013 \text{ mbar}, T_{std} = 273 \text{ K})$$

$$\rho_{CH_4, std} = 0,72 \text{ kg/m}^3$$

Las condiciones  $p_{real}$  y  $T_{real}$  son las condiciones absolutas a la que se suministra el gas al carburador.

### 2.2.2. Poder calorífico:

El poder calorífico variará dependiendo del tipo de gas que estemos utilizando, y por lo tanto, en función de los componentes del combustible que estemos empleando. En el caso del biogás depende principalmente de su contenido de  $CH_4$ .

El poder calorífico inferior es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. Si consideramos el calor latente del vapor de agua, entonces el calor desprendido sería el poder calorífico superior.

El poder calorífico del biogás se puede hallar utilizando la siguiente relación [Ref. 11]:

$$Hu_{biogás_{real}} = \frac{V_{CH_4}}{V_{tot}} \cdot \rho_{CH_4, real} \cdot Hu_{std} \quad (2.4)$$

Donde:

$\frac{V_{CH_4}}{V_{tot}}$ : Contenido volumétrico del  $CH_4$  (fracción volumétrica).

$Hu_{std}$ : Poder calorífico inferior del  $CH_4$  a condiciones estándares (50 000 kJ/kg).

### 2.2.3 Humedad:

La humedad también influye en el análisis de las propiedades. El biogás que sale de la planta usualmente está completamente saturado con vapor de agua (humedad relativa de 100%). Dependiendo de la tubería de gas, esta humedad se reduce debido a la condensación del vapor al enfriarse, la cual es retenida en las trampas de agua ubicadas a lo largo de la tubería. Por esta razón, no se suele considerar humedad en el gas que ingresa al motor. En aquellos casos en los cuales es necesario considerar la humedad, en la ecuación 2.3 se debe considerar como presión real a la diferencia entre la presión total del gas y la presión parcial del vapor de agua [Ref. 11]:

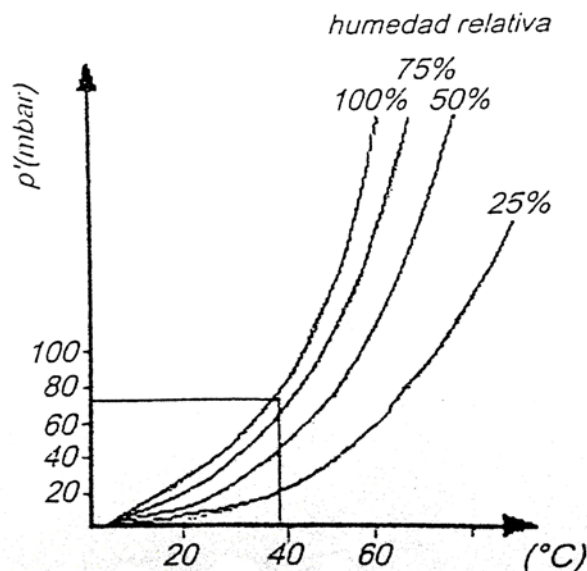
$$p_{\text{real}} = p_t - p' \quad (2.5)$$

Donde:

$p_t$ : Presión total del gas.

$p'$ : Presión parcial del vapor de agua.

La presión parcial del vapor de agua puede ser obtenida a partir de la siguiente gráfica o de tablas termodinámicas.



**Figura 2.4** Presión parcial del vapor de agua a diferentes temperaturas.

### 2.2.4 Viscosidad:

La determinación de la viscosidad del biogás es necesaria para fines de cálculo del número de Reynolds, y con ello saber el tipo de flujo que circula por las tuberías de alimentación de combustible y las pérdidas mecánicas que se generan en dicho flujo.

La viscosidad dinámica o absoluta del biogás se puede obtener asumiendo que es una mezcla ideal de gases con la fórmula empírica siguiente [Ref. 11]:

$$\frac{1}{\mu_{biogás}} = \frac{\frac{f_{CO_2}}{\nu_{CO_2}} + \frac{f_{CO_4}}{\nu_{CO_4}}}{f_{CO_2} + f_{CH_4}} \quad (2.6)$$

Donde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica de la especie a una temperatura determinada.

$f$ : Fracción molar de la especie.

Conociendo la viscosidad dinámica del biogás, usaremos la siguiente relación para determinar su viscosidad cinemática:

$$\nu_{biogás} = \frac{\mu_{biogás}}{\rho_{biogás}} \quad (2.7)$$

Donde:

$\nu$ : Viscosidad cinemática de la especie a una temperatura determinada.

$\rho$ : Densidad de la especie a la misma temperatura anterior.

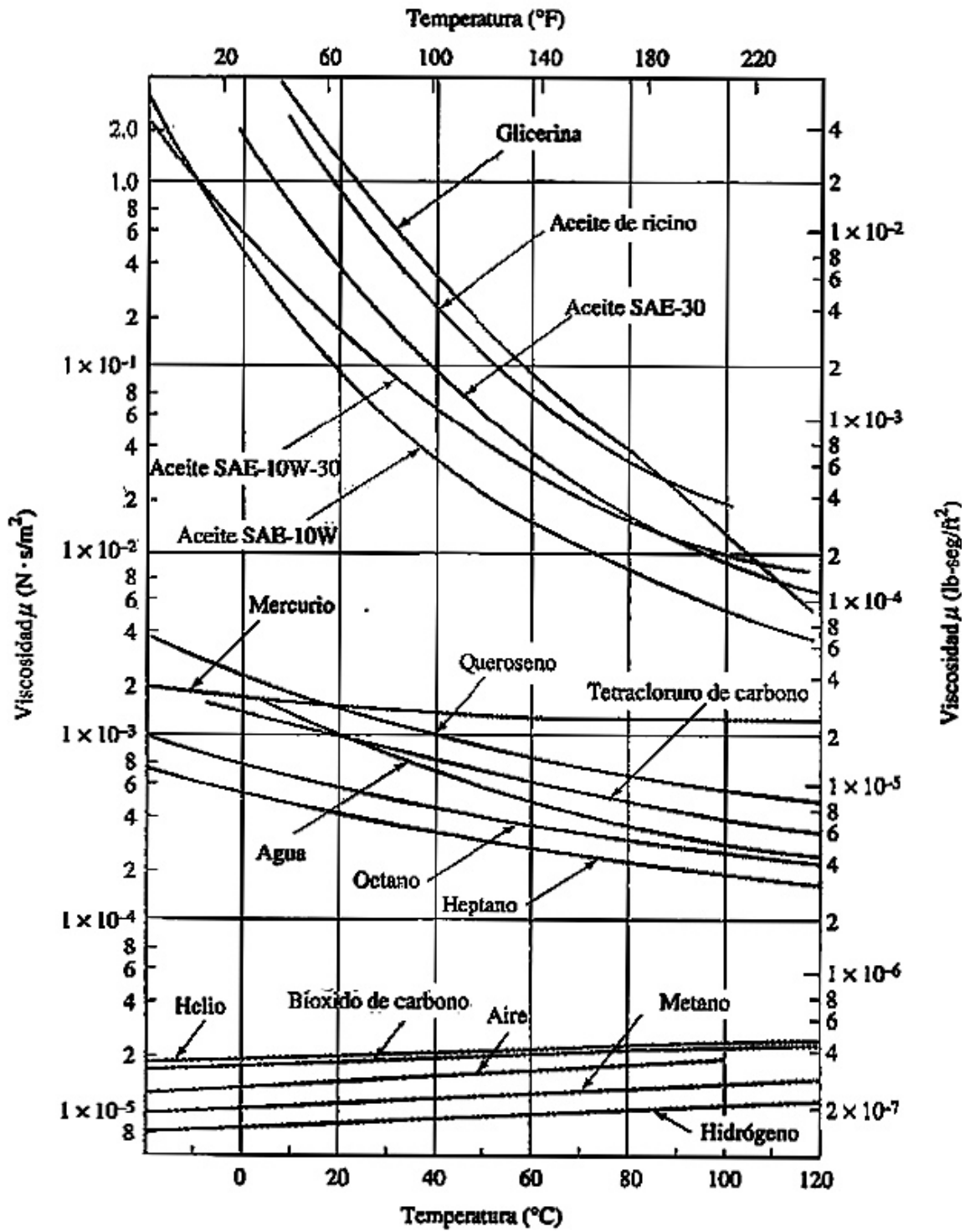


Figura 2.5 Variación de la viscosidad dinámica de diversos fluidos con la temperatura [Ref. 26].

### 2.2.5 Relación aire-combustible estequiométrica del biogás:

Es la relación existente entre la cantidad de aire teórica requerida para realizar una combustión completa con el combustible, sin exceso de aire. Esta relación puede ser hallada por la siguiente fórmula general aplicable a cualquier combustible de la forma  $C_nH_mO_p$ :

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot \left( \frac{n}{1} + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

$L_0$ , es la relación aire/combustible estequiométrica ( $m^3_{\text{aire}}/m^3_{\text{comb}}$ ).

Para el caso del biogás debemos considerar al combustible como una mezcla en diferentes proporciones de metano y dióxido de carbono. Entonces aplicando la ecuación anterior para un porcentaje de metano y de dióxido de carbono:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot [\%CH_4 \cdot \left( \frac{1}{1} + \frac{4}{4} \right) + \%CO_2 \cdot \left( \frac{1}{1} - \frac{2}{2} \right)]$$

$$L_0 = 9,524 \cdot [\%CH_4] \quad (2.9)$$

Por lo tanto, sólo será necesario conocer el porcentaje de metano contenido en el biogás para determinar la relación aire-combustible teórica ( $m^3_{\text{aire}}/m^3_{\text{comb}}$ ) multiplicándolo por la constante hallada.

El coeficiente de exceso de aire está definido por:

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

Donde:

$L$  es la relación aire/biogás real y  $L_0$  es la relación aire combustible teórica.

De la expresión podremos deducir que si  $\lambda < 1$  entonces hay un defecto de aire, por lo que la combustión que se realizará será incompleta (se dice que la mezcla es rica), y si

$\lambda > 1$  entonces hay suficiente aire para realizar la combustión completa (se dice que la mezcla es pobre).

### 2.2.6 Número de octano:

El número de octano determina la viabilidad del biogás de su utilización en los motores de combustión de encendido por chispa. El número de octano indica la resistencia a la detonación o el pre encendido del combustible. Cuando el proceso de combustión transcurre anormalmente (combustión detonante), aparece el golpeteo metálico estridente e incluso se produce la destrucción de las piezas del motor. El valor del número de octano también varía con la composición [Ref. 14].

**Tabla 2.3** Número de octano (método research) del biogás.

Concentración de metano	Número de octano
100% de CH <sub>4</sub>	120
70% de CH <sub>4</sub>	130

### 2.3 Métodos de obtención de biogás:

El proceso de fermentación anaeróbica se produce en forma natural, como en los pantanos, rellenos sanitarios, campos de arroz, etc. Sin embargo, se puede efectuar en depósitos cerrados llamados digestores. Estos digestores pueden ser construidos con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico.

#### Proceso de formación de biogás:

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico complejo que se desarrolla en tres etapas, utilizando en cada grupo de ellas un grupo de microorganismos específicos.

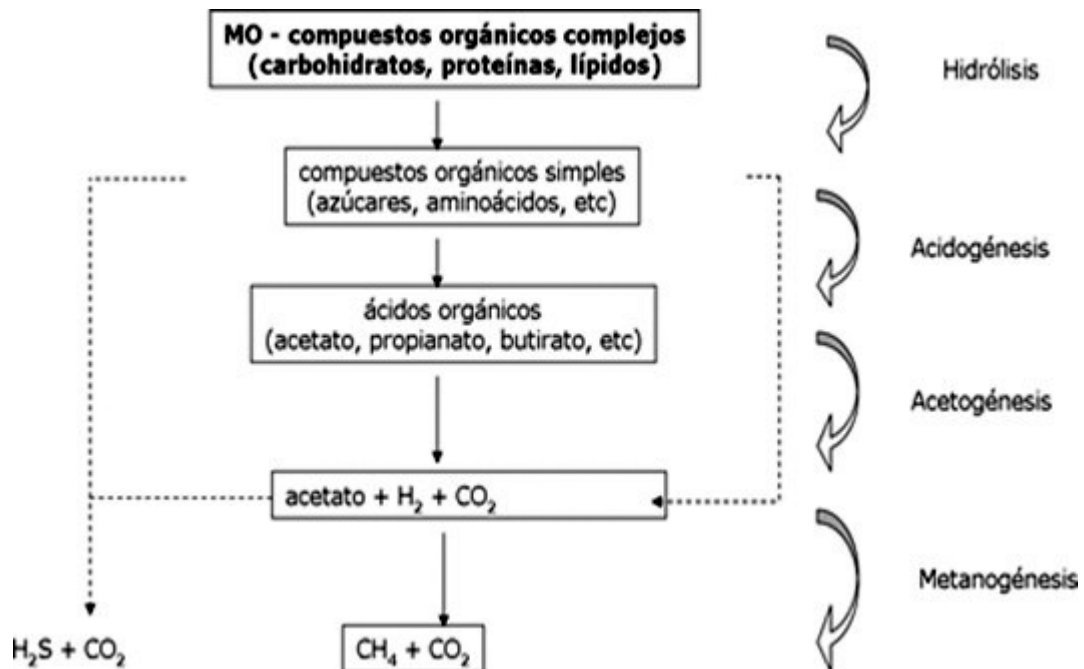
En la primera etapa, denominada *hidrólisis*, los compuestos orgánicos insolubles (grasas, proteínas y carbohidratos) son transformados, por acción de enzimas producidas por

bacterias anaeróbicas facultativas, en compuestos simples y solubles tales como aminoácidos, glicéridos péptidos y azúcares.

En la segunda etapa, llamada *acidogénesis*, los compuestos simples formados en la etapa anterior sufren un proceso de fermentación por ácido-bacterias convirtiéndose en ácidos simples de hasta 6 átomos de carbono. Estas bacterias formadoras de ácidos son también facultativas, es decir viven tanto en presencia como en ausencia de oxígeno (aire).

En la tercera etapa, conocida como *metanogénesis*, se da la formación de metano: las bacterias metanogénicas, las cuales son estrictamente anaeróbicas, utilizan la fermentación del ácido acético de la etapa anterior y la reducción de  $CO_2$  por hidrógeno para producir biogás.

Estas etapas son esquematizadas en la figura 2.6.



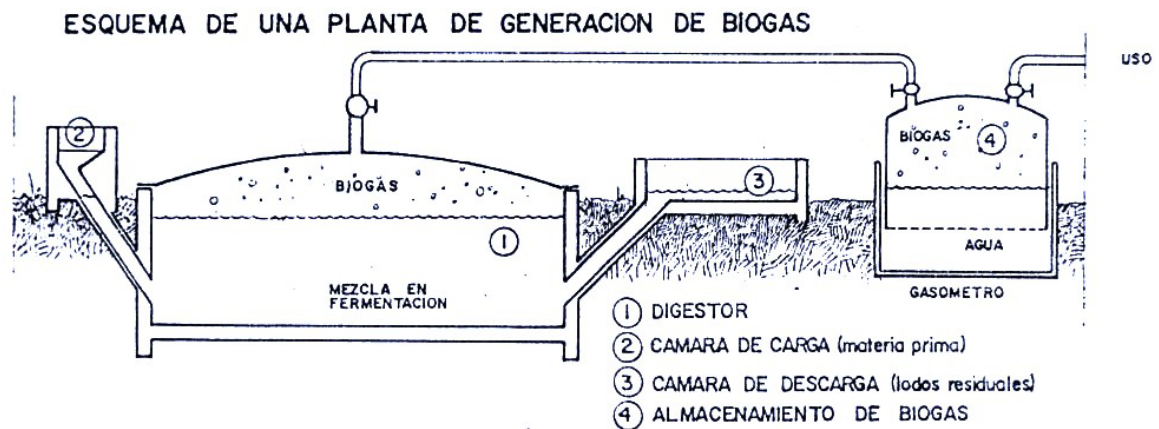
**Figura 2.6** Etapas de formación del biogás.



## 2.4 Biodigestores:

Un biodigestor es un contenedor herméticamente cerrado, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (restos de animales, vegetales o humanos) en determinada dilución de agua, para que se descomponga de manera anaeróbica produciendo biogás y fertilizantes naturales ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (biol).

El esquema de un biodigestor típico es mostrado en la Figura 2.7 y está constituido generalmente por las siguientes partes:



**Figura 2.7** Esquema de un biodigestor típico.

- a) Cámara de digestión: Consiste en un pozo o tanque hermético donde ocurre la fermentación.
- b) Cámara de carga: Lugar por donde se alimenta periódicamente al digestor. Esta cámara puede o no existir dependiendo del diseño del digestor.
- c) Cámara de salida o descarga: Lugar por donde periódicamente se evacua el material ya fermentado. Dependiendo del diseño, puede o no existir.
- d) Cámara de almacenamiento o contenedor de biogás: Es el contenedor primario del gas. Existen cámaras de almacenamiento flotante o rígido, en algunos diseños es necesario que el gas se almacene en un gasómetro aparte.

Para su construcción se deben tener en cuenta algunas consideraciones generales:

- No acumular material inflamable cerca del biodigestor.
- El digestor debe encontrarse cerca de la zona donde se recoge el sustrato de partida y a la zona de consumo, pues las presiones obtenidas no permiten el transporte a distancias mayores a 30 m.
- Debe estar a por lo menos 10 – 15 m de cualquier fuente de agua para evitar posibles contaminaciones.
- Debe ubicarse preferentemente protegido de vientos fríos y donde se mantenga relativamente estable la temperatura, tratando de que reciba el máximo de energía solar.
- Debe construirse en un lugar ventilado para evitar riesgos de asfixia y explosión. Esto debido a que cuando el biogás es liberado a la atmósfera, desplaza al aire y como consecuencia los niveles de oxígeno disminuyen.
- No debe alterar bruscamente la presión interna del biodigestor; el cargado inicial se debe realizar poco a poco y no de una sola vez, evitar el uso de bombas mecánicas para retirar o añadir agua.
- Se debe evitar la caída de muros y/o rajaduras de paredes durante la construcción del biodigestor.

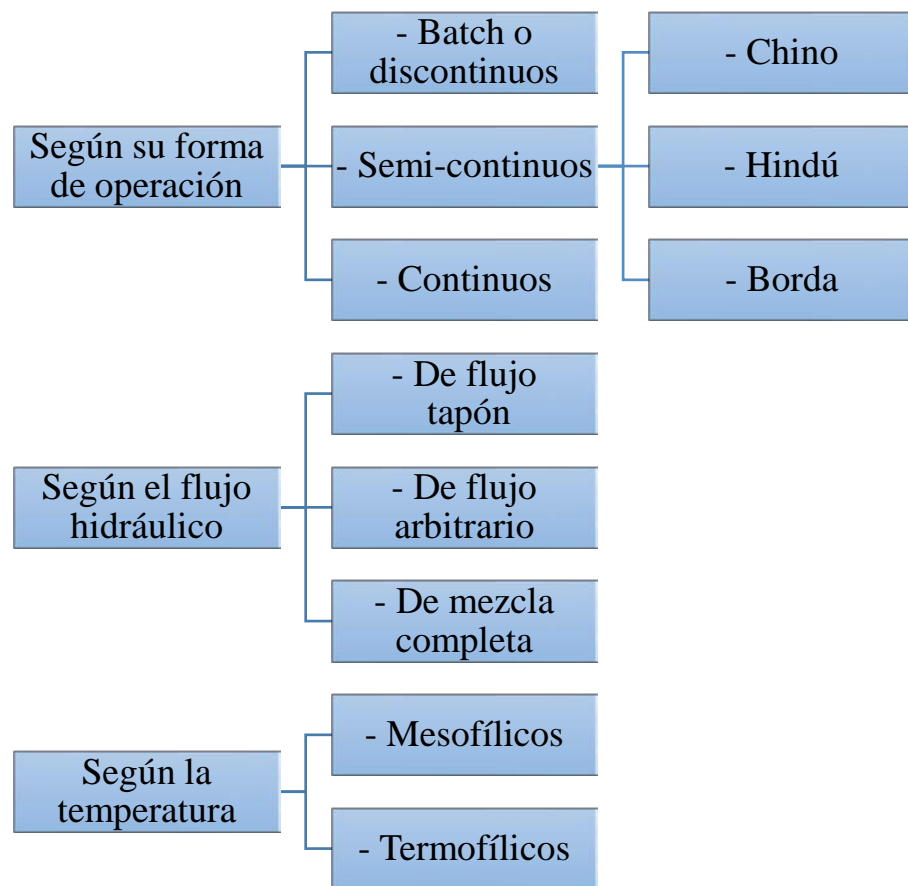
Así mismo, se deben tener algunas consideraciones generales para realizar el mantenimiento del biodigestor y de los accesorios instalados para la utilización del biogás. Los principales son:

- Revisar en forma continua el estado de la planta de biogás, con la finalidad de detectar fugas de gas, fugas de agua o rajaduras en las paredes por donde podría ingresar el aire exterior (tóxico para las bacterias productoras de metano).
- Realizar un buen agitado del estiércol y el agua, si es posible, para inhibir el proceso de formación de natas.
- Realizar una limpieza general por lo menos una vez al año.

- Antes de penetrar a un biodigestor para limpiarlo, dejarlo destapado por lo menos cinco días para desalojar el biogás.
- En las cargas periódicas separar los materiales inorgánicos tales como piedras, tierra, etc.

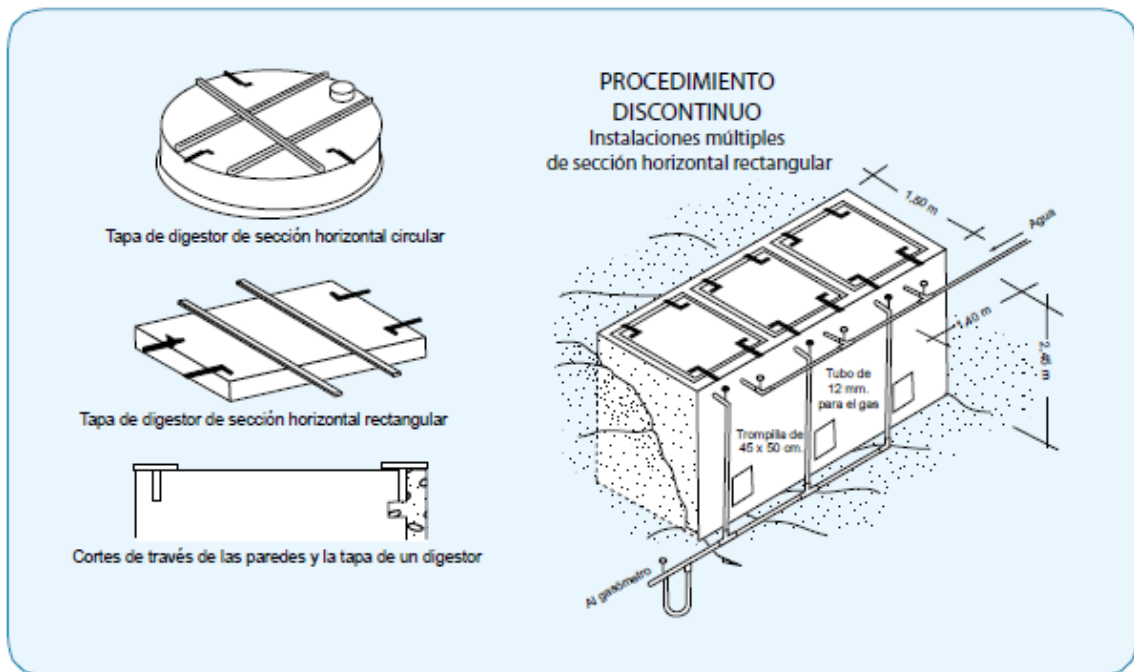
**2.4.1 Tipos de Biodigestores:**

Los sistemas de biodigestión se pueden clasificar según tres criterios, estos son ilustrados en la figura 2.8 [Ref. 11]:



**Figura 2.8** Tipos de biodigestores.

Los sistemas Batch o discontinuos (Figura 2.9) poseen la característica que el afluente o materia orgánica se mantiene por tiempos prolongados dentro de la cámara de biodigestión. Se cargan una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una sola vez, cuando ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Este tipo de biodigestores es eficaz para la digestión de materiales celulósicos, que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. El modelo más conocido es el OLADE-GUATEMALA, apropiado para cargar vegetales y para el tratamiento de basura orgánica.

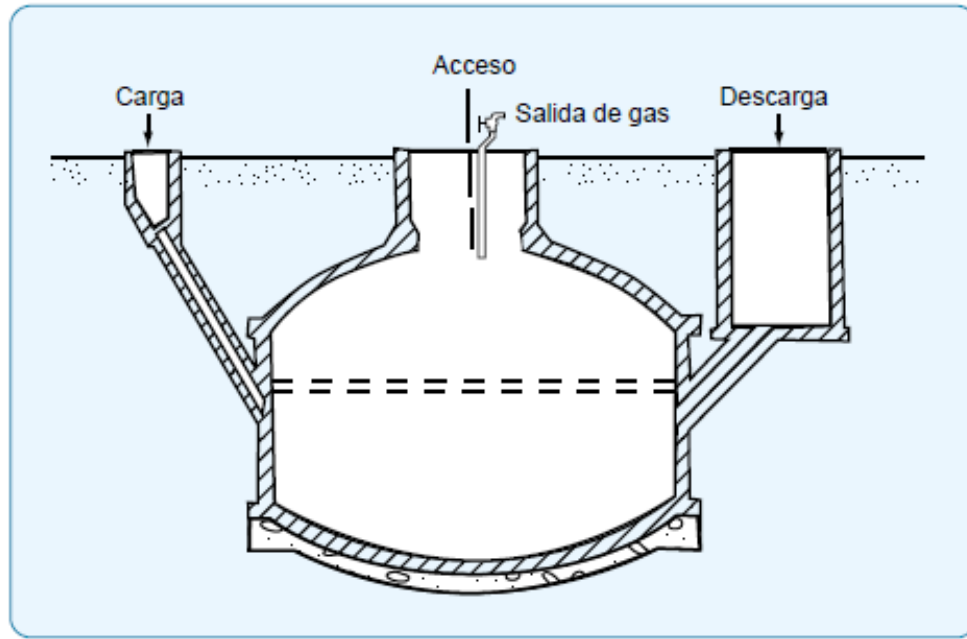


**Figura 2.9** Biodigestor discontinuo o Batch.

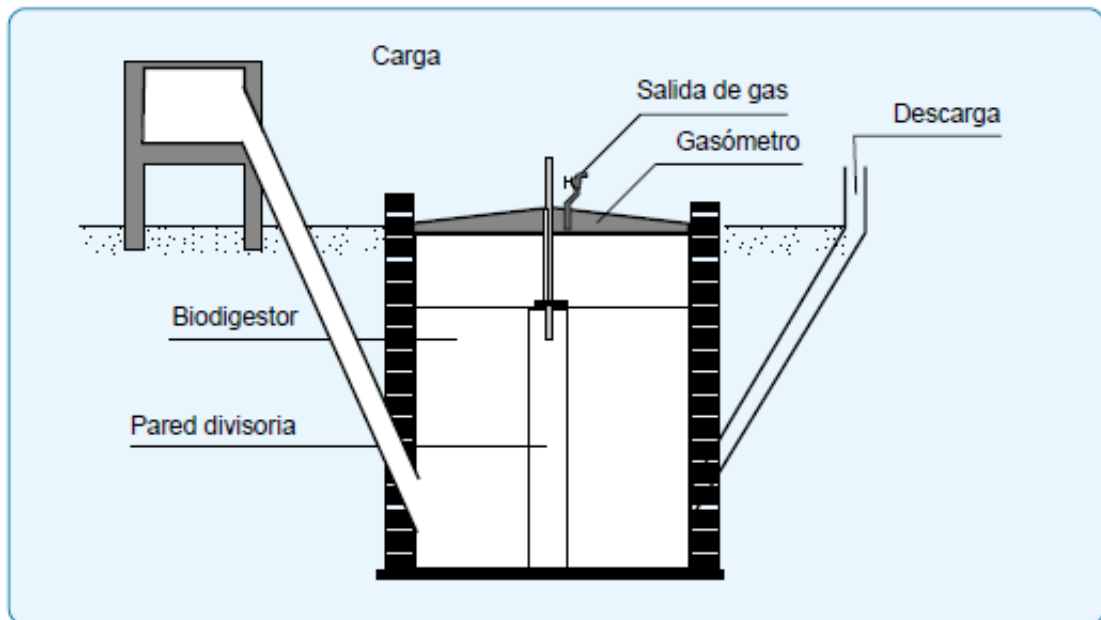
En los digestores semi-continuos la primera carga que se introduce consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico.

Dentro de los sistemas semi-continuos, en el medio rural el más usado es el modelo chino (Figura 2.10), adecuado para el tratamiento de mezclas de estiércol y pajas. El modelo hindú (Figura 2.11) y el tipo horizontal (Figura 2.12) son adecuados para el

tratamiento de estiércol puro. En la tabla 2.4 se hace una comparación entre los diferentes biodigestores rurales [Ref. 5, 11].



**Figura 2.10** Biodigestor tipo chino.



**Figura 2.11** Biodigestor tipo hindú.

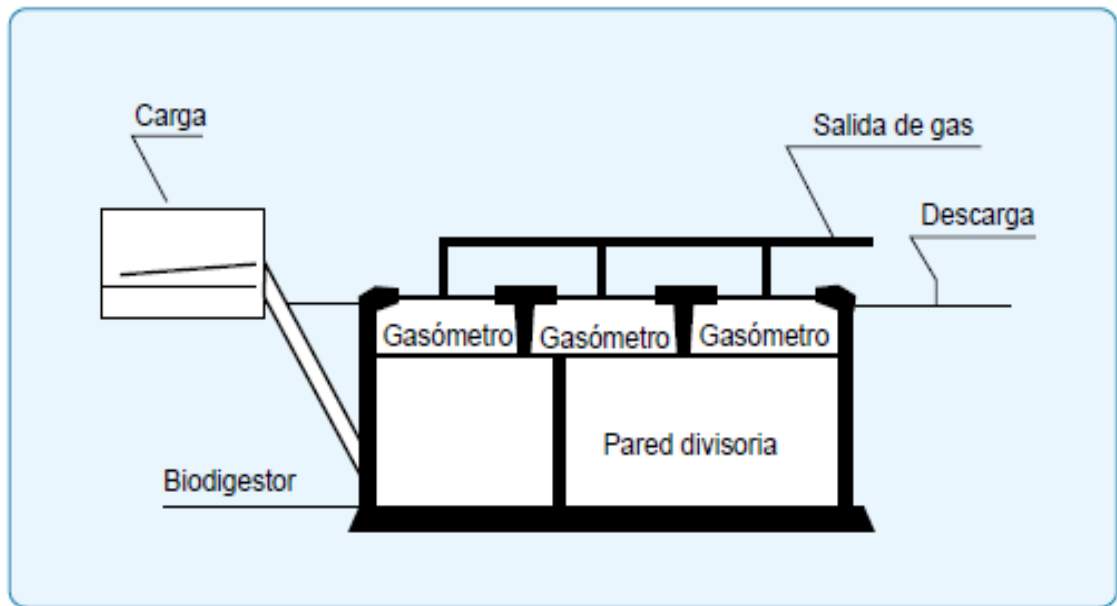


Figura 2.12 Biodigestor horizontal.

Tabla 2.4 Biodigestores rurales.

Características	Chino	Hindú	Horizontal	Olade - Guatemala
<b>Sistema de digestión</b>	Batch y de mezcla	Desplazamiento vertical	Desplazamiento horizontal	Batch
<b>Características de diseño</b>	Circular, pequeño, achatado.	Cilindro, vertical, tanque de gas	Horizontales, diferentes secciones, cúpula fija	Cilindro, vertical, tanques de gas flotante
<b>Sustratos</b>	Residuos agrícolas, excreta humana.	Estiércol	Estiércol	Residuos agrícolas
<b>Tiempo de retención [días]</b>	45 - 90	30 - 60	30 - 60	-----
<b>Producción de biogás [m<sup>3</sup> biogás/ m<sup>3</sup> digestor]</b>	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,8 - 1,0	0,5 - 1,0

Los digestores continuos se usan cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control.

A nivel industrial se utilizan sistemas continuos como los biodigestores convencionales de tanque agitado, sistemas y reactores de alta eficiencia, principalmente para el tratamiento de efluentes urbanos y residuales.

## **2.5 Factores que influyen en la producción de biogás:**

### **2.5.1 Temperatura:**

La temperatura controla la velocidad de crecimiento microbiano; la producción de biogás es más rápida a mayor temperatura. De acuerdo a esto, la descomposición anaeróbica se desarrolla en mejores condiciones dentro de los rangos 28 – 38 °C (rango mesofílico) y de 50 – 60 °C (rango termofílico). Las temperaturas del rango termofílico deben conseguirse con aporte de calor externo.

Este factor representa la mayor dificultad para la implementación de digestores en zonas alto-andinas debido a las heladas o el friaje. Sin embargo, una alternativa que podría hacer viable un proyecto de este tipo es la construcción de invernaderos para el acondicionamiento del biodigestor. El biodigestor debe estar enterrado una profundidad determinada (dependiendo del tipo de digestor), de manera que no pierda calor por convección con el aire circulante; deberán construirse paredes aislantes por la razón anterior (lo más recomendable en estos casos es que sea de adobe) las cuales servirán de base para la carpa solar colocada como techo; a su vez por la parte interna del lecho se colocará un plástico que evite el contacto de la humedad exterior con el aislante; sobre este plástico se colocará una cama de paja y sobre esta el biodigestor tal como se realizó en una implementación en Cajamarca [Ref. 15].

### **2.5.2 Acidez:**

Un pH de 7,2 es lo más recomendable (rango aceptable: 6,6 – 8), aunque al inicio de la fermentación, el pH se regula automática y naturalmente al producirse metano (3era. etapa, si la carga está bien formulada). En casos de excesiva acidez, se puede elevar el pH agregando cal o ceniza para restablecer el equilibrio.

### 2.5.3 Proporción sólido – líquido:

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada **sólidos totales**. El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos totales y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de biogás.

Experimentalmente se ha demostrado que para sistemas continuos y semicontinuos se necesita una carga de alta dilución, entre 6-10% en peso de sólidos totales es lo más recomendable. Para calcularla se deberá tener en cuenta la humedad contenida en la materia cruda (Tabla 2.5).

En sistemas discontinuos, es más conveniente trabajar con baja dilución (carga seca), entre 25% y 35% de sólidos totales.

**Tabla 2.5** Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales [Ref. 2]

<b>MATERIAS PRIMAS</b>	<b>% SÓLIDOS TOTALES</b>
<b>Residuos animales</b>	
Bovinos	13,4 - 56,2
Porcinos	15 - 49,0
Aves	26 - 92
Caprinos	83 - 92
Ovejas	32 - 45
Conejos	34,7 - 90,8
Equinos	19 - 42,9
Excretas humanas	17
<b>Residuos vegetales</b>	
Hojas secas	50
Rastrojo maíz	77
Paja trigo	88 - 90
Paja arroz	88,8 - 92,6
Leguminosas (paja)	60 - 80
Tubérculos (hojas)	10 - 20
Hortalizas (hojas)	10 - 15
Aserrín	74 - 80



### 2.5.4 Proporción carbono – nitrógeno:

Las bacterias necesitan tanto carbono como nitrógeno para su crecimiento y reproducción (actividad metanogénica), pero consumen carbono de 25 a 30 veces más que el nitrógeno. Si hay demasiado carbón en la materia a fermentar, el proceso se hace más lento y tiende a acidificarse. Si hay demasiado nitrógeno, este se perderá como amoníaco (el exceso), elevando el pH y reduciendo el poder fertilizante y nutriente de los lodos efluentes. Así la relación C/N conveniente debe estar comprendido entre 25 y 30, y para lograrlo habrá que combinar materiales pobres en nitrógeno (pajas, rastrojos) con materiales ricos en nitrógeno (excreta, orina, estiércol, etc.).

**Tabla 2.6** Desechos utilizados en la fermentación anaeróbica [Ref. 11]

Característica	Humedad (%)	Sólidos totales (%)	Carbono seco* (%)	Nitrógeno seco (%)	C/N
Vacuno	79	21	32	1,5	21
Ovino	73	27	60	3,7	16
Equino	75	25	47	2,4	20
Porcino	69	31	73	2,6	28
Gallináceas	44	56	70,2	3,7	12
Auquénidos	57	43	42	2,22	11
Cuyes	32	68	37,2	2,02	7
Chala de maíz	15	85	39	0,7	56
Paja de arroz	8	92	41,2	0,88	56
Paja de cebada	9	93	42	0,53	48
Paja de trigo	8	92	46	0,23	87
Totorales	35	65	41	1,10	178
Hojas de plátano	89	11	42	2,52	38
Pastos	67	33	40	1	16
Hierbas y hojas secas	50	50	41	0,1	41
Aserrín	-	-	-	-	200-500
Basura	-	-	-	-	25
Aguas residuales	-	-	-	-	11
Algas marinas	-	-	-	-	19

\* Base seca.

### 2.5.5 Tiempo de retención hidráulico (TRH):

Es el tiempo necesario para cumplir una digestión óptima del estiércol introducido en el biodigestor.

En biodigestores discontinuos, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. En sistemas continuos y semicontinuos se define como la relación entre el volumen del digestor y volumen diario de alimentación, lo que permite un régimen de alimentación práctico.

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria (m}^3\text{/día)} \quad (2.10)$$

El tiempo de retención junto con la velocidad de carga orgánica son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. El usuario fija un tiempo de retención hidráulico dependiendo de las condiciones ambientales y características del sustrato. Una forma de determinar el tiempo de retención es mediante la siguiente fórmula empírica [Ref. 16]:

$$TR = (-51,227 \cdot \ln(T^{\circ}C) + 206,72) \quad (2.11)$$

Donde:

*TR*: Tiempo de retención, en días.

*T°C*: Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor.

### 2.6 Análisis de demanda:

El diseño de una planta de biogás dependerá de la cantidad y del tipo de residuos disponibles en el medio rural, de las condiciones de clima, necesidades de biogás que se requiere, ubicación, materiales y técnicas de construcción que se disponga en cada sitio. Con el objetivo de reducir costos, la planta deberá ser construida hasta donde sea posible con materiales y mano de obra locales.

Antes de proceder al diseño de una planta de biogás para el medio rural, es necesario estimar el potencial de producción de biogás y los requerimientos energéticos de la familia, para definir su factibilidad considerando la forma de manejo del ganado y la cantidad mínima de residuos que permita producir el biogás requerido.

Una vez que se conoce la demanda diaria de biogás, se usan los cuadros y las fórmulas siguientes para estimar la materia prima requerida [Ref. 2]:

**Tabla 2.7** Producción de biogás por tipo de residuo animal.

Estiércol	Peso (kg)	Disponibilidad kg/día*	Volumen de biogás	
			m <sup>3</sup> /kg húmedo	m <sup>3</sup> /día/año
Bobino	500	10	0,04	0,40
Porcino	50	2,25	0,06	0,135
Aves	2	0,18	0,08	0,014
Ovino	32	1,5	0,05	0,075
Caprino	50	2	0,05	0,100
Equino	450	10	0,04	0,400
Conejo	3	0,35	0,06	0,021
Excretas humanas	70	0,40	0,06	0,025

\* El dato se refiere a la cantidad estimada de estiércol que es posible recolectar de todo el producto.

**Tabla 2.8** Producción de biogás a partir de residuos vegetales.

Residuos	Cantidad residuo Ton/ha	Volumen de biogás	
		m <sup>3</sup> /Ton	m <sup>3</sup> /ha
<b>Cereales (paja)</b>			
Trigo	3,3	367	1200
Maíz	6,4	514	3300
Cebada	3,6	388	1400
Arroz	4	352	1400
<b>Tubérculos (hojas)</b>			
Papas	10	606	6000
Betarragas	12	501	6000
<b>Leguminosas (paja)</b>			
Porotos	3,2	518	1650
Habas	4	608	1400
<b>Hortalizas (hojas)</b>			
Tomate	5,5	603	3300
Cebolla	7	514	3600

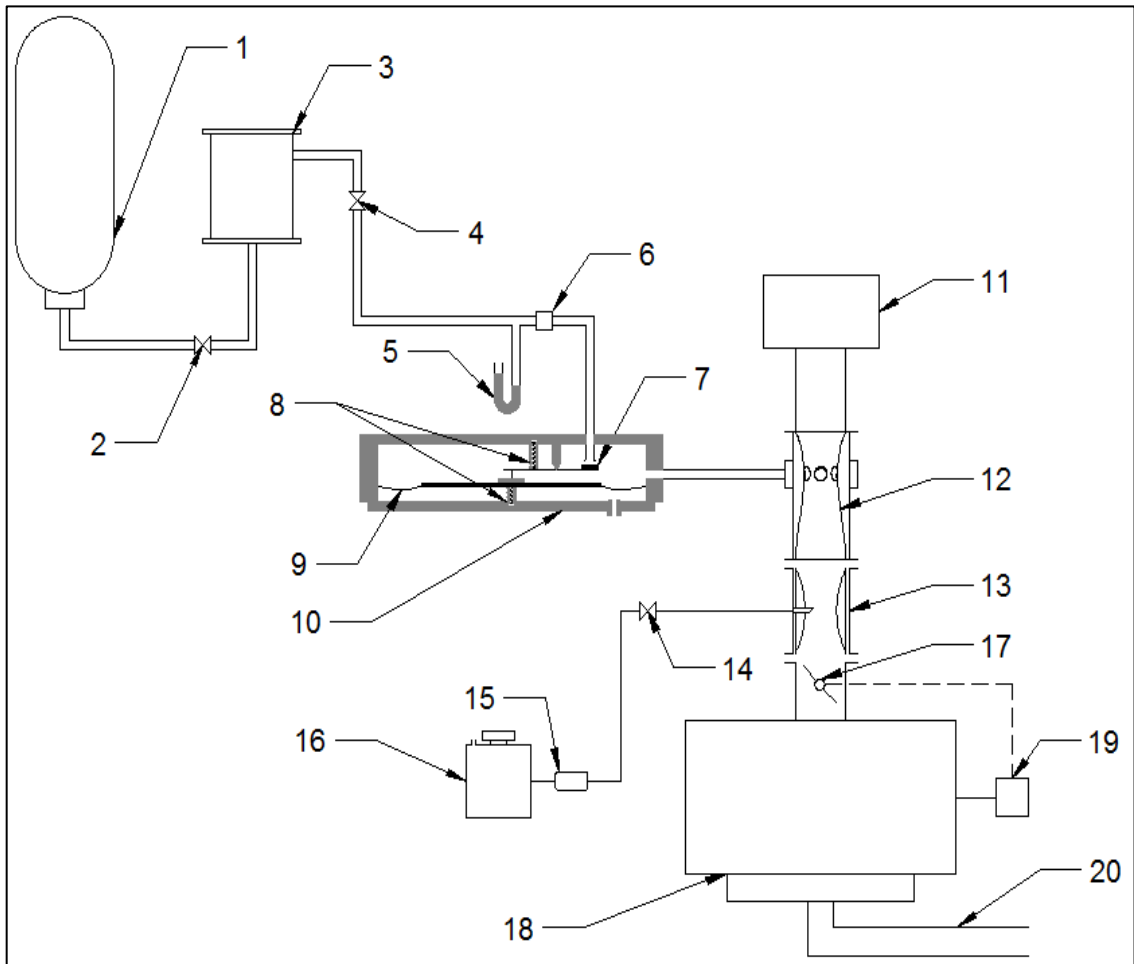
### **CAPÍTULO III**

#### **PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE CON REGULACIÓN AUTOMÁTICA DEL CAUDAL DE BIOGÁS**

##### **3.1 Descripción del sistema de alimentación – Componentes y funcionamiento:**

La utilización de biogás como combustible alternativo en motores estacionarios presenta dos principales dificultades: la necesidad de diseñar algunos componentes tomando en cuenta las propiedades de este nuevo combustible y tratar de adaptar dichas componentes a los motores comerciales existentes con riesgo de sacrificar eficiencias. Además, la adaptación y diseño de estas componentes deben realizarse de manera que no afecten la viabilidad de la utilización del biogás ni la simplicidad de las modificaciones necesarias, ya que el uso de tecnología sencilla y economía de su realización facilitarán su implementación en zonas rurales de nuestro país.

La disposición de los componentes del sistema de alimentación de biogás se muestra en la figura 3.1:



**Figura 3.1** Esquema de instalación del sistema de alimentación de biogás: **1.** Tanque de biogás, **2.** Válvula de cierre de emergencia, **3.** Filtro de  $H_2S$ , **4.** Válvula de paso, **5.** Manómetro en U, **6.** Flujómetro, **7.** Obturador, **8.** Resortes del regulador, **9.** Diafragma, **10.** Regulador-dosificador, **11.** Filtro de aire, **12.** Mezclador, **13.** Carburador de gasolina, **14.** Válvula de cierre, **15.** Filtro de gasolina, **16.** Tanque de gasolina, **17.** Válvula mariposa, **18.** Motor, **19.** Regulador de velocidad, **20.** Tubo de escape.

Las principales modificaciones realizadas en el grupo electrógeno Hyundai HY3100 LE, comprado especialmente para esta investigación, son las siguientes:

### 3.1.1 Al sistema de alimentación:

- **Mezclador:**

Es el elemento encargado de combinar el gas con el aire en la proporción adecuada, en cualquier régimen de funcionamiento del motor. El perfil de este debe ser de tal forma que produzca las menores pérdidas de presión en el flujo, por lo que su diseño debe ser el más aerodinámico posible. Este dispositivo (elemento 12 de la figura 3.1) se adiciona al sistema original para su utilización con biogás, ubicándose entre el filtro de aire y el carburador de gasolina. El biogás que viene del regulador ingresa al mezclador gracias a la depresión originada por la aceleración del flujo de aire al pasar por la garganta del mezclador, donde se ubican los agujeros por donde ingresa el biogás con dirección a la cámara de combustión del motor. La depresión en la garganta del mezclador varía en función de la posición de la válvula mariposa y de la velocidad del motor.

El diseño del mezclador de biogás influye de manera importante en el funcionamiento del motor, debido a que aquél entrega al motor una mezcla aire combustible con un determinado coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  (el cual depende principalmente del perfil del mezclador) para una carga dada.

El apropiado diseño del mezclador puede comprobarse a partir de los valores de consumo específico obtenidos experimentalmente.

- **Regulador automático del flujo de biogás:**

El regulador-dosificador de biogás es el componente más importante del sistema de alimentación. Este es el nuevo aporte tecnológico de este trabajo, cuya función es regular con precisión la cantidad de biogás que ingresa al motor en función de la carga. Este dispositivo neumático se encuentra ubicado entre la tubería de alimentación de biogás y el mezclador (dispositivo 10 de la figura 3.1), realizando su función de forma automática y reemplazando al usuario que realizaba esta tarea de forma manual en investigaciones anteriores [Ref. 3, 9, 11].

En general, para reguladores convencionales de GLP o GNV, con presiones de alimentación mucho mayores que la presión de suministro de biogás, es recomendable que la presión del gas en un compartimiento (etapa) tenga un valor que, en lo posible, produzca una alta caída en la presión en el obturador de cada etapa (dos o tres etapas, en total), con el fin de ocasionar un flujo supercrítico casi constante (con velocidad igual a la del sonido) en los diferentes regímenes del motor [Ref. 19]. Esta condición es particularmente importante para garantizar una presión de suministro al mezclador lo más estable posible. Sin embargo, debido a la baja presión manométrica del biogás (no

más de 20 mbar) el regulador-dosificador a diseñar será de una sola etapa y el régimen de flujo a través del obturador de este regulador siempre será subcrítico. Este nuevo regulador es semejante a la tercera etapa (última) de un regulador para GNV o GLP convencional. De esta manera, el caudal de biogás llegará directamente al reductor con una pérdida de presión muy pequeña. Además, para aumentar la sensibilidad de regulación del caudal de gas se utilizó resortes más blandos (de alambre de 0,8 mm de diámetro) que los convencionales.

- **Tuberías o conductos de biogás:**

Los diámetros de las tuberías de suministro de biogás deben ser lo suficientemente grandes para mantener velocidades de flujo menores de 2 m/s [Ref. 12] y deben ser resistentes a la corrosión que provoca el  $H_2S$  presente en el biogás. En el común de los casos se utilizan tuberías de diámetro estándar (3/8", 1/2", 3/4", etc.), lo cual es recomendable por su fácil adquisición en el mercado y porque las válvulas, acoples, instrumentación son estándares también. En esta investigación se utilizaron mangueras de plástico de PVC de un diámetro de 1".

- **Filtro de biogás:**

Lo más recomendable es utilizar tecnologías secas tal como se mencionó en el segundo capítulo. El filtro debe estar instalado en la línea de conducción del almacén de biogás al motor, cocina, lámpara o cualquier otro dispositivo de uso. En la experiencia se utilizaron como filtros cilindros de PVC de 30 cm de diámetro y 1 m de altura (dispositivo 3 de la figura 3.1) relleno con óxido de hierro obtenido a través de viruta metálica que queda como residuo después del maquinado en talleres metal-mecánicos.

- **Válvulas de cierre de emergencia:**

Esta válvula permite retener el biogás en las fuentes de almacenamiento ante una eventual fuga de biogás. Debe ser del mismo tamaño que las tuberías y además debe situarse en un lugar de fácil acceso y notoriamente visible para su manipulación en caso de emergencia (dispositivo 2 de la figura 3.1). En nuestro caso, se usó una válvula esférica de 1" de diámetro.



- **Al sistema de ralentí:**

El sistema diseñado no requiere de un dispositivo especial para su funcionamiento en bajos regímenes de carga y trabajo en vacío. El mezclador de biogás es autosuficiente para un funcionamiento estable del motor en estos regímenes de carga tal como se comprobó en la práctica.

- **A la cámara de combustión:**

No se realizó ninguna modificación a la cámara de combustión ni tampoco se aumentó la relación de compresión del motor para así mantener la posibilidad de usar el combustible original (gasolina de menor número de octano) en caso de una eventual escasez de biogás. Cuando se quiere aumentar la eficiencia y la potencia del motor al emplear biogás se puede aumentar la relación de compresión (esto se puede realizar tomando en cuenta que el número de octano del biogás es mucho mayor que el de la gasolina, ver tabla 2.2). Para lograr esto es necesario realizar algunas modificaciones tal como el rectificando de la culata y el aumento del ángulo de adelanto del encendido. Sin embargo, estas modificaciones podrían ocasionar encendido prematuro cuando el motor funcione con el combustible original. Es por esta razón que estas modificaciones no se recomiendan en este caso. El motor del grupo electrógeno presentó en la práctica una buena respuesta a la utilización del biogás sin esta modificación.

- **Al sistema de alimentación de gasolina:**

Se mantiene el sistema original, es decir, la gravedad transporta la gasolina desde el tanque de almacenamiento hasta el carburador original del motor, pasando por el filtro. Existe también una pequeña válvula de combustible ubicada a un costado del grupo electrógeno (dispositivo 14 de la figura 3.1) que permite el ingreso o corte de gasolina al carburador. De esta manera, una vez encendido el motor, se corta el suministro de gasolina mediante la válvula de cierre dejando solamente el ingreso a la cámara de combustión de la mezcla biogás aire.

### **3.1.2 Al sistema de arranque:**

El sistema de arranque es el mismo que el del grupo electrógeno original funcionando con gasolina, y este puede ser a su vez manual o automático. El arranque manual es a través de un arrancador de cuerda de rebobinado automático. El arranque eléctrico es a través del encendido de la bujía por medio de la llave, para esto el grupo electrógeno Hyundai dispone de una batería. Como se mencionó anteriormente, debido al bajo poder calorífico del biogás, el motor se seguirá arrancando con gasolina y luego se pasará a la alimentación del biogás una vez encendido el motor.

### **3.1.3 Al sistema de regulación:**

El grupo electrógeno Hyundai HY3100 LE cuenta con un regulador de velocidad de rotación (dispositivo 19 de la figura 3.1) que actúa sobre la válvula mariposa, abriéndola o cerrándola según disminuya o aumente la velocidad del motor. Este regulador actúa sobre la válvula mariposa a través de un sistema de cables y palancas. Se mantendrá este sistema al utilizar biogás como combustible por ser necesarios voltajes y frecuencias constantes de la corriente (ambos parámetros directamente proporcionales a la velocidad de rotación del motor).

## **3.2 Regulador-dosificador:**

### **3.2.1 Funcionamiento y componentes:**

Como ya se explicó en el apartado anterior, es la presión negativa (vacío), que se produce en el cilindro del motor debido al descenso del pistón durante la carrera de admisión, la que origina la succión del diafragma del regulador y esta, a su vez, ocasiona la apertura del obturador. En estas condiciones, el biogás ingresa a la cámara de combustión gracias a la apertura del obturador. Cuando la válvula de admisión se cierre y la presión en el compartimiento del obturador se restaure, el diafragma volverá a su posición original al igual que el obturador, cortando el flujo de biogás. Es este el fundamento físico de funcionamiento del regulador-dosificador.

Este dispositivo, como todos los reguladores de presión, consta de los siguientes elementos básicos (figura 3.3):

- Un diafragma de acrílico nitrilo, material resistente a la acción diluyente del gas.
- Dos resortes calibrados antagonistas.
- Un balancín con su obturador.

### 3.2.2 Parámetros de diseño – Fórmulas:

En general, los reductores o reguladores se diseñan o seleccionan para el régimen nominal del motor [Ref. 19], es decir, para el máximo caudal de gas (con la mínima presión de suministro). Los caudales de gas y de aire están relacionados con el caudal de la mezcla aire combustible mediante las siguientes expresiones [Ref. 10, 18]:

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{V}_{mz}}{1+\lambda L_0} \quad (3.1) \quad \text{y} \quad \dot{V}_a = \frac{\dot{V}_{mz}}{1+\frac{1}{\lambda L_0}} \quad (3.2)$$

Donde:

$\dot{V}_g$ : Caudal de gas ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$\dot{V}_a$ : Caudal de aire ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$\dot{V}_{mz}$ : Caudal de la mezcla aire combustible ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$\lambda$ : Coeficiente de exceso de aire.

$L_0$ : Relación aire combustible ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ).

El caudal de la mezcla es directamente proporcional a la cilindrada del motor, a la máxima velocidad del motor (nominal), y a la eficiencia volumétrica del motor [Ref. 10, 18, 19]:

$$\dot{V}_{mz} = \frac{V_H}{1000} \cdot \frac{n}{120} \cdot \eta_v \quad (3.3)$$

Donde:

$V_H$ : Cilindrada del motor (L).

$n$ : Máxima velocidad del motor (rpm).

$\eta_v$ : Eficiencia volumétrica.

La eficiencia volumétrica del motor es función, principalmente, de la velocidad del motor (en este caso, la velocidad es constante e igual a 3600 rpm) y de la apertura de la válvula de mariposa del motor. La eficiencia volumétrica se puede determinar experimentalmente o con un algoritmo de cálculo [Ref. 20].

### Flujo másico que ingresa al regulador:

En general, en los reguladores de GNV o GLP, para que el flujo de gas sea uniforme y constante y, de esta manera, el motor funcione establemente, para un determinado régimen de funcionamiento del motor, la caída de presión entre las etapas del reductor de presión (con excepción de la última etapa) deben ser supercríticas [Ref. 19], tal como se indicó anteriormente.

Para una caída supercrítica de presiones debe cumplirse la siguiente relación:

$$\frac{p_{n+1,r}}{p_{n,r}} < X_{crit} \quad (3.4)$$

Donde:

$n$ : Número de etapa.

$p_{n,r}$ : Presión en la etapa  $n$ .

$X_{crit}$ : Relación crítica de presiones.

La relación crítica de presiones se determina mediante la siguiente relación:

$$X_{crit} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.5)$$

Donde:

$k$ : Exponente adiabático del gas o de la mezcla de gases.

Los valores de  $k$  y  $X_{crit}$ , se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 3.1** Relación crítica de presiones para algunos gases [Ref. 21].

	$H_2$	$CO$	$CH_4$	$C_2H_2$	$C_3H_8$	$C_2H_4$	$C_3H_6$	$C_4H_{10}$	$C_4H_8$
$k$ (exponente adiabático)	1,408	1,410	1,280	1,200	1,160	1,250	1,150	1,080	1,110
$X_{crit}$ (relación crítica de presiones)	0,526 9	0,526 6	0,549 4	0,564 5	0,572 4	0,554 9	0,574 4	0,5889	0,582 6

Sin embargo, como la presión de alimentación de biogás es muy pequeña (máximo 20 mbar) y el regulador de presión es de una sola etapa (de baja presión) el régimen del flujo a través del obturador siempre es del tipo subcrítico (relación de presiones mayor que la relación crítica de presiones) y para ello los cálculos del flujo másico de biogás que ingresa al regulador se realizan según las siguientes consideraciones:

La fórmula general para determinar el flujo másico de un fluido compresible a través de un agujero en régimen subcrítico es [Ref. 19, 20]:

$$\dot{m}_g = \frac{A_r \cdot p_{alim}}{\sqrt{R \cdot T_{alim}}} \cdot \left( \frac{p_r}{p_{alim}} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_r}{p_{alim}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3.6)$$

Donde:

$\dot{m}_g$ : Flujo másico (kg/s).

$A_r$ : Área de paso efectiva equivalente del flujo a través del obturador (m<sup>2</sup>).

$p_r$ : Presión del biogás dentro del regulador (Pa)

$p_{alim}$ : Presión de alimentación o de ingreso al reductor (Pa) [Figura 3.3].

$T_{alim}$ : Se considera aproximadamente igual a la temperatura atmosférica (K).

$k$ : Exponente adiabático del gas (para el biogás se asume  $k = 1,285$ ).

La ecuación 3.6 también puede ser escrita como [Ref. 20]:

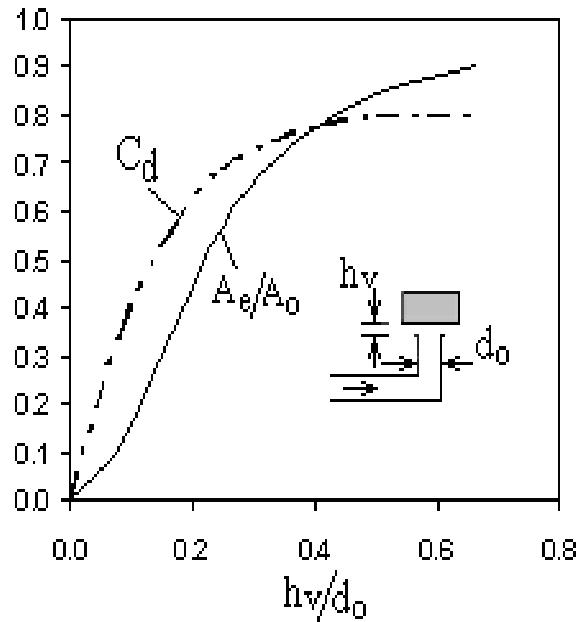
$$\dot{m}_g = A_r \cdot [2\rho_g(p_{alim} - p_r)]^{0,5} \cdot \Phi \quad (3.7)$$

Donde la función  $\Phi$  está dada por [Ref. 20]:

$$\Phi = \left\{ \frac{\left( \frac{k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_r}{p_{alim}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_r}{p_{alim}} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right] \right)^{\frac{1}{2}}}{\left( 1 - \frac{p_r}{p_{alim}} \right)} \right\} \quad (3.8)$$

En nuestro caso, como la presión de suministro  $p_{alim}$  es muy pequeña (no supera 1 mbar), entonces se cumple que  $(p_{alim} - p_r)/p_{alim} \ll 0,1$  y  $\Phi \approx 1$ , por lo que al fluido se le puede considerar prácticamente incompresible [Ref. 20].

Para calcular el área de la sección de paso del obturador, se tiene que considerar que realmente hay dos obstrucciones hidráulicas en serie: el agujero surtidor y el área lateral del anillo imaginario que se forma entre el obturador y el pico surtidor (ver figura 3.2).



**Figura 3.2** Variación del coeficiente de descarga del pico surtidor y del área efectiva equivalente relativa en función de levantamiento relativo  $h_v/d_0$ .

El área efectiva equivalente se calcula con la siguiente fórmula [Ref. 9, 18, 19]:

$$A_r = C_d \cdot \pi d_0 h_v \cdot \sqrt{\frac{1}{1+K^2}} \quad (3.9)$$

Donde  $K$  es factor que relaciona a las dos secciones en serie antes mencionadas, y se calcula con:

$$K = \frac{C_d \pi d_0 h_v}{\left(\frac{\pi d_0^2}{4}\right)} \quad (3.10)$$

### Equilibrio de momentos en el balancín del obturador:

Para el balancín del reductor, la ecuación del equilibrio de momentos en el balancín es (ver figuras 3.3 y 3.4):

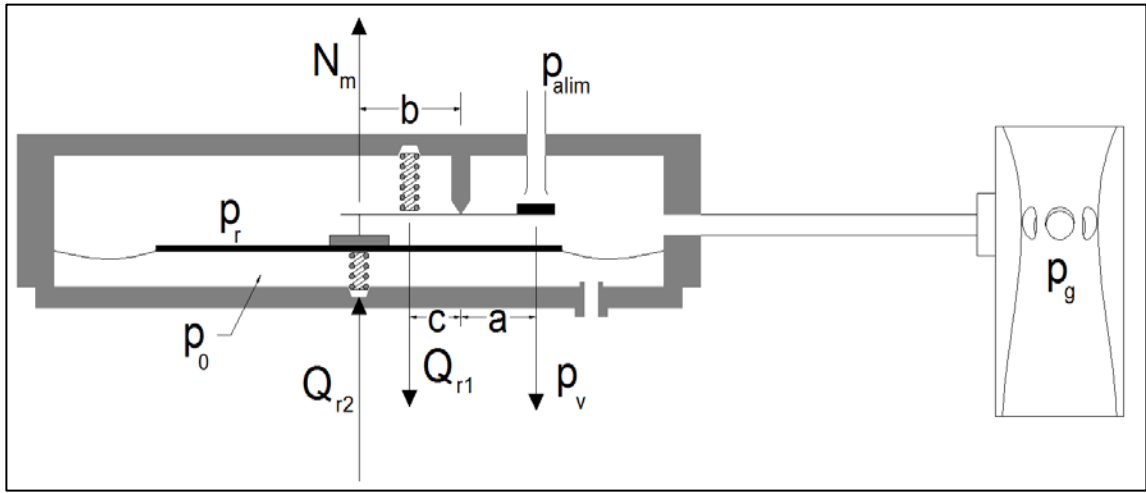
$$-(N_m + Q_{r2})b - p_v a + Q_{r1}c = 0 \quad (3.11)$$

Dónde:

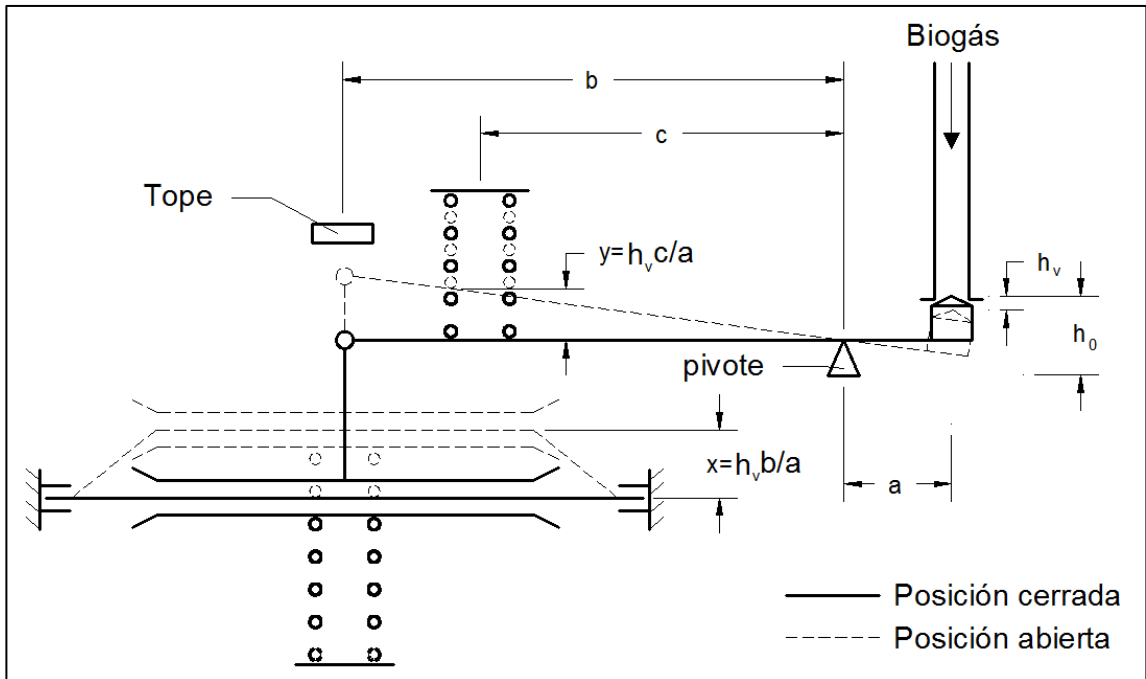
$N_m$ : Fuerza que ejerce el diafragma (N).

$Q_{r1,2}$ : Fuerzas que ejercen los resortes (N).

$p_v$ : Fuerza que ejerce el obturador sobre el balancín (N).



**Figura 3.3** Esquema de las fuerzas que actúan sobre el balancín del regulador-dosificador.



**Figura 3.4** Esquema del funcionamiento del regulador-dosificador.

Desarrollando esta ecuación, obtenemos:

$$-[(p_0 - p_r)A_m\alpha_m + (Q_{0,r2} + k_{r2}x)]u_1 - (p_{alim} - p_r)A_a\alpha_v + (Q_{0,r1} + k_{r1}y)u_2 = 0 \quad (3.12)$$

Dónde:

$p_r$ : Presión dentro del reductor (Pa).

$p_{alim}$ : Presión de suministro del biogás (Pa).

$p_0$ : Presión atmosférica (Pa).

$p_g$ : Presión en la garganta del mezclador (Pa).

$k_{r1}$  y  $k_{r2}$ : Constantes de rigidez de los resortes (N/m).

$Q_{0,r1}$  y  $Q_{0,r2}$ : Compresión previa de los resortes (m).

$A_m$ : Área del diafragma del reductor (m<sup>2</sup>).

$A_a$ : Área del tubito surtidor (m<sup>2</sup>).

$h_v$ : Levantamiento del obturador (m).

$h_0$ : Levantamiento máximo del obturador (m).

$x$ : Contracción que sufre el resorte del regulador ( $= h_v u_1$ ).

$y$ : Contracción que sufre el resorte del regulador ( $= h_v u_2$ ).

En la ecuación 3.12 aparecen algunos términos que no se muestran en la figura 3.4, dichos términos son relaciones geométricas y coeficientes empíricos que influyen en el funcionamiento del regulador. Estos son:

$u_1$ : Relación de brazo de palanca ( $= b/a$ ).

$u_2$ : Relación de brazo de palanca ( $= c/a$ ).

$\alpha_m$ : Coeficiente empírico de estiramiento del diafragma.

$\alpha_v$ : Coeficiente empírico del área efectiva del obturador.

Se debe mencionar que el resorte ubicado debajo del diafragma es de longitud inicial controlable a través de un tornillo regulador. De esta manera, se puede controlar la compresión inicial del resorte con el fin de que éste no oponga demasiada resistencia a la contracción y estiramiento del diafragma, lo cual no dejaría al reductor funcionar con total normalidad. Esta compresión inicial del resorte se debe regular antes de su funcionamiento y luego comprobar, manualmente, que el estiramiento y contracción del diafragma se realice sin mucho esfuerzo.

Cuando el motor no funciona el reductor está cerrado (por acción de los resortes), lo cual es importante por razones de seguridad.



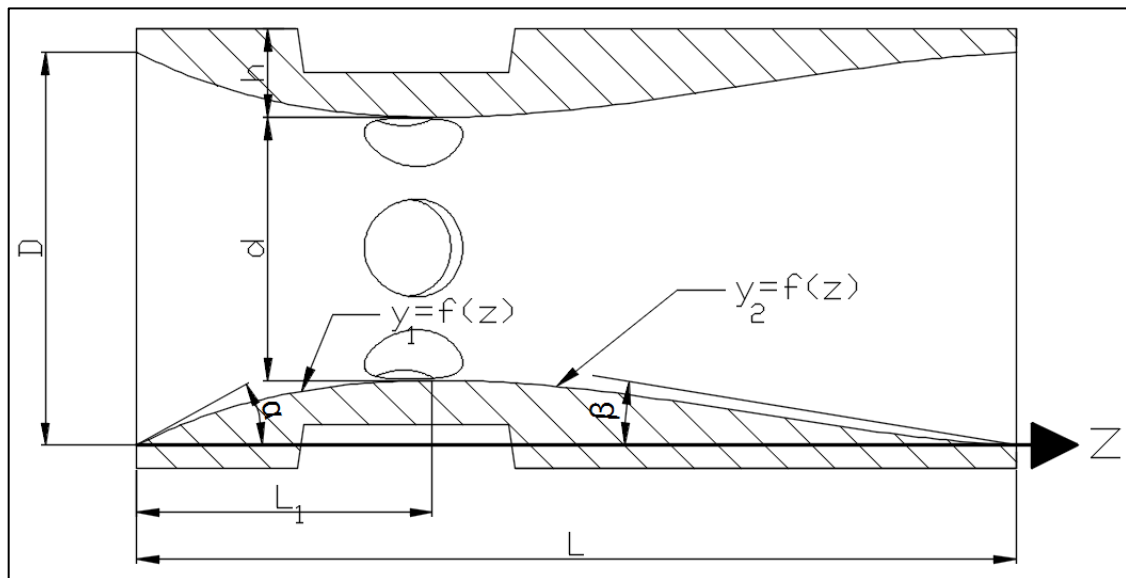
### 3.3 Mezclador:

#### 3.3.1 Funcionamiento y componentes:

En principio, los mezcladores para combustibles gaseosos pueden ser de dos tipos:

- Aerodinámico.
- Simple.

El mezclador es del tipo aerodinámico si tiene un perfil polinómico y cumple con las relaciones geométricas de diseño, recomendadas según la bibliografía [Ref. 4], tal como se muestra en la figura 3.5:



**Figura 3.5** Mezclador aerodinámico con sus principales dimensiones.

Las relaciones geométricas recomendadas para la tobera son las siguientes:

$$h = \frac{D-d}{2}, \quad \frac{L_1}{L} = 20 - 25\%$$

$$\frac{L}{h} \approx 6,5 - 7,5, \quad \alpha \approx 40 - 50^\circ$$

$$\beta \approx 15 - 25^\circ$$

Dónde:

$D$ : Diámetro de ingreso del flujo de aire.

$d$ : Diámetro de la garganta.

$h$ : Altura máxima del perfil.

$L_1$ : Longitud de la altura máxima.

$L$ : Longitud total.

$\alpha$ : Ángulo de ingreso.

$\beta$ : Ángulo de salida.

Además, las alturas del perfil antes y después de la garganta ( $y_1$  e  $y_2$  respectivamente) son funciones polinómicas de tercer grado, es decir:

$$y_1 = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + a_3 \cdot z^3$$

$$y_2 = b_0 + b_1 \cdot z + b_2 \cdot z^2 + b_3 \cdot z^3$$

Donde:  $a_i$  y  $b_i$  se hallan con los parámetros de diseño ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $h$ ,  $L_1$ ,  $L$ ) de acuerdo a las siguientes condiciones de contorno:

- 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  $y_2$ :

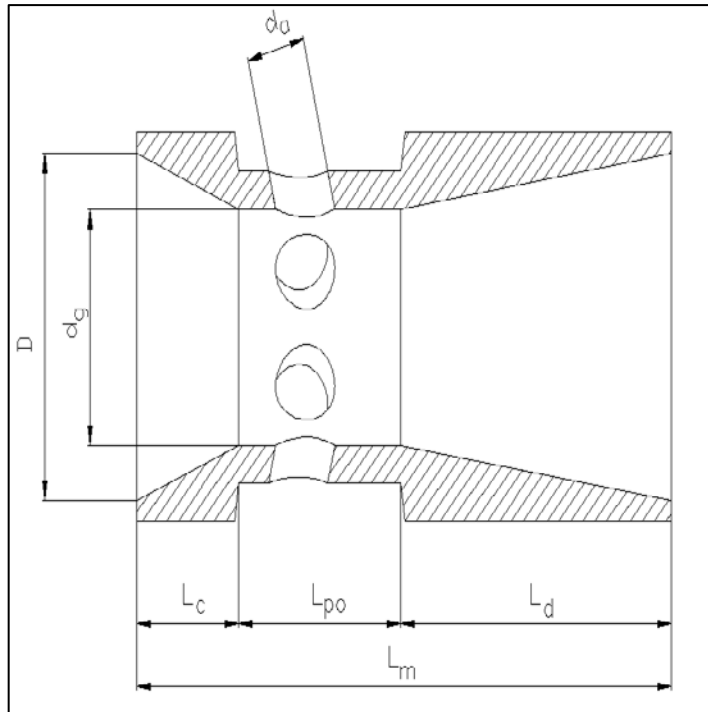
$$\frac{dy}{dz} = -\tan(\beta) \quad \text{para } z = L$$

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

$$y = 0 \quad \text{para } z = L$$

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

El mezclador es del tipo simple si tiene forma cilíndrica en el centro y con chaflanes cortos en las partes convergente y divergente, tal como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6** Mezclador del tipo simple con sus principales dimensiones.

Donde:

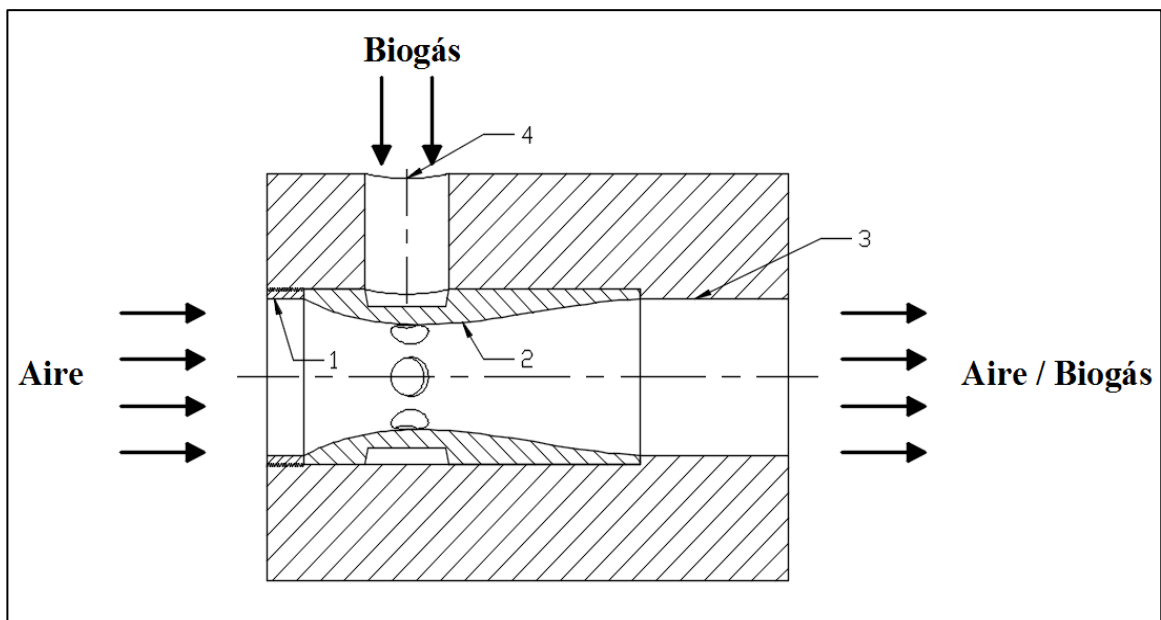
- $D$ : Diámetro de entrada (m).
- $d_g$ : Diámetro de la garganta (m).
- $d_a$ : Diámetro de los agujeros (m).
- $L_c$ : Longitud de la parte convergente (m).
- $L_d$ : Longitud de la parte divergente (m).
- $L_{po}$ : Longitud de la parte cilíndrica (m).
- $L_m$ : Longitud total del mezclador (m).

El mezclador diseñado en este trabajo consta fundamentalmente de dos partes: una carcasa (housing) y una tobera (venturi) intercambiable.

La carcasa ha sido diseñada para trabajar con diferentes tamaños de tobera, de modo que siempre quede centrada la tubería de alimentación de biogás con los agujeros de entrada de la tobera. Se debe procurar que los agujeros de alimentación no coincidan exactamente con el agujero de ingreso de biogás en la carcasa, de esta manera se asegura

una distribución más uniforme del biogás ya que así ingresará por todos los agujeros del venturi asegurando una buena mezcla con el aire (Figura 3.7).

El mezclador diseñado sigue el mismo principio fluido–dinámico de un carburador estándar [Ref. 10, 17, 18], esto es, el flujo de aire ingresa al motor gracias a la succión provocada por el descenso del pistón dentro del cilindro, durante el proceso de admisión. El flujo de aire comienza a desarrollarse a partir de su ingreso al mezclador, luego se acelera al pasar por la garganta, esta mayor velocidad del aire origina una presión negativa (succión) a la salida de cada agujero del venturi; es gracias a esta presión negativa que se origina el flujo de biogás a través de los agujeros. El biogás ingresa a la corriente de aire en forma radial, mezclándose con este. La mezcla aire – biogás es estrangulada por la mariposa de regulación del carburador original de gasolina acoplado en serie con el mezclador de biogás (ver figura 3.1) de donde finalmente ingresa a la cámara de combustión del motor.



**Figura 3.7** Esquema de funcionamiento del mezclador de biogás. **1.** Centrador, **2.** Tobera, **3.** Housing, **4.** Agujero de alimentación de biogás

### 3.3.2 Parámetros de diseño – Fórmulas:

El mezclador de biogás se diseñó utilizando un modelo matemático [Ref. 4], el cual es desarrollado y explicado en el capítulo 4. Este modelo nos da como resultado las principales medidas de dicho mezclador, tales como: los diámetros de la garganta y salida de la tobera, la longitud óptima de la tobera, la forma del perfil de la tobera que produzca las menores pérdidas de energía para el flujo; también la modelación nos

indica el número y diámetro de los agujeros de alimentación de biogás de manera que produzca una mezcla homogénea con el aire con un coeficiente de exceso de aire adecuado. Además, es importante considerar la inclinación de los agujeros en la tobera para el ingreso de biogás ( $= 15^\circ$ ); esto ayudará a aumentar el coeficiente de descarga de los mismos y el flujo de biogás al motor.

El área de los agujeros por donde circula el biogás se calcula en función del diámetro de los agujeros:

$$A_a = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \quad (3.13)$$

Donde:

$A_a$ : Área del agujero por donde circula el biogás (garganta del mezclador, tubería del regulador hacia el mezclador, tubito surtidor, etc.).

$D_a$ : Diámetro del agujero por donde circula el biogás.

El flujo másico de gas, calculado a través de la fórmula 3.7, también se puede determinar a partir de:

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V}_g \quad (3.14)$$

Donde:

$\rho_g$ : Densidad de gas a las condiciones de suministro ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\dot{V}_g$ : Caudal de gas suministrado ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

El caudal de gas suministrado al motor se calcula con la siguiente fórmula:

$$\dot{V}_g = A_{sal} \sqrt{\frac{2}{\rho_g}} \sqrt{p_r - p_g} \quad (3.15)$$

Donde:

$A_{sal}$ : Es el área efectiva equivalente entre la salida del regulador dosificador y la garganta del mezclador, y se calcula con la siguiente fórmula [Ref. 18]:

$$A_{sal} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(A_1 C_{d,1})^2} + \frac{1}{(A_{aguj} C_{d,aguj})^2}}} \quad (3.16)$$

Donde:

$A_1 C_{d,1}$ : Área efectiva de la salida del regulador dosificador (m<sup>2</sup>).

$A_{aguj} C_{d,aguj}$ : Área efectiva de los agujeros del mezclador (m<sup>2</sup>).

La caída de presión que produce el flujo de mezcla aire gas al pasar por la garganta del mezclador es:

$$\Delta p_d = \frac{1}{2} \rho_0 \dot{V}_a^2 \frac{1}{(C_{d,mz} \cdot A_g)^2} \quad (3.17)$$

Donde:

$A_g$ : Área de la garganta del mezclador (m<sup>2</sup>).

$C_{d,mz}$ : Coeficiente de descarga del mezclador.

Por lo tanto, la presión absoluta en la garganta del mezclador será:

$$p_g = p_0 - \Delta p_d \quad (3.18)$$

El coeficiente de descarga del mezclador, se puede considerar que varía en el rango 0.91 a 0.98 dada su forma aerodinámica [Ref. 9].

## CAPÍTULO IV

### **MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS CONSTRUCTIVOS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR A BIOGÁS**

#### **4.1 Fundamentación y consideraciones adicionales del modelo matemático:**

Ahora que conocemos las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del motor de encendido por chispa funcionando con biogás, es posible desarrollar un programa de simulación el cual realice los cálculos necesarios para la predicción de los principales parámetros efectivos del motor tales como eficiencias, caudal de biogás consumido, potencia, presiones en el regulador y el carburador, etc.

Sin embargo, también es necesario que dicho programa calcule la forma y dimensiones óptimas del mezclador y del regulador – dosificador tomando en consideración las especificaciones técnicas del motor a utilizar.

En el algoritmo de cálculo que se detalla en el apartado 4.3 se muestra la secuencia de cálculos que el programa realiza, los cuales se encuentran esquematizados en el diagrama de flujo presentado más adelante.

La modelación matemática se realizó en el programa MATLAB R2013a debido a la facilidad del lenguaje de programación y de la elaboración de gráficos que muestren los resultados predichos. Los fundamentos de esta modelación son las siguientes:

#### 4.1.1 Cálculo de la constante de rigidez de los resortes:

La relación fuerza deformación para resortes se puede obtener utilizando el teorema de Castigliano [Ref. 23] de donde se obtiene el siguiente valor de la constante o módulo de rigidez del resorte:

$$K_v = \frac{d_a^4 \cdot G}{8 \cdot D_m^3 \cdot N_a} \quad (4.1)$$

Donde:

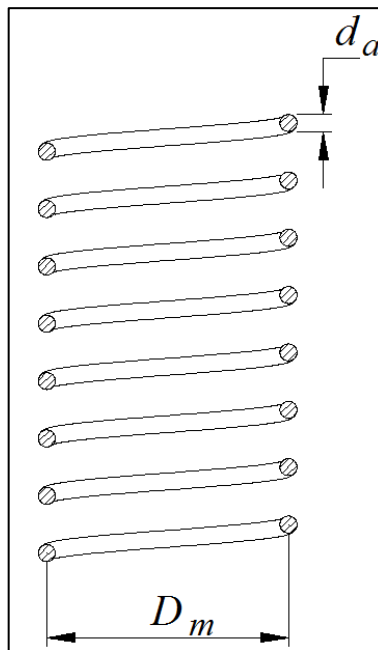
$K_v$ : Constante de rigidez del resorte ( $N/m$ ).

$d_a$ : Diámetro del alambre del resorte helicoidal (m).

$G$ : Módulo de corte ( $N/m$ ).

$D_m$ : Diámetro medio del resorte helicoidal (m).

$N_a$ : Número de espiras activas.



**Figura 4.1** Esquema de un resorte helicoidal.



#### 4.1.2 Coeficiente de descarga ( $C_d$ ):

El coeficiente de descarga es la relación entre el flujo real y el flujo ideal que pasa a través de un orificio:

$$C_d = \frac{\text{Flujo real}}{\text{Flujo ideal}} = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_i} \quad (4.2)$$

Para el flujo de gas que pasa a través de los agujeros del mezclador, se considera al coeficiente de descarga aproximadamente constante. De igual manera, el coeficiente de descarga de la tubería de conexión entre el regulador y el mezclador se considera constante. Sin embargo, el coeficiente de descarga del obturador varía en función de su levantamiento relativo (figura 3.2); para ello se procederá con la metodología de cálculo del libro 'Automóviles a gas' [Ref. 21].

La dependencia entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y el levantamiento del obturador ( $h_v$ ) se muestra en la figura 4.2 [Ref. 21]:

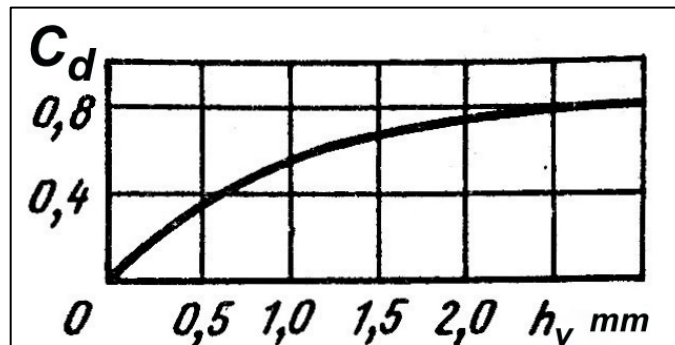


Figura 4.2 Relación entre  $C_d$  y  $h_v$ .

El coeficiente de descarga del obturador, varía entre 0,75 a 0,85 (valor máximo).

#### 4.1.3 Número de Reynolds:

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento [Ref. 25]. Por esta razón se necesita de un medio para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo en realidad. Se demuestra en forma experimental y se verifica de modo analítico, que el carácter del flujo en un tubo de sección circular depende de cuatro variables: la densidad del fluido  $\rho$ , su viscosidad absoluta  $\mu$ , el diámetro del tubo  $D$ , y la velocidad promedio del flujo  $v$ . Ello se resume en determinar el valor de un número adimensional llamado número de Reynolds:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu} \quad (4.3)$$

Donde:

$\nu$ : Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ ).

$\mu$ : Viscosidad absoluta ( $kg/m.s$ ).

Para fines de cálculo, considerando que se utilizarán tuberías circulares, podemos determinar el número de Reynolds realizando un ordenamiento matemático de la ecuación anterior:

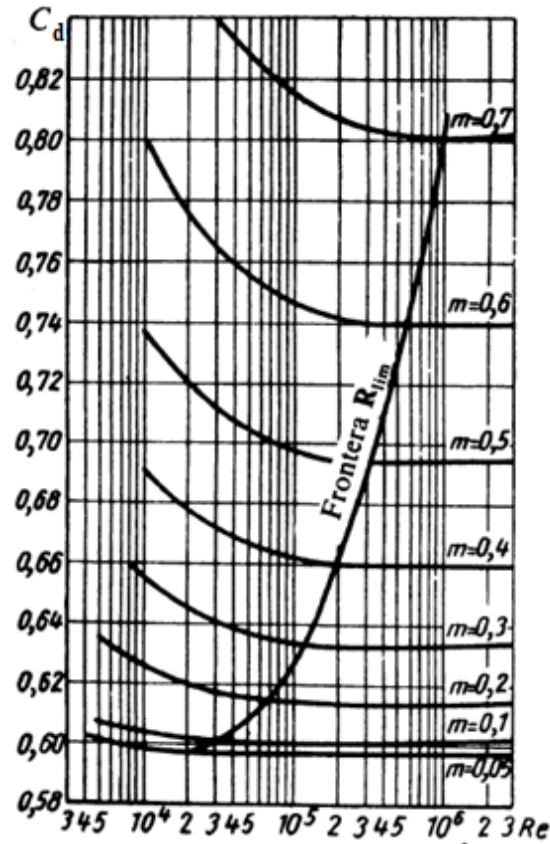
$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D\nu} \quad (4.4)$$

Donde:

$\dot{m}$ : Flujo másico de gas ( $kg/s$ ).

#### **4.1.4 Coeficiente de descarga de un mezclador simple:**

El coeficiente de descarga de este tipo de mezclador puede hallarse en forma aproximada igual al de un medidor de flujo tipo placa - orificio cuya gráfica se muestra a continuación [Ref. 24]:



**Figura 4.3** Coeficiente de descarga de un medidor de flujo tipo placa - orificio.

La gráfica anterior nos muestra los coeficientes de descarga del medidor de flujo en función del número de Reynolds del fluido y de  $m$  que es la relación de áreas entre la sección de paso más estrecha y el área de la tubería. En los cálculos del modelo matemático el dato de entrada es la relación de diámetros, para esto debemos considerar lo siguiente:

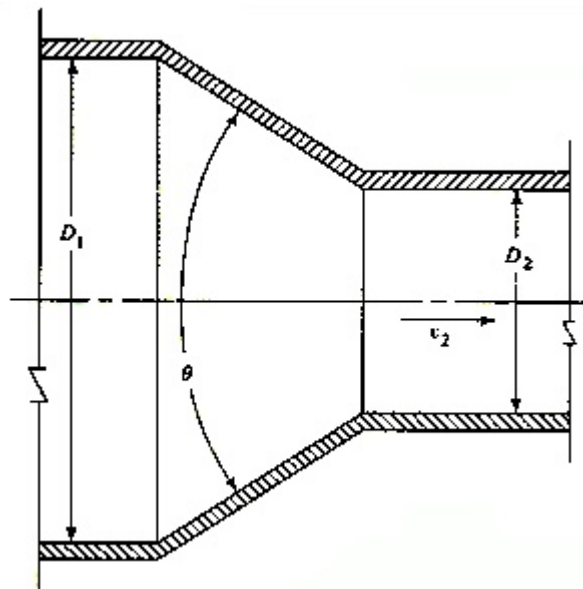
$$m = \frac{A_{garganta}}{A_{tubería}} = \frac{\frac{\pi d_g^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$$\frac{d_g}{D} = \sqrt{m} \quad (4.5)$$

El número de Reynolds para el biogás en este tipo de aplicaciones varían entre  $3 \times 10^4$  a  $1 \times 10^5$ . De lo anterior podemos extraer una tabla de valores que muestre la relación entre el coeficiente de descarga y la relación de diámetros, ya que, el número de Reynolds no influye de sobremanera en el rango de valores indicado.

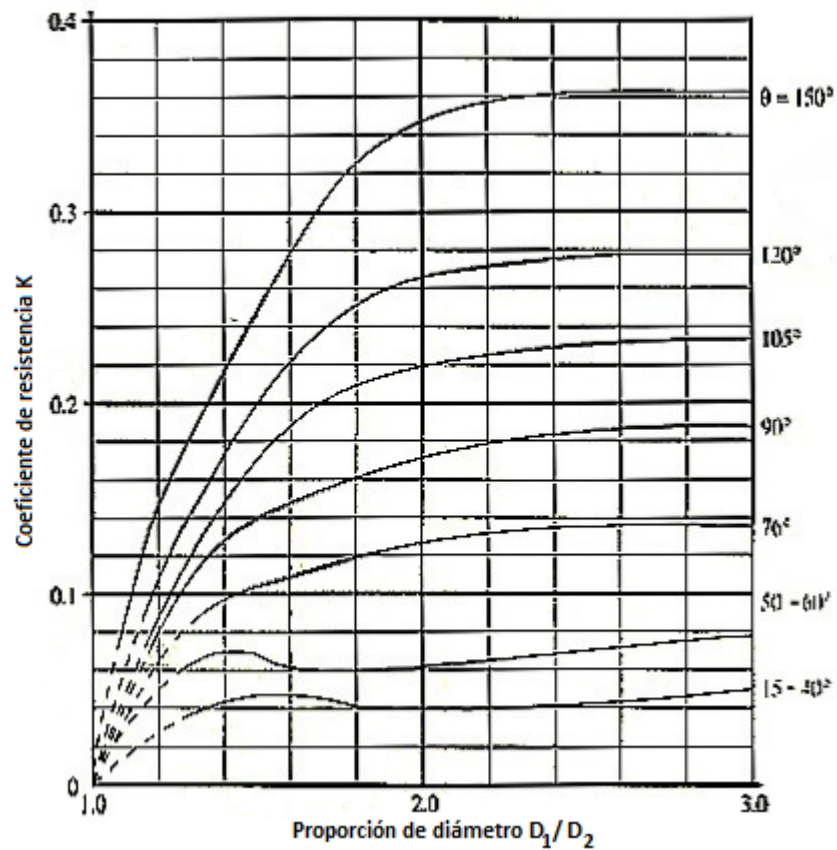
#### 4.1.5 Coeficiente de descarga de un mezclador aerodinámico:

El coeficiente de descarga de un mezclador aerodinámico se puede calcular, de forma aproximada, considerando que inicialmente el flujo se contrae (y se acelera) en forma gradual en la parte convergente (entrada del mezclador) para luego expandirse en la salida divergente. En este trabajo, el coeficiente de descarga se calcula mediante una subrutina llamada "venturi2.m". Esta subrutina primeramente calcula el coeficiente de resistencia al flujo en la parte convergente del mezclador aproximándola a una contracción gradual cónica, tal como se muestra en la figura 4.4:



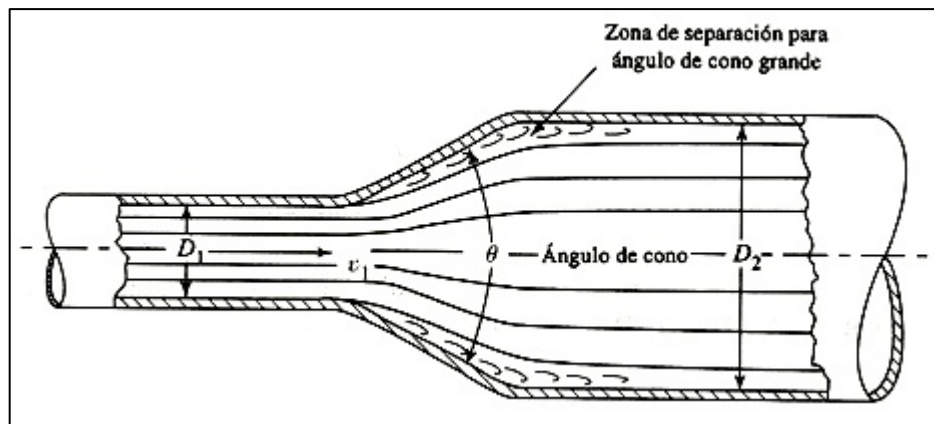
**Figura 4.4** Contracción gradual de un conducto de fluido.

Los coeficientes de resistencia hidráulica  $K$  para distintos ángulos de cono  $\theta$  y relación de diámetros  $D_1/D_2$  se muestran en la figura 4.5 [Ref. 25]:



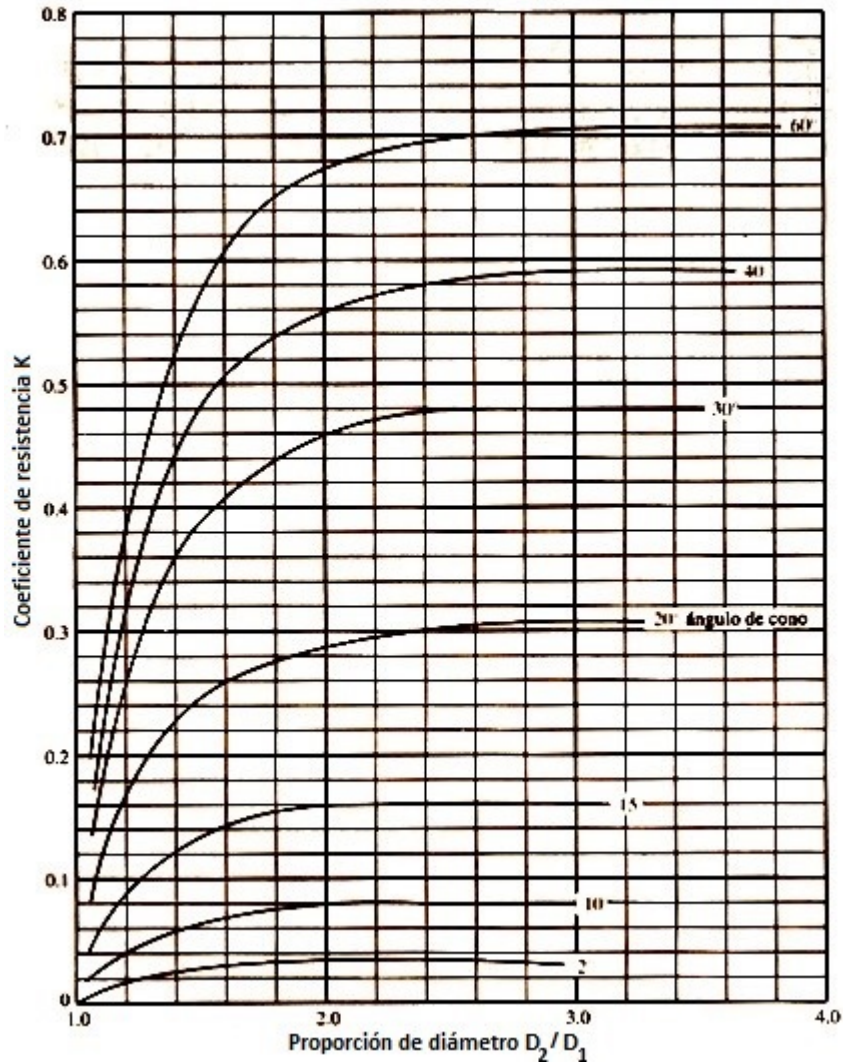
**Figura 4.5** Coeficiente de resistencia para una contracción gradual de flujo.

De manera análoga se calcula el coeficiente de resistencia al flujo en la parte divergente del mezclador aproximándola a una expansión gradual cónica, tal como se muestra en la figura 4.6:



**Figura 4.6** Expansión gradual de un fluido en un conducto divergente.

Los coeficientes de resistencia  $K$  para distintos ángulos de cono  $\theta$  y relación de diámetros  $D_2/D_1$  se muestran en la figura 4.7 [Ref. 25]:



**Figura 4.7** Coeficiente de resistencia para una expansión gradual de flujo.

Luego de obtener, mediante las gráficas anteriores, los coeficientes de resistencia de las partes convergente y divergente del mezclador, calculamos el coeficiente de descarga del mezclador según la siguiente ecuación [Ref. 25], considerando que la parte cilíndrica del mezclador no ocasiona resistencia al flujo:

$$C_{d,mz} = \frac{1}{\sqrt{1+K_1+K_2}} \quad (4.6)$$

Donde:

$K_1$ : Coeficiente de resistencia de la parte convergente.

$K_2$ : Coeficiente de resistencia de la parte divergente.

#### 4.1.6 Cálculo de las propiedades de la mezcla de gases:

Una mezcla de gases puede tratarse como una sustancia pura, porque casi siempre es una mezcla homogénea de diferentes gases. Las propiedades de una mezcla de gases dependen de las propiedades de los gases individuales (llamados componentes o constituyentes), así como de la cantidad de gases en la mezcla [Ref. 5].

Considerando una mezcla de gases formada por  $k$  componentes, la masa de la mezcla  $m_m$  y el número de moles de la mezcla  $N_m$  serán respectivamente:

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \quad (4.7)$$

$$N_m = \sum_{i=1}^k N_i \quad (4.8)$$

La relación entre la masa de un componente y la masa de la mezcla se conoce como fracción de masa ( $f_m$ ), y la relación entre el número de moles de un componente y el número de moles de la mezcla se denomina fracción molar ( $y$ ).

$$f_{m_i} = \frac{m_i}{m_m} \quad (4.9)$$

$$y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (4.10)$$

La masa molar aparente  $\bar{M}_m$  o masa molar promedio de la mezcla de gases viene dada por:

$$\bar{M}_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{\sum m_i}{N_m} = \frac{\sum N_i \bar{M}_i}{N_m} = \sum_{i=1}^k y_i \cdot \bar{M}_i \quad (4.11)$$

Donde:

$\bar{M}_m$ : Masa molar promedio de la mezcla de gases ( $kg/kmol$ ).

$y_i$ : Fracción molar de cada componente de la mezcla.

$\bar{M}_i$ : Masa molar de cada componente de la mezcla ( $kg/kmol$ ).

La constante promedio o aparente de la mezcla de gases se determina por:

$$R_m = \frac{R_u}{\bar{M}_m} \quad (4.12)$$

Donde:

$R_u$ : Es la constante universal de los gases, igual a 8,314 kJ/kmol.K.

La densidad promedio o aparente de la mezcla de gases se determina a partir de la ecuación universal de los gases:

$$p \cdot V = R_u \cdot T \cdot N_m \quad (4.13)$$

Donde:

$p$ : Presión de la mezcla de gases (Pa).

$V$ : Volumen de la mezcla de gases ( $m^3$ ).

$T$ : Temperatura de la mezcla de gases (K).

$$p \cdot V = R_u \cdot T \cdot \frac{m_m}{\bar{M}_m}$$

$$p = R_m \cdot T \cdot \frac{m_m}{V}$$

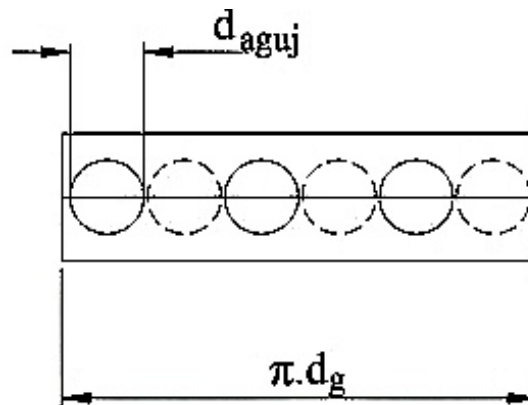
$$\rho_m = \frac{p}{R_m \cdot T} \quad (4.14)$$

#### 4.1.7 Cálculo del máximo número posible de agujeros del mezclador.

El número máximo posible de agujeros que puede tener el mezclador se dará a manera de recomendación práctica. Este número se determinará en forma aproximada al desarrollar (extender imaginariamente en un plano) la parte cilíndrica del mezclador (garganta), que es donde se ubican los agujeros, y dividiendo la longitud total de este desarrollo entre el doble del diámetro de los agujeros del mezclador (ver figura 4.8). Se considera el doble del diámetro de los agujeros, ya que de esta manera los agujeros estarán separados una distancia igual a su diámetro. Esta distancia se considera la mínima necesaria para realizar el mecanizado de estos agujeros. La fórmula es:

$$N_{max,aguj} = \frac{\pi \cdot d_g}{2 \cdot d_{aguj}} \quad (4.15)$$





**Figura 4.8** Desarrollo de un perfil cilíndrico con diámetro igual al diámetro de la garganta del mezclador.

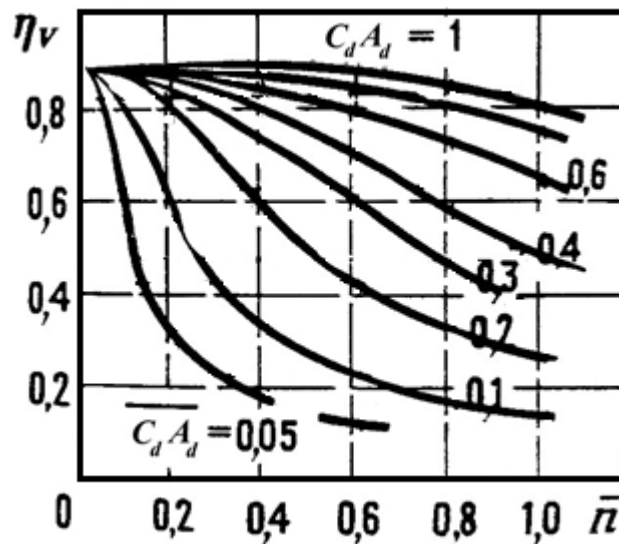
#### 4.1.8 Cálculo de la eficiencia volumétrica ( $\eta_v$ ):

El coeficiente de llenado  $\eta_v$  o eficiencia volumétrica, es un parámetro que permite evaluar el grado de perfección del proceso de admisión, y se define como la razón entre la cantidad de carga fresca que se encuentra en el cilindro al inicio de la compresión real (al instante que se cierra la válvula de admisión), y aquella cantidad de carga fresca que podría llenar el cilindro a las condiciones de admisión.

El cálculo de la eficiencia volumétrica  $\eta_v$  se realiza en función de la velocidad de rotación del motor  $n$  (*rpm*), y del ángulo de apertura de la mariposa  $\psi$ .

Una vez calculada la eficiencia volumétrica  $\eta_v$  se procede a calcular el caudal de la mezcla de gases  $\dot{Q}_{mz}$  que necesita el motor para este régimen de funcionamiento.

En la gráfica de la figura 4.9 se observa la variación de la eficiencia volumétrica con respecto a las revoluciones relativas del motor  $\bar{n}$  y al área relativa de paso a través de la válvula de mariposa del carburador.



**Figura 4.9** Coeficiente de llenado  $\eta_v$  en función de la velocidad de rotación relativa  $\bar{n}$  [Ref. 22].

El valor relativo de las revoluciones del motor  $\bar{n}$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$\bar{n} = \frac{n}{n_{nom}} \quad (4.16)$$

Donde:

$n$ : Velocidad de rotación del motor (rpm).

$n_{nom}$ : Velocidad de rotación nominal del motor (rpm).

El área relativa de paso a través de la válvula de mariposa del carburador  $\overline{C_d \cdot A_d}$  se calcula de la siguiente manera:

$$\overline{C_d \cdot A_d} = \frac{C_d \cdot A_d}{C_{dmax} \cdot A_{dmax}} \quad (4.17)$$

Donde:

$C_d$ : Coeficiente de descarga para una posición cualquiera de la mariposa.

$A_d$ : Sección de paso del gas a través de la mariposa (para una posición cualquiera).

$C_{dmax}$ : Coeficiente de descarga para la posición de máxima apertura de la mariposa.

$A_{dmax}$ : Máxima sección de paso del gas a través de la mariposa (posición de máxima apertura).

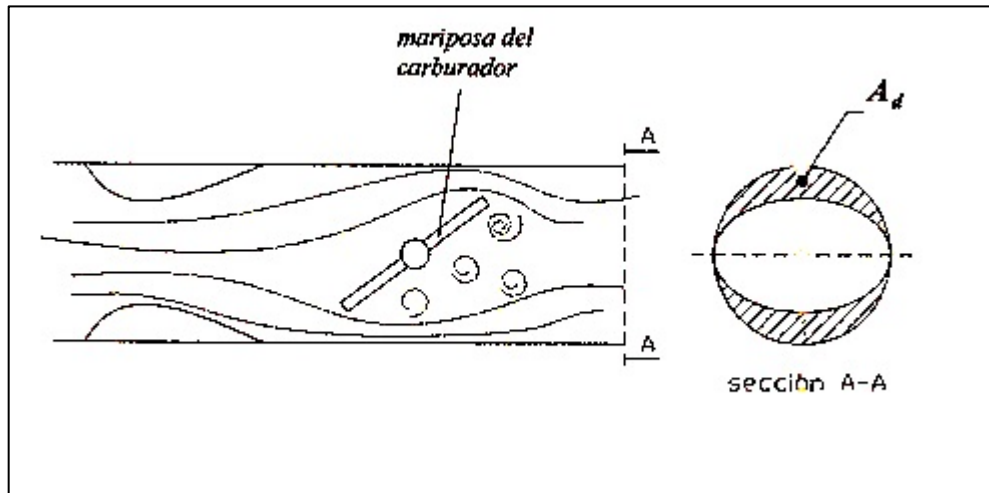


Figura 4.10 Esquema de la mariposa del carburador.

Otra forma de determinar la eficiencia volumétrica es haciendo uso de la fórmula empírica propuesta por Orlin [Ref. 22], la cual se corrobora con datos proporcionados por Heywood [Ref. 20]:

$$\eta_v = A + B \cdot p_{k1} \quad (4.18)$$

Donde:

$\eta_v$ : Eficiencia volumétrica en porcentaje.

$A$ : Constante empírica de valor  $-5,5$ .

$B$ : Constante empírica de valor  $8,3 \cdot 10^{-4}$ .

$p_{k1}$ : Presión después de la válvula mariposa.

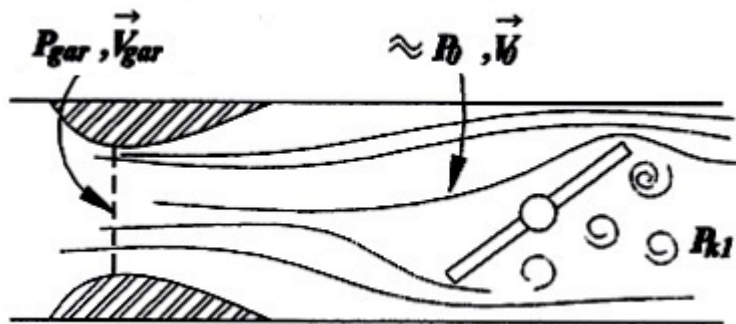


Figura 4.11 Esquema de la garganta del difusor del mezclador.

#### 4.1.9 Cálculo del diámetro de la mariposa del carburador de gasolina ( $D_{mar}$ ):

Este cálculo se hará sólo en el caso que el motor no tuviese el carburador de gasolina y, por lo tanto, hubiese la necesidad de seleccionarlo o diseñarlo. Se utilizará la fórmula propuesta por Orlin [Ref. 22]:

$$D_{mar} = \frac{a}{1000} \sqrt{n_{nom} \cdot V_h i} \quad (4.19)$$

Donde:

$a$ : Coeficiente que considera la pulsación de la depresión en el conducto de admisión, y depende del número de cilindros.

$i$ : Número de cilindros.

$V_h$ : Cilindrada del motor (L).

Los valores que toma  $a$  depende del número de cilindros del motor tal como se muestra en la tabla 4.1 [Ref. 22]:

**Tabla 4.1** Valores del coeficiente  $a$  según número de cilindros del motor.

$i$	1	2	3	4	5	6
$a$	24,2	17,1	14,15	13	12,85	11,9

#### 4.1.10 Cálculo del área de paso a través de la válvula mariposa ( $A_d$ ):

El área de paso a través de la válvula de mariposa del carburador, se calcula como una función del ángulo de apertura  $\psi$  (figura 4.12) a través de la siguiente ecuación [Ref. 20]:

$$A_d = \frac{\pi \cdot D_{mar}^2}{4} \left\{ \left( 1 - \frac{\cos \psi}{\cos \psi_0} \right) + \frac{2}{\pi} \left[ \frac{R_d}{\cos \psi} (\cos^2 \psi - R_d^2 \cos^2 \psi_0)^{1/2} - \frac{\cos \psi}{\cos \psi_0} \sin^{-1} \left( \frac{R_d \cos \psi_0}{\cos \psi} \right) - R_d (1 - R_d^2)^{1/2} + \sin^{-1}(R_d) \right] \right\} \quad (4.20)$$

Donde:

$\psi_0$ : Ángulo mínimo para el cual la mariposa está totalmente cerrada.

$R_d$ : Relación de diámetros ( $R_d = d/D_{mar}$ ), siendo  $d$  el diámetro del eje de la mariposa y  $D_{mar}$  el diámetro de la mariposa.

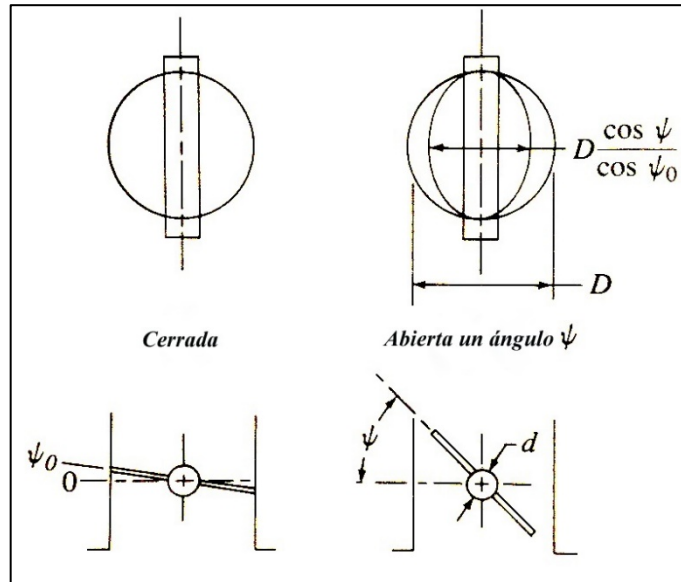


Figura 4.12 Geometría de la mariposa del carburador.

#### 4.1.11 Cálculo del flujo másico a través de la válvula de mariposa ( $\dot{m}_{a1}$ ):

El flujo másico a través de la válvula de mariposa puede ser calculado a partir de las ecuaciones estándar para flujo compresible:

Para relaciones de presión mayores a la crítica ( $p_{k1}/p_0 = 0,528$ ) el flujo másico está dado por la ecuación 4.21 [Ref. 20]:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{C_d \cdot A_d \cdot p_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \cdot \left( \frac{p_{k1}}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_{k1}}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4.21)$$

Donde:

$\dot{m}_{a1}$ : Flujo másico de la mezcla aire - combustible (kg/s).

$C_d$ : Coeficiente de descarga de la válvula mariposa.

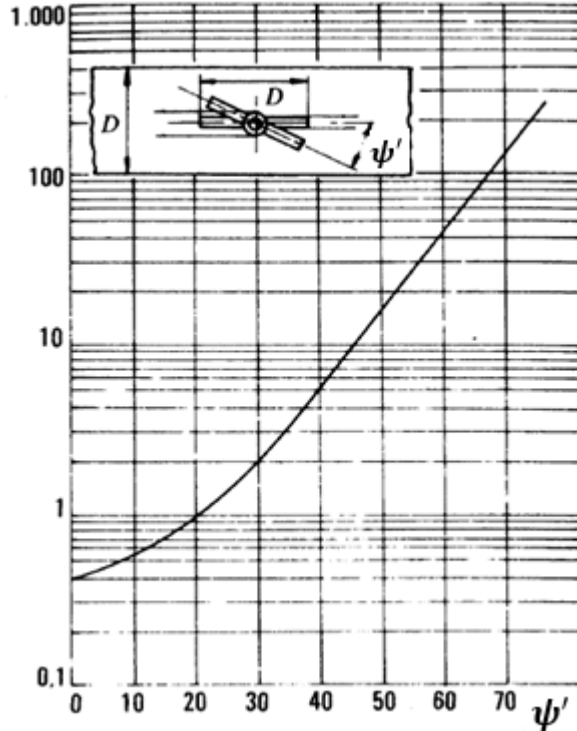
$p_0$ : Presión atmosférica (Pa).

$p_{k1}$ : Presión después de la válvula mariposa (Pa).

$T_0$ : Temperatura atmosférica (K).

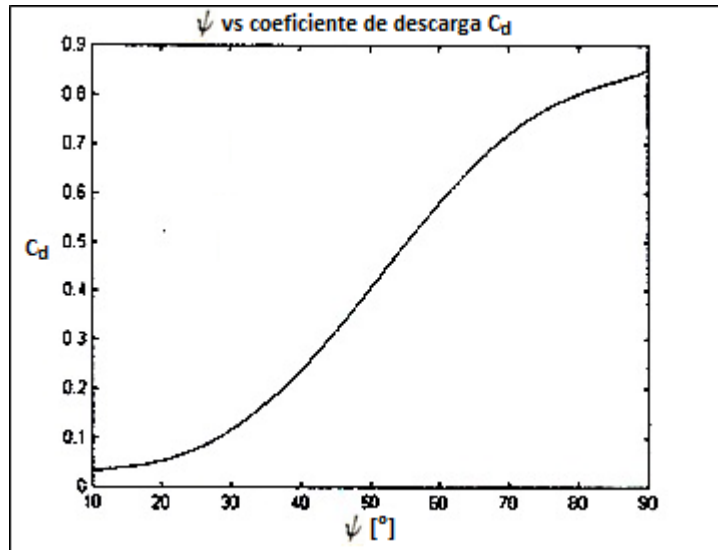
$k$ : Exponente adiabático para el aire.

La relación entre el coeficiente de resistencia de la válvula mariposa ( $K$ ) y el ángulo de apertura de la mariposa ( $\psi'$ ) se muestra en la figura 4.13 [Ref. 24]:



**Figura 4.13** Coeficiente de resistencia  $K$  según el ángulo  $\psi'$  de apertura de la mariposa.

Conociendo el coeficiente de resistencia de la válvula de mariposa, podemos determinar su coeficiente de descarga para cada ángulo de apertura de la mariposa usando la relación entre estos coeficientes según la ecuación 4.6. El resultado de aplicar dicha ecuación se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 4.14** Coeficiente de descarga para la válvula de mariposa.

**Nota:** El ángulo  $\psi'$  de la figura 4.13 se mide con respecto a la apertura de la mariposa, en cambio el ángulo  $\psi$  se mide con respecto al cierre de la mariposa tal como se muestra en la figura 4.12.

Si el flujo es supercrítico (cuando  $p_{k1}/p_0 \leq 0,528$ ) el flujo másico viene dado por [Ref. 20]:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{C_d \cdot A_d \cdot p_0}{\sqrt{R \cdot T_0}} \cdot k^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/2(k-1)} \quad (4.22)$$

El flujo másico de mezcla aire gas que necesita el motor se calcula, también, de acuerdo a la ecuación 4.23 [Ref. 21]:

$$\dot{m}_{a2} = \eta_v \cdot V_h \cdot i \cdot \rho_0 \cdot \frac{n}{120} \quad (4.23)$$

Donde:

$\dot{m}_{a2}$ : Flujo másico de la mezcla aire - combustible (kg/s).

$V_h$ : Cilindrada del motor (m<sup>3</sup>).

$i$ : Número de cilindros del motor.

$\rho_0$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).

$n$ : Velocidad de rotación del motor (rpm).

Como  $\dot{m}_{a1}$  y  $\dot{m}_{a2}$  deben ser iguales, se realiza un procedimiento iterativo para encontrar la presión después de la mariposa  $p_{k1}$  y finalmente calcular la eficiencia volumétrica  $\eta_v$  mediante la ecuación 4.18.

#### 4.1.12 Cálculo del ángulo máximo de apertura de la mariposa ( $\psi_{max}$ ):

Es el ángulo para el cual, el área de paso a través de la válvula de mariposa alcanza su valor máximo y viene dado por la siguiente fórmula [Ref. 20]:

$$\psi_{max} = \cos^{-1}(R_d \cdot \cos \psi_0) \quad (4.24)$$

Donde:

$\psi_0$ : Ángulo mínimo para el cual la mariposa está totalmente cerrada ( $\approx 5^\circ$ ).

$R_d$ : Relación de diámetros ( $R_d = d/D_{mar}$ ), siendo  $d$  el diámetro del eje de la mariposa y  $D_{mar}$  el diámetro de la mariposa.

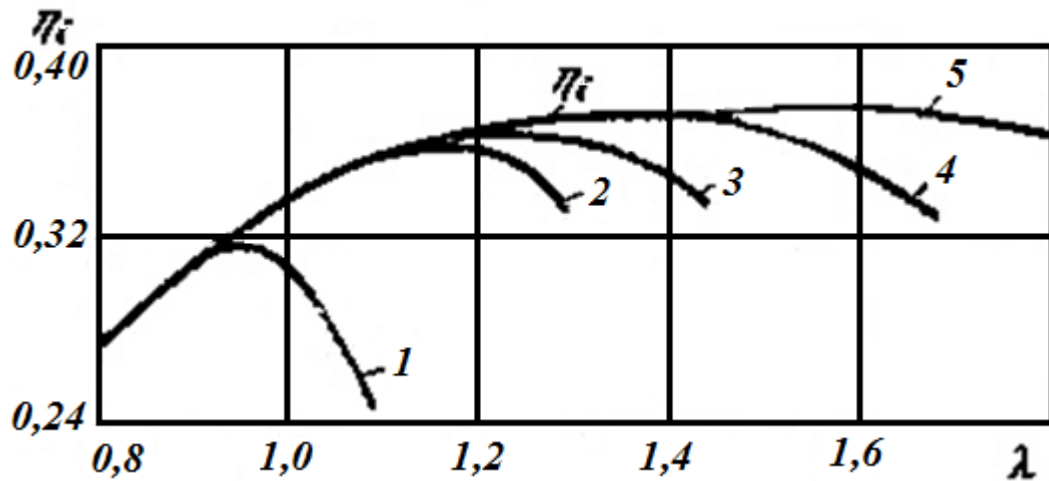
#### 4.1.13 Cálculo de la eficiencia del motor con biogás:

La eficiencia indicada de un motor E.CH. depende de muchos factores, entre los cuales los más importantes son: La composición de la mezcla aire combustible ( $\lambda$ ), el adelanto de la chispa, la relación de compresión, el régimen de velocidad y carga del motor, la geometría de la cámara de combustión, las propiedades físico químicas del combustible, etc.

Al utilizar biogás en lugar de gasolina, en un mismo motor, manteniendo el mismo régimen de velocidad y carga, se puede afirmar que la eficiencia indicada dependerá básicamente del coeficiente de exceso de aire y, en alguna medida, de las propiedades de este combustible.

Para un motor de encendido por chispa con carburador, la variación de la eficiencia indicada del motor  $\eta_i$  en función del coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  se muestra en la figura 4.15 [Ref. 18].





**Figura 4.15** Relación entre la eficiencia indicada  $\eta_i$  y el coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  en un motor de carburador: **1.** Con carga parcial ( $\eta_v = 0,32$ ), **2.** Con la mariposa de gases completamente abierta, **3.** Con dos bujías de encendido en cada cilindro, **4.** Utilizando carga estratificada, **5.** Con cámara de encendido de pre combustión (por dardo).

La gráfica anterior es obtenida utilizando gasolina como combustible, sin embargo es posible aplicarla para el caso del biogás, considerando un factor de corrección por pérdidas en la combustión  $f_{pc}$ .

La ecuación cuadrática que se utiliza en el programa se obtuvo como un polinomio de aproximación de la curva número 2 de la gráfica 4.15 cuyo resultado se multiplica por  $f_{pc}$  para obtener la eficiencia real del motor con biogás.

#### 4.1.14 Cálculo de las pérdidas mecánicas:

Las componentes de las pérdidas por rozamiento, condicionadas por la fricción viscosa (hidrodinámica) dependen relativamente poco de la carga sobre los elementos del mecanismo. La presión media  $P_{fr}$  que corresponde a estos componentes dependen prácticamente de manera lineal respecto al régimen de velocidad del motor, caracterizado por la velocidad media del pistón  $v_p$ .

A diferencia de esto, las componentes condicionadas por el rozamiento límite (contacto entre las superficies metálicas), dependen sustancialmente de la acción de los gases y en menor medida de las inerciales. Estas componentes también dependen linealmente de la velocidad del pistón.

El trabajo gastado en accionar los mecanismos auxiliares depende de la frecuencia de rotación del cigüeñal.

La combinación de los factores anotados permite para los cálculos siguientes de las pérdidas mecánicas emplear la fórmula [Ref. 18]:

$$p_m = A + B \cdot v_p \quad (4.25)$$

Donde  $A$  y  $B$  son los coeficientes mostrados en la tabla 4.2 para determinar  $p_m$  (en MPa) y  $v_p$  es la velocidad media del pistón (en m/s).

**Tabla 4.2** Valores de los coeficientes A y B para motores de encendido por chispa (Ref. 18).

	A	B
<b>S/D &gt; 1</b>	0,05	0,0155
<b>S/D &lt; 1</b>	0,04	0,0135

La determinación de la velocidad media del pistón se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$v_p = \frac{S \cdot n}{30} \quad (4.26)$$

Donde:

$n$ : Velocidad de rotación del motor (rpm).

$S$ : Carrera del pistón (m).

#### 4.1.15 Cálculo de la potencia efectiva del motor a biogás:

La potencia al freno que puede obtenerse en el cigüeñal del motor se denomina efectiva. La potencia efectiva  $N_e$  es menor que la indicada  $N_i$  en la magnitud de la potencia que se gasta en las pérdidas mecánicas  $N_m$ , es decir:

$$N_e = N_i - N_m \quad (4.27)$$

La potencia que se gasta en las pérdidas mecánicas, cuya fórmula es análoga a la de la potencia indicada (en kW), se determina mediante la siguiente ecuación [Ref. 18]:

$$N_m = \frac{p_m \cdot i \cdot V_h \cdot n}{30 \cdot \tau} \quad (4.28)$$

Donde:

$p_m$ : Presión media de pérdidas mecánicas (MPa).

$i$ : Número de cilindros.

$V_h$ : Cilindrada del motor (L).

$\tau$ : Número de carreras por ciclo ( $\tau = 2$  para un motor de dos tiempos, y  $\tau = 4$  para un motor de 4 tiempos.)

Si se conoce el consumo de combustible del motor (en  $m^3/s$ ) y la eficiencia indicada del motor con el combustible utilizado, la potencia indicada (en kW) se puede determinar mediante la siguiente expresión [Ref. 18]:

$$N_i = V_c \cdot H_u \cdot \eta_i \quad (4.29)$$

Donde:

$V_c$ : Consumo de combustible ( $m^3/s$ ).

$H_u$ : Poder calorífico del combustible ( $kJ/m^3$ ).

$\eta_i$ : Eficiencia indicada del motor.

#### 4.1.16 Cálculo de la potencia nominal del motor con gasolina:

El programa determina la potencia nominal indicada del motor con gasolina, a fines de comparar dicho resultado con la potencia obtenida utilizando biogás, mostrando como resultado el porcentaje de reducción de la potencia al cambiarse de combustible.

La determinación de la potencia indicada del motor (sin considerar las pérdidas mecánicas) se puede calcular a partir de la ecuación 4.29, considerando la siguiente relación:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a}{\lambda \cdot l_o} \quad (4.30)$$

Donde:

$\dot{m}_c$ : Flujo másico de gasolina ( $kg/s$ ).

$\dot{m}_a$ : Flujo másico de aire ( $kg/s$ ).

$l_o$ : Relación aire-combustible estequiométrica ( $kg/kg$ ) [ $l_o = 14,7 kg/kg$  para la gasolina].

La potencia nominal del motor a gasolina se hallará, de forma aproximada, con la fórmula de la potencia indicada 4.29 considerando  $\lambda = 1$  [Ref. 18]:

$$N_i = \frac{\dot{m}_a}{\lambda \cdot l_o} H_u \eta_i \quad (4.31)$$

Donde:

$H_u$ : Poder calorífico del combustible ( $kJ/kg$ ) [ $H_u = 44000 kJ/kg$  para la gasolina].

#### 4.1.17 Método numérico de la bisección:

La finalidad de aplicar este método es el de encontrar el valor de la eficiencia volumétrica que reemplazada en la ecuación 4.23, resulte el mismo valor que el obtenido al evaluar la ecuación 4.21 si se trata de flujo subcrítico, o la ecuación 4.22 si el flujo es del tipo supercrítico.

El método de la bisección [Ref. 27] es usado para hallar una raíz de una función  $f$  continua en  $[a, b]$  y tal que:

$$f(a) \cdot f(b) < 0$$

Dado que  $f$  es continua en  $[a, b]$ ,  $f(x)$  debe tomar todos los valores entre  $f(a)$  y  $f(b)$ , y en particular debe tomar el valor 0 para algún  $\alpha \in (a, b)$ .

Buscamos  $\alpha$  determinando una sucesión de intervalos, cada uno la mitad de largo que el precedente y cada uno conteniendo al menos un cero de  $f(x)$ ;

En orden de escribir el método ponemos:

$$a_0 = a \quad \text{y} \quad b_0 = b$$

Y calculamos una estimación inicial (punto medio de  $[a, b]$  )

$$x_0 = \frac{a_0 + b_0}{2}$$

Si  $f(x_0) = 0$  el proceso ha terminado. De otra forma, la raíz buscada pertenecerá a uno de los intervalos  $[a, x_0]$ ,  $[x_0, b]$ . Más precisamente, pertenecerá a aquel en que el producto de valores de  $f$  en sus extremos sea negativo. Por tanto, hallamos  $f(a_0) \cdot f(b_0)$  y ponemos:

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = a_0 \\ b_1 = x_0 \end{array} \right\} \quad \text{Si } f(a_0) \cdot f(x_0) < 0$$

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = x_0 \\ b_1 = b_0 \end{array} \right\} \quad \text{Si } f(a_0) \cdot f(x_0) > 0$$

Para calcular, entonces:

$$x_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}$$

En general, dadas  $a_n$ ,  $b_n$  y  $x_n$ , tomamos:

$$\left. \begin{array}{l} a_{n+1} = a_n \\ b_{n+1} = x_n \end{array} \right\} \text{ Si } f(a_n) \cdot f(x_n) < 0$$

$$\left. \begin{array}{l} a_{n+1} = x_n \\ b_{n+1} = b_n \end{array} \right\} \text{ Si } f(a_n) \cdot f(x_n) > 0$$

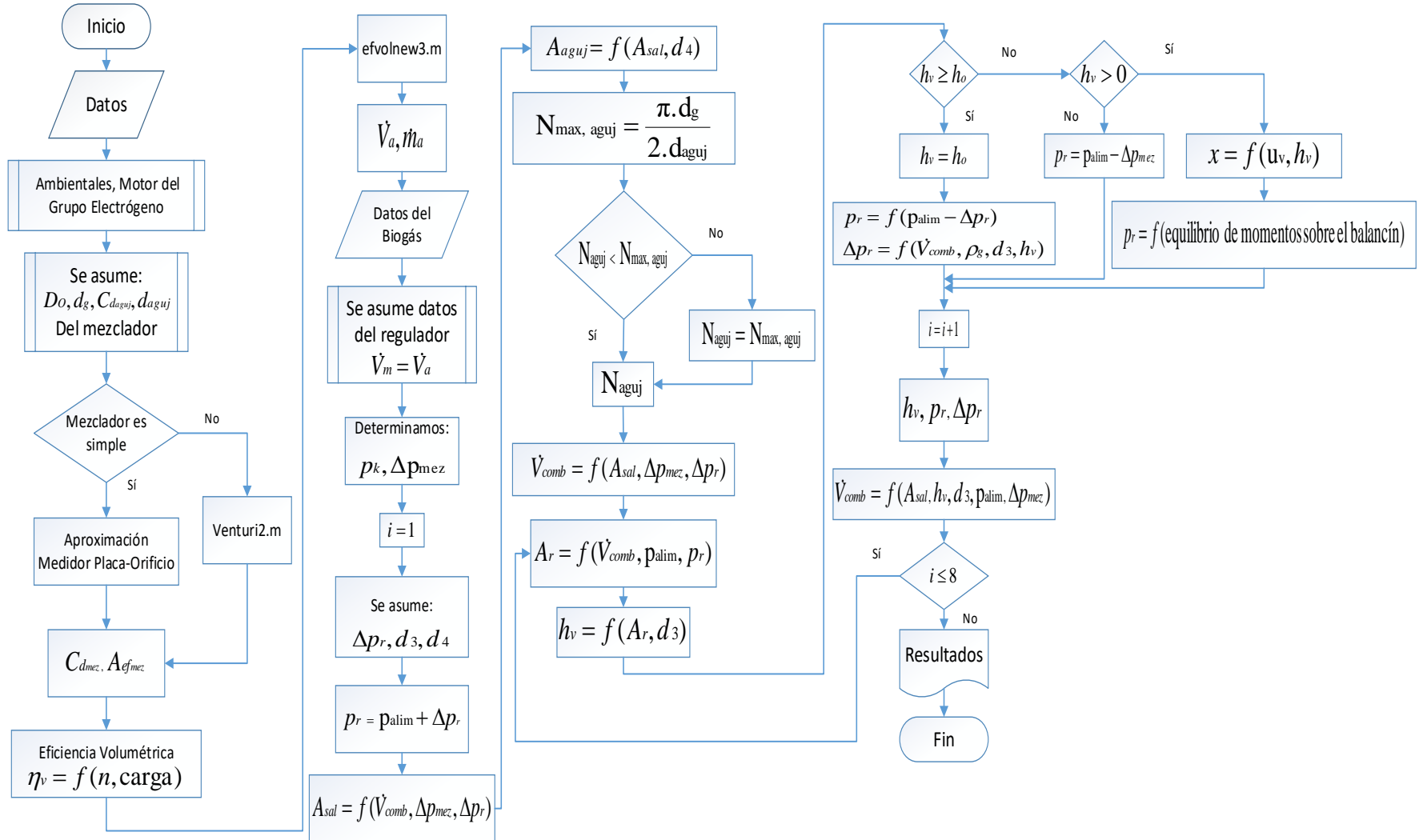
Y hallamos la iteración  $n + 1$

$$x_{n+1} = \frac{a_{n+1} + b_{n+1}}{2} \quad (4.32)$$

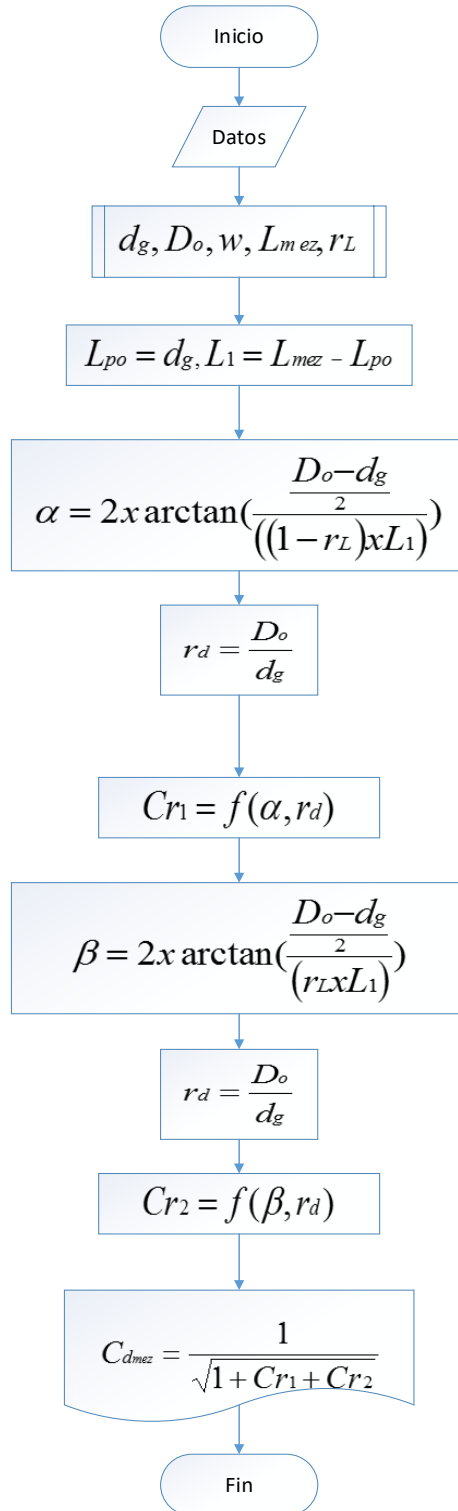
Es claro que, en cada paso, la longitud del intervalo que encierra a la raíz se reduce a la mitad, de forma que la convergencia siempre estará asegurada.

#### 4.2 Diagramas de flujo:

## 4.2.1 Diagrama de flujo del programa biogasenew.m:

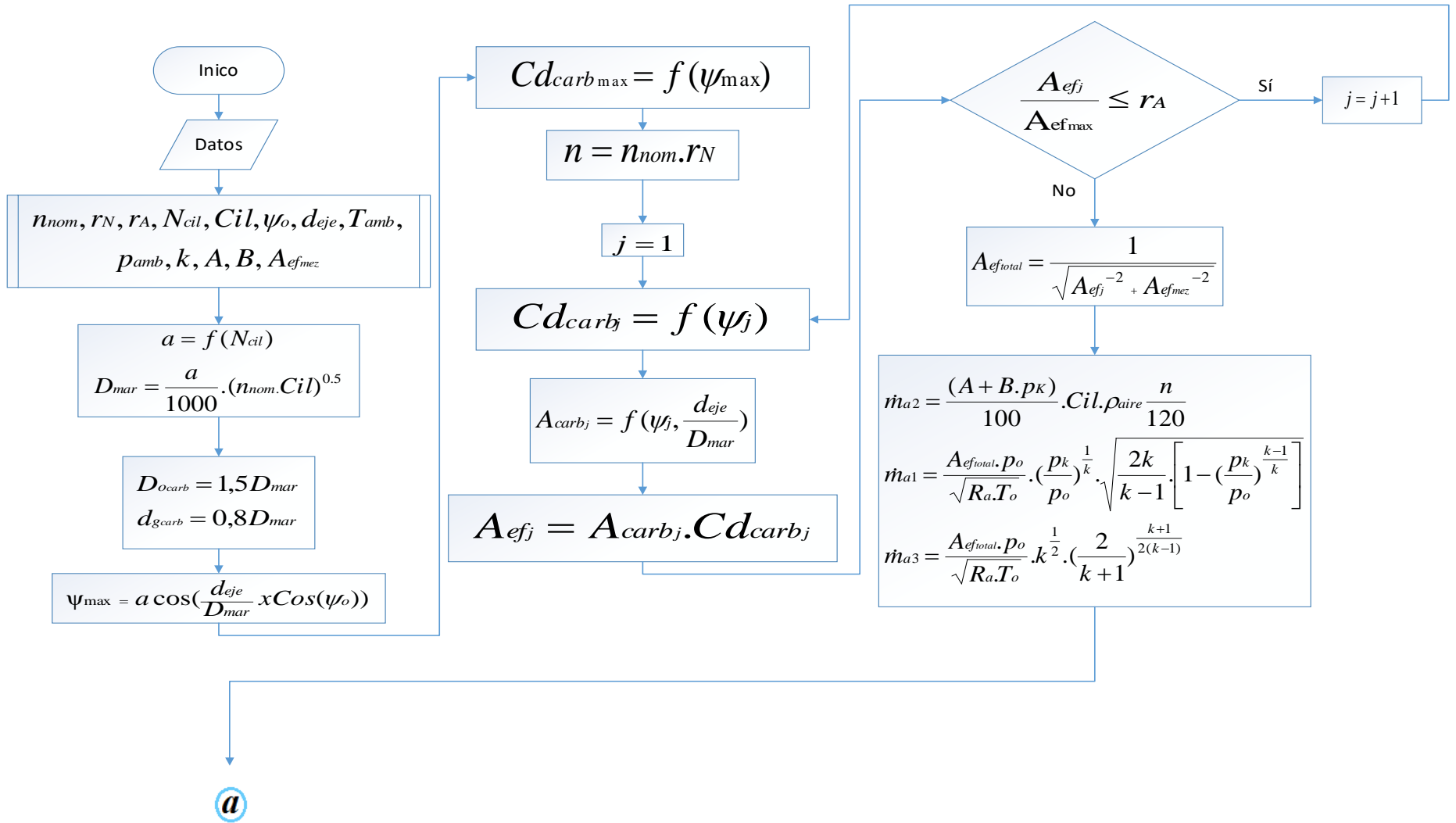


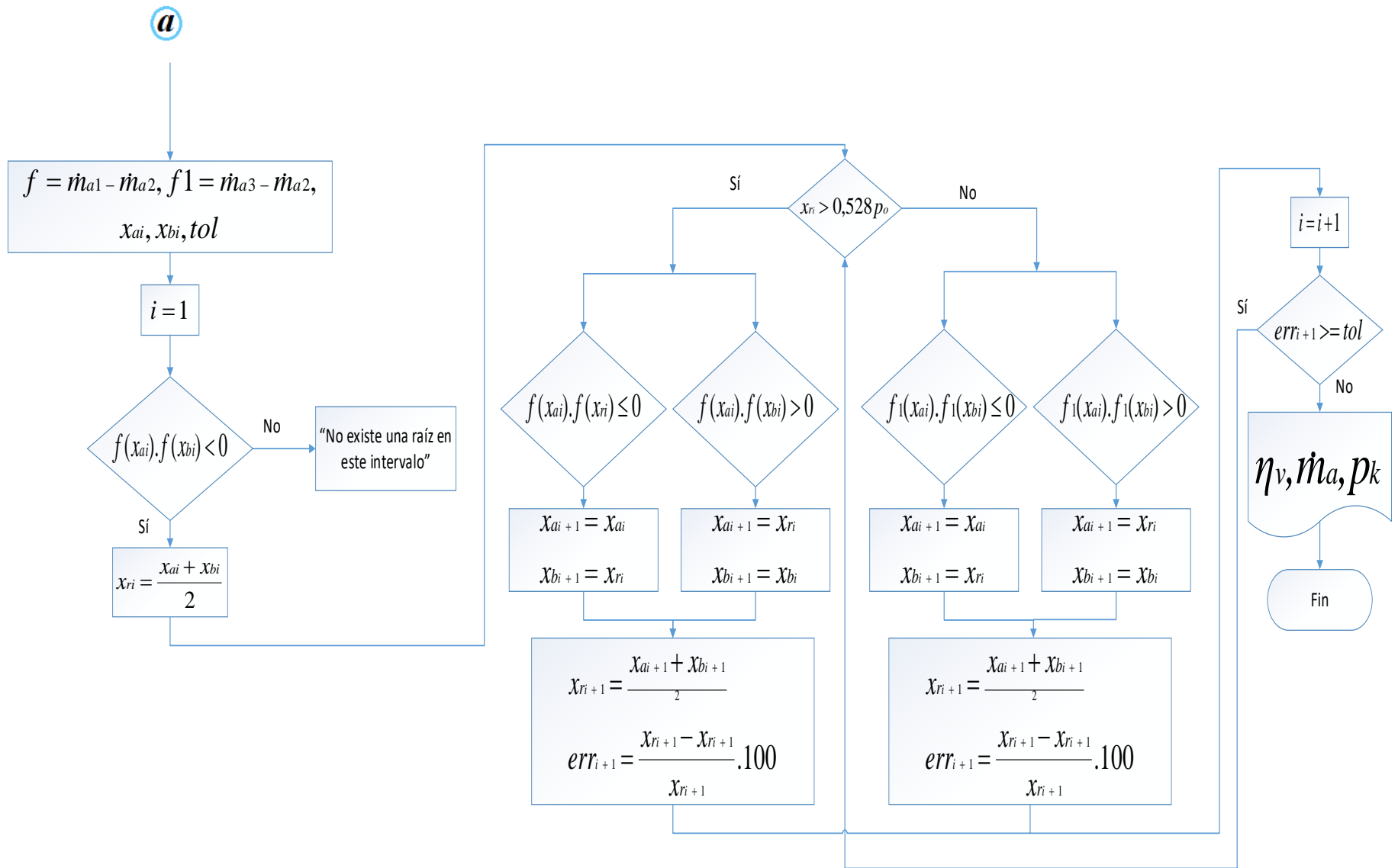
## 4.2.2 Diagrama de flujo del sub-programa venturi2.m:



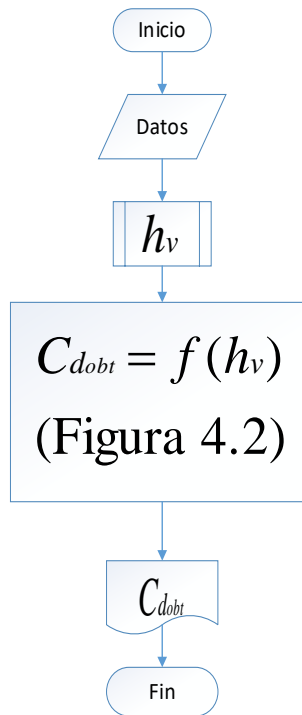


4.2.3 Diagrama de flujo del sub-programa eevolnew3.m:





#### 4.2.4 Diagrama de flujo del sub-programa c\_descarga.m:



#### 4.3 Algoritmos de cálculo:

A) Al ingresar al programa MATLAB R2013a se debe abrir el programa “biogasenew.m” en el editor de ecuaciones. Este es el programa principal de cálculo de trabajo del motor Hyundai HY3100 LE, donde la secuencia de desarrollo del programa es la siguiente:

- 1) Se define si el Mezclador a utilizar es aerodinámico o si es simple. Se ingresan las constantes de la ecuación empírica 4.18.
- 2) Se proporcionan las condiciones ambientales del aire y los datos del motor.
- 3) Se asume los datos iniciales del mezclador: diámetro de entrada, diámetro de la garganta, coeficiente de descarga de los agujeros del mezclador y el diámetro de estos agujeros.
- 4) Se pregunta el tipo de mezclador que se utiliza. Si el mezclador es del tipo simple, se calcula su coeficiente de descarga, aproximadamente igual al de un

medidor de flujo tipo placa orificio según la gráfica 4.3. Si el mezclador es del tipo aerodinámico hallamos su coeficiente de descarga con el subprograma “venturi2.m”.

- 5) Se determina el área efectiva del mezclador multiplicando su coeficiente de descarga hallado por el área geométrica de la garganta.
- 6) Conociendo que la eficiencia volumétrica es dependiente de la velocidad de rotación del motor y del ángulo de apertura de la mariposa del carburador de gasolina, se determina dicha eficiencia y el flujo másico de aire de succión con el subprograma “efvolnew3.m”. Finalmente, se calcula el flujo volumétrico de aire de ingreso dividiendo el flujo másico de aire entre su densidad.
- 7) Se ingresan los datos del biogás. Se asume que el caudal de la mezcla biogás-aire es igual al flujo volumétrico de aire hallado inicialmente (cuando el motor trabaja con gasolina).
- 8) Se calcula la presión después de la mariposa según la ecuación 4.18, luego se determina la caída de presión en la garganta del mezclador según las ecuaciones 3.2 y 3.17 para lambda igual a 1.
- 9) Se inicia el contador en 1. Se asumen: un valor de la caída de presión dentro del regulador, el diámetro del tubito surtidor y el diámetro de la tubería que conecta el regulador con el mezclador.
- 10) Se halla la presión inicial dentro del regulador, restando a la presión de alimentación de biogás la caída de presión asumida en el regulador.
- 11) Se determina el caudal volumétrico de combustible referencial según la fórmula 3.1 para lambda igual a 1. Se calculan el área equivalente de salida entre el regulador y el mezclador en función del flujo volumétrico de biogás, la caída de presión en la garganta del mezclador y la caída de presión en el regulador según la ecuación 3.15.
- 12) Se calcula el área total de los agujeros del mezclador en función del área equivalente de salida entre el regulador y el mezclador, y el diámetro de la tubería que conecta el regulador con el mezclador según la ecuación 3.16. Se determinan el número exacto de agujeros en el mezclador dividiendo el área total hallada en la sentencia anterior entre el área de cada agujero. Se calcula el

máximo número de agujeros del mezclador según la ecuación 4.15. Ahora se pregunta si el número de agujeros hallado es mayor que el número máximo permitido de agujeros, en caso afirmativo se iguala el número de agujeros al número máximo permitido, sino se continúa con el programa.

- 13) Se determinan: el caudal volumétrico de combustible en función del área equivalente de salida entre el regulador y el mezclador (considerando el número de agujeros determinado anteriormente), la caída de presión en la garganta del mezclador, y la caída de presión en el regulador según la ecuación 3.15.
- 14) Se calcula el área efectiva equivalente de paso de la tubería de alimentación hacia el regulador, es decir, el área efectiva equivalente de la ecuación 3.9, en función del caudal volumétrico de combustible, la presión de alimentación de biogás, la presión en el interior del regulador según la ecuación 3.15 aplicada a esta sección de paso del obturador.
- 15) Se determina el levantamiento del obturador en función del área efectiva equivalente de paso de la tubería de alimentación hacia el regulador y el diámetro del tubo surtidor según las ecuaciones 3.9 y 3.10.
- 16) Se determina el coeficiente de descarga para el levantamiento del obturador hallado con el subprograma "c\_descarga.m". Se pregunta si el levantamiento del obturador hallado es mayor o igual que el levantamiento máximo del obturador ingresado como dato. Si lo es, el levantamiento del obturador se iguala al levantamiento máximo permitido y se determina la presión en el interior del regulador al restar la caída de presión en el mismo a la presión de alimentación; la caída de presión en el regulador se determina en función del caudal volumétrico de combustible, la densidad del biogás, el diámetro del tubo surtidor y el levantamiento del obturador según las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.15. Si el levantamiento del obturador hallado es menor que cero (obturador completamente cerrado) se halla la presión en el reductor simplemente como la diferencia de la presión de alimentación de biogás con la caída de presión en la garganta del mezclador; si el levantamiento del obturador hallado está entre cero y el valor máximo de levantamiento del obturador ingresado como dato, se calcula la contracción que sufren los resortes de máxima y de mínima, y a continuación se determina la presión en el regulador a través de la ecuación 3.12 de equilibrio de momentos sobre el balancín del obturador.

- 17) Se aumenta el contador en una unidad y se almacenan datos como: el levantamiento del obturador, la presión en el interior del regulador y la caída de presión del biogás a su paso por el regulador.
  - 18) Se determina el caudal de combustible aplicando la ecuación 3.15 desde la tubería de alimentación de biogás hasta la garganta del mezclador, en este caso el área efectiva se hallaría a partir de la ecuación 3.16 considerando el área efectiva de salida entre el regulador y el mezclador, y el área efectiva de la sección del tubo surtidor (ecuaciones 3.9 y 3.10), la caída de presión total sería la suma de la caída de presión de biogás a su paso por el obturador con la caída de presión en la garganta del mezclador.
  - 19) Se pregunta si el contador es menor o igual que 8 (valor para el cual el valor del consumo volumétrico de biogás tiene una buena convergencia entre iteraciones sucesivas). Si es así, se regresa al paso número 14 para realizar nuevamente los cálculos anteriores con los resultados de la iteración previa. Caso contrario se almacenan los resultados en las variables de salida.
  - 20) Se realiza el mismo procedimiento anterior para diferentes relaciones de área de apertura de la mariposa con respecto a la máxima apertura (figura 4.12) y a diferentes velocidades de rotación del motor.
- B) El cálculo del coeficiente de descarga del mezclador cuando éste es del tipo aerodinámico, se realiza a través de un subprograma llamado “venturi2.m” declarado como una función en el programa MATLAB R2013a. Este subprograma realiza lo siguiente:
- 1) Se ingresan los datos del mezclador: el diámetro de la garganta, diámetro de entrada, el factor de empeoramiento que toma en cuenta la limpieza del filtro y pérdidas del sistema de admisión, la longitud del mezclador y la fracción de la parte divergente a su longitud total.
  - 2) Se iguala la longitud de la parte cilíndrica del mezclador al diámetro de la garganta (figura 3.6). Luego se resta dicha longitud de la parte cilíndrica del mezclador a la longitud total del mezclador para hallar la longitud de las partes convergente y divergente del mezclador.
  - 3) Se determina el ángulo de la parte convergente del mezclador aproximándola a una forma de contracción gradual cónica. Calculamos el ángulo aproximado de la parte convergente mediante un cálculo geométrico simple a partir de la gráfica 4.4.

- 4) Se halla la relación de diámetros entre la entrada al mezclador y la garganta.
  - 5) Se calcula el coeficiente de resistencia de la parte convergente del mezclador para el ángulo determinado, según la gráfica 4.5.
  - 6) De forma análoga a la parte convergente del mezclador, se determina el ángulo de la parte divergente del mezclador aproximándola a una forma de expansión gradual cónica (figura 4.6).
  - 7) Se determina la relación de diámetros entre la salida del mezclador y la garganta.
  - 8) Se calcula el coeficiente de resistencia de la parte divergente del mezclador para el ángulo determinado, según la gráfica 4.7.
  - 9) Conociendo los coeficientes de resistencia de la parte convergente y divergente del mezclador se determina el coeficiente de descarga mediante la ecuación 4.6.
- C) El cálculo de la eficiencia volumétrica para distintos ángulos de apertura de la mariposa del carburador a diferentes velocidades se realiza mediante el subprograma “efvolnew3.m” declarado como una función en el programa MATLAB R2013a. Este subprograma realiza lo siguiente:
- 1) Se ingresan los datos de entrada: la velocidad nominal del motor, relación de velocidades con respecto a la nominal, relación de áreas de apertura de la mariposa con respecto a la máxima apertura, número de cilindros del motor, cilindrada, ángulo mínimo de apertura de la mariposa, diámetro del eje de la mariposa, temperatura ambiental, presión ambiental, exponente adiabático del aire, coeficientes empíricos de la ecuación 4.18, área efectiva del mezclador de biogás.
  - 2) Se determina el valor de la constante “a” en la ecuación 4.19 según la tabla 4.1. Luego se calcula el diámetro de alojamiento de la mariposa del carburador de gasolina (si no se conoce su valor) según la ecuación anterior. Se hallan los diámetros de entrada y de la garganta del carburador de gasolina (si no se conocen dichos valores) multiplicando por 1,5 y 0,8, respectivamente, el diámetro de alojamiento de la mariposa según consideraciones de diseño [Ref. 21].
  - 3) Se halla el ángulo de máxima apertura de la mariposa según la ecuación 4.24.

- 4) Se calcula la velocidad de rotación del motor multiplicando la relación de velocidades con respecto a la nominal por la velocidad nominal. Se inicia el contador en la unidad.
- 5) Se determina el coeficiente de descarga del carburador de gasolina para un determinado ángulo de apertura de la mariposa según la gráfica 4.14.
- 6) Se calcula el área de paso a través de la válvula mariposa para el ángulo anterior según la ecuación 4.20. Luego se obtendrá el área efectiva del carburador de gasolina multiplicando el coeficiente de descarga por el área de paso a través de la mariposa.
- 7) Se divide el área efectiva calculada anteriormente con el área efectiva correspondiente al máximo ángulo de apertura de la mariposa para compararlo con la relación de áreas de apertura de la mariposa ingresada como dato. Si dicho valor es menor o igual que el valor ingresado como dato, se aumenta el contador en una unidad y se regresa al paso 5 para el siguiente ángulo de apertura de la mariposa. En caso contrario se determina el área efectiva equivalente total entre el mezclador de biogás y el carburador de gasolina aplicando la ecuación 3.16 entre estas dos áreas.
- 8) Se determina el flujo másico de aire que ingresa al motor mediante la ecuación 4.23, reemplazando la eficiencia volumétrica en función de la presión después de la válvula mariposa según la ecuación 4.18. Luego se calcula el mismo valor del flujo másico de aire, pero con la ecuación 4.21 para flujo subcrítico y la ecuación 4.22 para régimen supercrítico.
- 9) Se crean las funciones “ $f$ ” y “ $fI$ ” como las diferencias de los flujos másicos de aire determinados por las ecuaciones 4.23 y 4.21 para régimen subcrítico ( $fI$ ) y 4.23 y 4.22 para régimen supercrítico ( $f2$ ). Se asignan los límites superior e inferior del intervalo ( $x_{ai}$ ,  $x_{bi}$ ) donde posiblemente se podrían encontrar la solución a dichas funciones ( $x_{ri}$ ). Se inserta un valor de tolerancia aceptable para determinar la solución.
- 10) Se crea un contador que empieza en 1. Luego se pregunta si el producto de valores que resultan al evaluar los límites de la solución  $x_{ai}$ ,  $x_{bi}$  en la función  $f$ , es menor que cero. En caso de falsedad se afirma que la solución no se encuentra entre dichos límites y tendrán que asignarse nuevos valores. Si la respuesta es verdadera, entonces se halla la primera aproximación de la raíz mediante una semisuma de los límites.



- 11) Se pregunta si el valor de la primera aproximación de la raíz (presión después de la válvula mariposa) es mayor que la presión crítica. En caso afirmativo se trabajará con la función  $f$ . Caso contrario se utilizará la función  $fl$ .
  - 12) Se pregunta si el producto de evaluar el límite inferior  $x_{ai}$  y el punto de aproximación  $x_{ri}$  en la función es menor o igual que cero. Si la anterior se cumple: se iguala el límite inferior  $x_{ai}$  al límite inferior de la iteración, y el nuevo límite superior será el punto de aproximación  $x_{ri}$ . Si el producto de evaluar el límite inferior y el punto de aproximación en la función es mayor que cero: se iguala el límite inferior al punto de aproximación  $x_{ri}$ , y el límite superior al límite superior de la iteración  $x_{bi}$ . Finalmente se calcula el nuevo punto de aproximación aplicando la ecuación 4.32 a los nuevos límites de iteración.
  - 13) Se determina el porcentaje de error que se obtiene con este nuevo punto de aproximación. Se aumenta en uno el contador y luego se pregunta si dicho valor del error es mayor o igual que el valor insertado como tolerancia. En caso afirmativo se regresa al paso 11 y se realiza los mismos cálculos anteriores. Caso contrario se almacenan los resultados en las variables de salida: eficiencia volumétrica, flujo másico de aire que ingresa al motor, presión después de la válvula mariposa.
- D) El coeficiente de descarga del obturador varía conforme el obturador se levanta (figura 3.2). Para el cálculo de este coeficiente usamos un subprograma de nombre "c\_descarga.m" cuya única variable de entrada es el levantamiento del obturador y realiza las siguientes acciones:
- 1) Se determina el coeficiente de descarga con el valor del levantamiento del obturador ingresado como dato según la gráfica 4.2.
  - 2) Se almacena el valor hallador en la variable de salida: coeficiente de descarga del obturador.

#### 4.4 Resultados numéricos del modelo matemático:

El grupo electrógeno utilizado es de generación eléctrica a partir de la gasolina debido a que estos presentan mayor facilidad de construcción para potencias menores de 10 kW y por ello son comúnmente utilizados en este rango. Los principales datos del grupo electrógeno, extraídos de manuales y catálogos respectivos (Anexo A), se resumen en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Especificaciones técnicas del grupo electrógeno.

<b>Grupo electrógeno HYUNDAI HY3100 LE</b>		
Generador	Frecuencia (Hz)	60
	Potencia nominal (kW)	2,5
	Potencia máxima (kW)	2,8
	Voltaje (V)	220
	Corriente máxima (A)	12,1
Motor	Modelo de motor	IC200
	Combustible	Gasolina G-90
	Número de cilindros	1
	Diámetro x desplazamiento del pistón (mm x mm)	68 x 54
	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	196
	Potencia (HP)	6,5
	Relación de compresión	8,5:1
Datos logísticos	Capacidad del tanque de gasolina (L)	3,6
	Tiempo de funcionamiento continuo (h)	8

Las dimensiones principales del mezclador a construir se muestran en la tabla 4.4. Las dimensiones de los diámetros exterior e interior se obtuvieron a partir del carburador de gasolina, ya que finalmente éste se acopla en serie con el mezclador. Las medidas interiores tales como el diámetro de la garganta, diámetro de entrada del biogás y diámetro de los orificios, se obtuvieron evaluando estas medidas en el programa, de tal manera que se obtenga un coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  entre 1,1 y 1,3, a régimen nominal, donde se obtiene mayor economicidad y el transcurso suficientemente estable del proceso de combustión. Si se quiere priorizar la potencia de estos motores,  $\lambda$  debe estar entre 0,85 a 0,90 [Ref. 18].

**Tabla 4.4** Características del mezclador.

Parámetro	Símbolo	Valor
• Diámetros de entrada y salida, mm	$D$	22,5
• Diámetro de la garganta, mm	$d_g$	15,3
• Longitud, mm	$L$	50,4
• Longitud de parte convergente, mm	$L_l$	21
• N° de agujeros	$N^\circ$	6
• Diámetro de agujeros, mm	$d_{aguj}$	3,2
• Angulo de entrada	$\alpha$	54,3°
• Angulo de salida	$\beta$	14,6°

Las dimensiones del regulador corresponden, como primera referencia, al diámetro del diafragma, único componente cuya compra es necesaria debido al tipo de material de fabricación (acrilo nitrilo) resistente a la acción diluyente del gas. Las demás medidas dependen de los diámetros de ingreso y salida de biogás necesarios para generar la potencia requerida. Más detalles sobre el dimensionado del regulador y el mezclador de biogás se desarrollan en el siguiente capítulo. La tabla 4.5 resume las características finales del regulador:

**Tabla 4.5** Parámetros del regulador-dosificador.

Parámetro	Símbolo	Valor
• Diámetro del diafragma, mm.	$D_{diaf}$	130
• Diámetro del surtidor, mm	$d_3$	16,1
• Rigidez del resorte, N/m	$k_r$	346
• Brazo de palanca del diafragma, mm	$b$	36
• Brazo de palanca del obturador, mm	$c$	17
• Brazo de palanca del resorte, mm	$a$	21
• Levantamiento máximo del obturador, mm	$h_0$	12

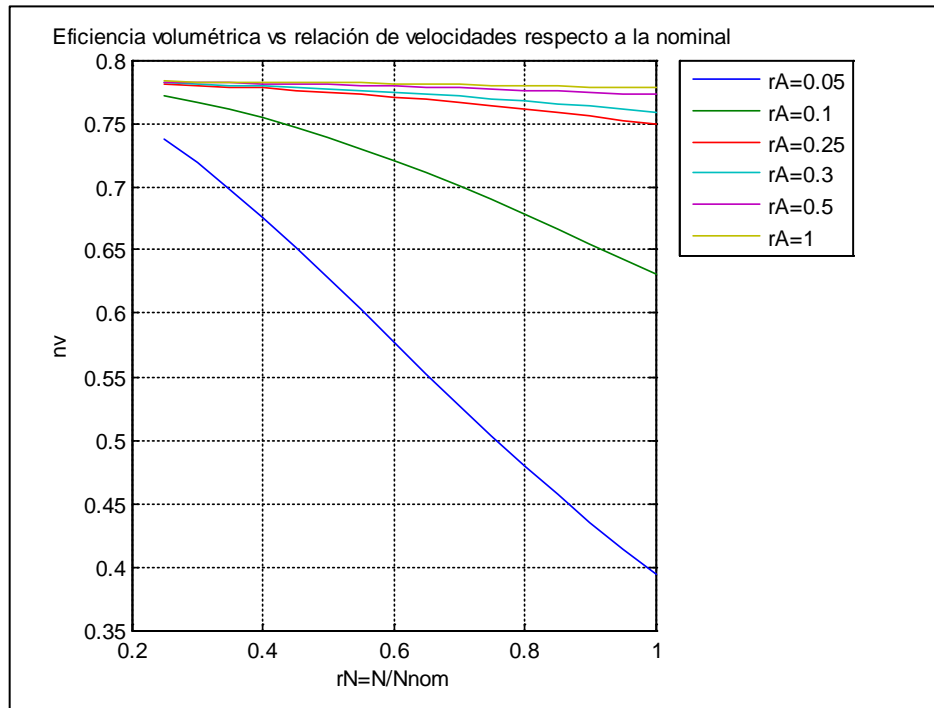
Teniendo conocimiento de los datos anteriores, procedemos a introducirlos en el programa obteniendo los siguientes resultados que muestran las principales características del motor funcionando con biogás a la potencia nominal:

**Tabla 4.6** Resultados numéricos del programa correspondiente al grupo electrógeno funcionando con biogás a la potencia nominal.

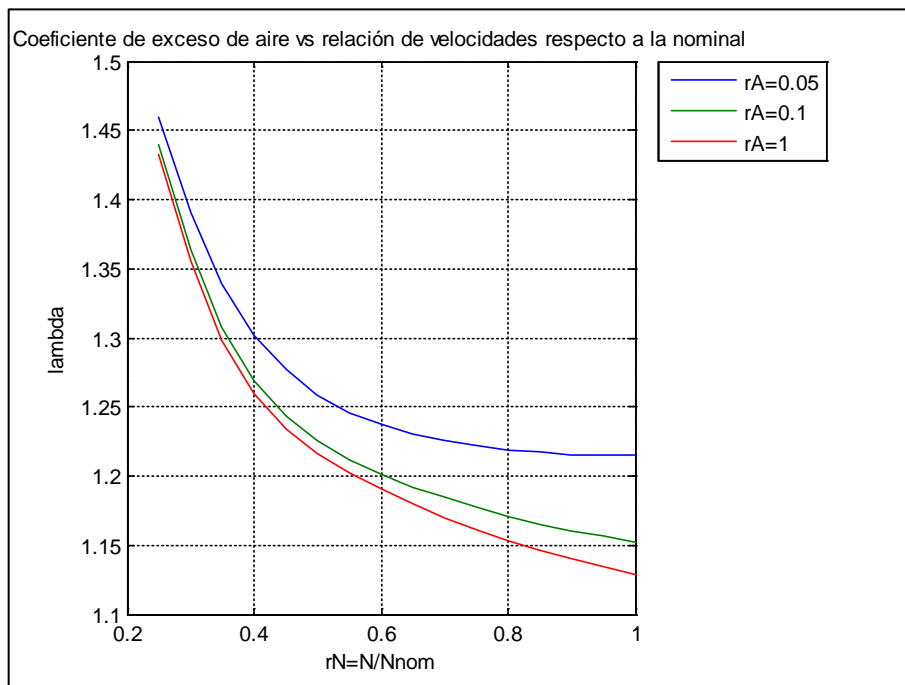
PARAMETRO*	RESULTADO	UNIDADES
Coefficiente de exceso de aire ( $\lambda$ )	1,13	
Diámetro interior del surtidor ( $d_3$ )	16,1	mm
Diámetro interior de la conexión regulador - mezclador ( $d_4$ )	21,4	mm
Levantamiento del obturador ( $h_{v3}$ )	1,3	mm
Diámetro de los agujeros del mezclador ( $d_{ag}$ )	3,2	mm
Número máximo de agujeros del mezclador ( $N_{max\_aguj}$ )	8	
Número de agujeros del mezclador ( $N_{ag}$ )	6	
Presión interna del regulador ( $p_{3r}$ )	101	kPa
Potencia del grupo con biogás ( $Ne$ )	2,03	kW
Potencia nominal del grupo con gasolina ( $Ne\_nom\_gasol$ )	2,51	kW
Relación de la potencia nominal con gasolina a la potencia del grupo con biogás ( $Ne\_Ne\_nom\_gasol$ )	0,81	
Caudal de combustible de consumo ( $Q_{comb}$ )	2,01	m <sup>3</sup> /h
Consumo específico ( $ge$ )	0,99	m <sup>3</sup> /kW-h
Número de Reynolds del biogás en la sección de la tubería de entrada al regulador ( $Re$ )	186000	
Velocidad de alimentación del biogás en la sección de la tubería de entrada al regulador ( $V$ )	2,7	m/s
Coefficiente de descarga del mezclador ( $C_{dh}$ )	0,93	
Longitud del mezclador ( $L_m$ )	50,4	mm
Longitud de la parte cilíndrica del mezclador ( $L_{p0}$ )	15,3	mm
Angulo de la parte convergente del mezclador ( $\alpha_1$ )	54,3	
Angulo de la parte divergente del mezclador ( $\alpha_2$ )	14,6	

\* Simbología de acuerdo a resultados del programa (Anexo C).

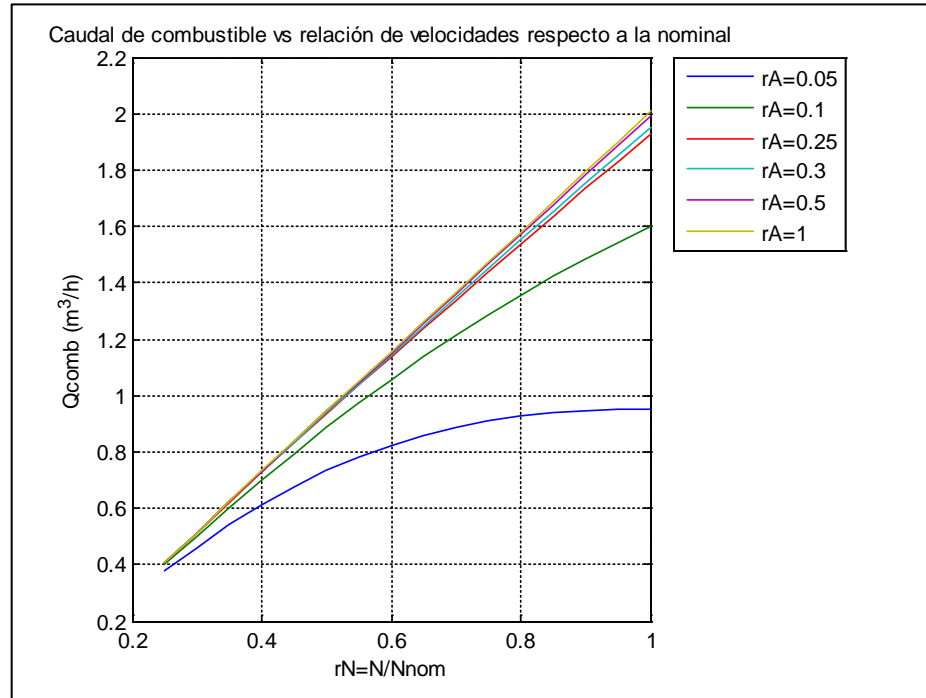
Una vez obtenidos los datos de la tabla 4.6, el programa comienza a evaluar los mismos datos anteriores pero para distintos ángulos de apertura de la mariposa del carburador a gasolina y a distintas velocidades del motor. Dichos resultados son los siguientes:



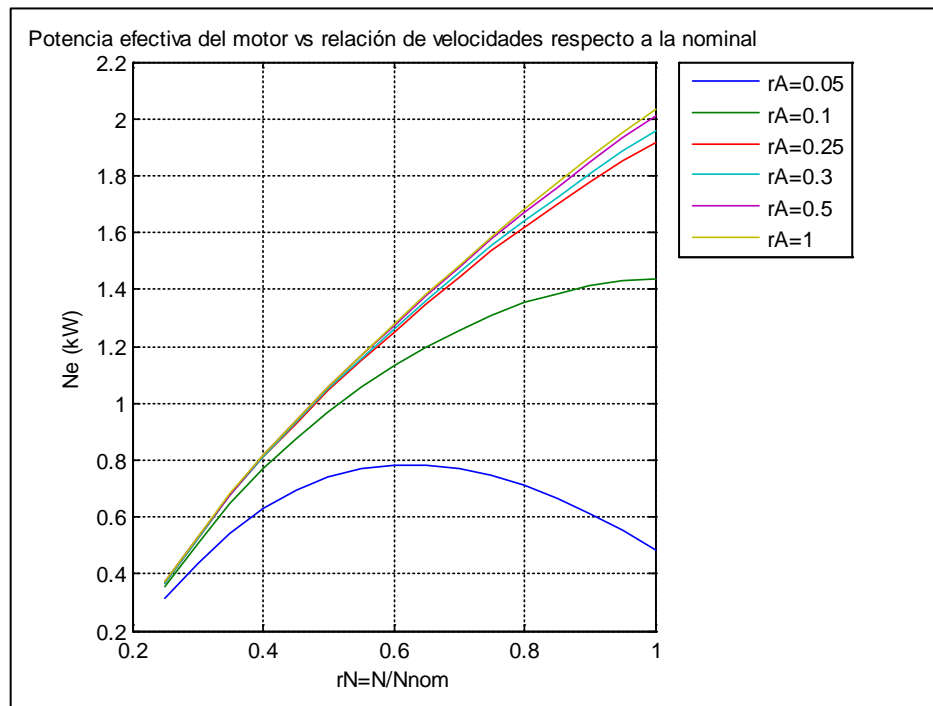
**Figura 4.16** Eficiencia volumétrica en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



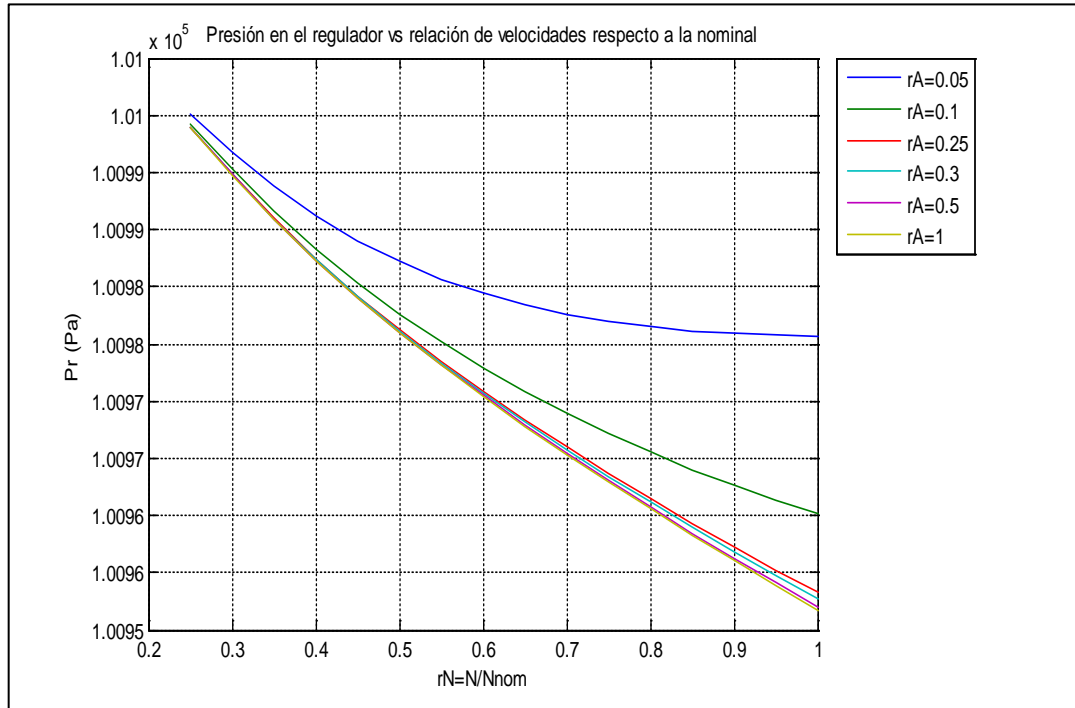
**Figura 4.17** Coeficiente de exceso de aire en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



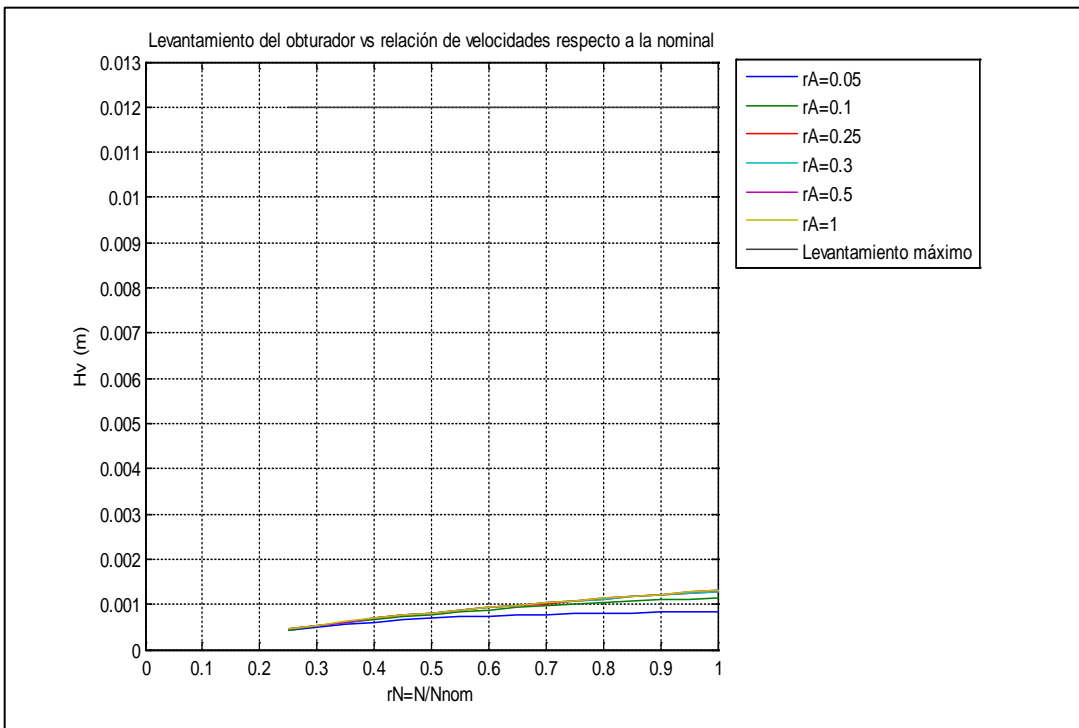
**Figura 4.18** Caudal de combustible en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



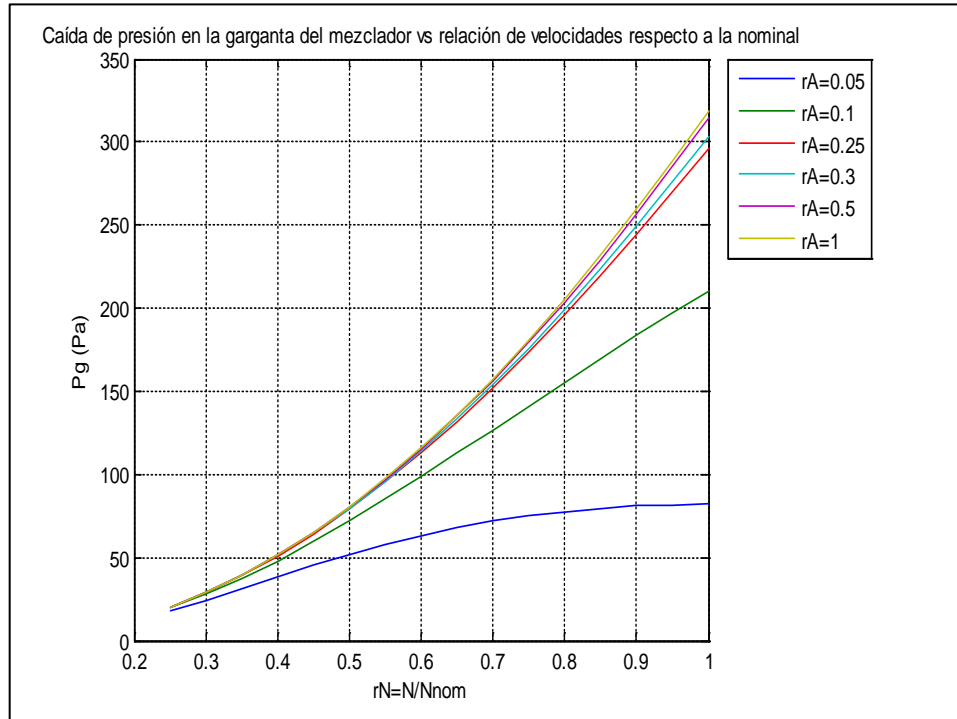
**Figura 4.19** Potencia efectiva del motor en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



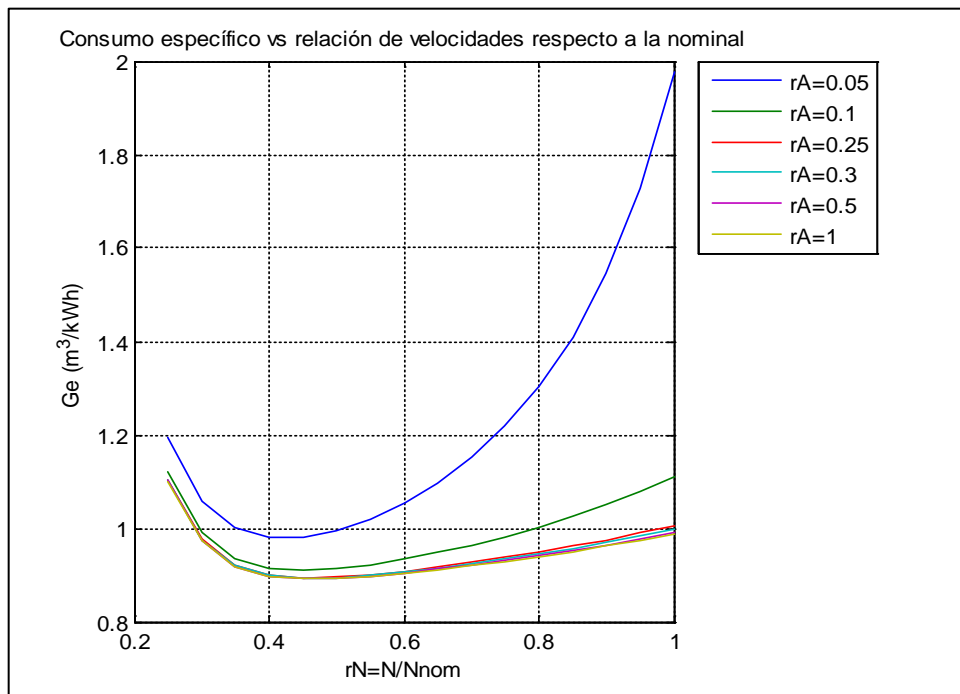
**Figura 4.20** Presión en el regulador en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



**Figura 4.21** Levantamiento del obturador en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.

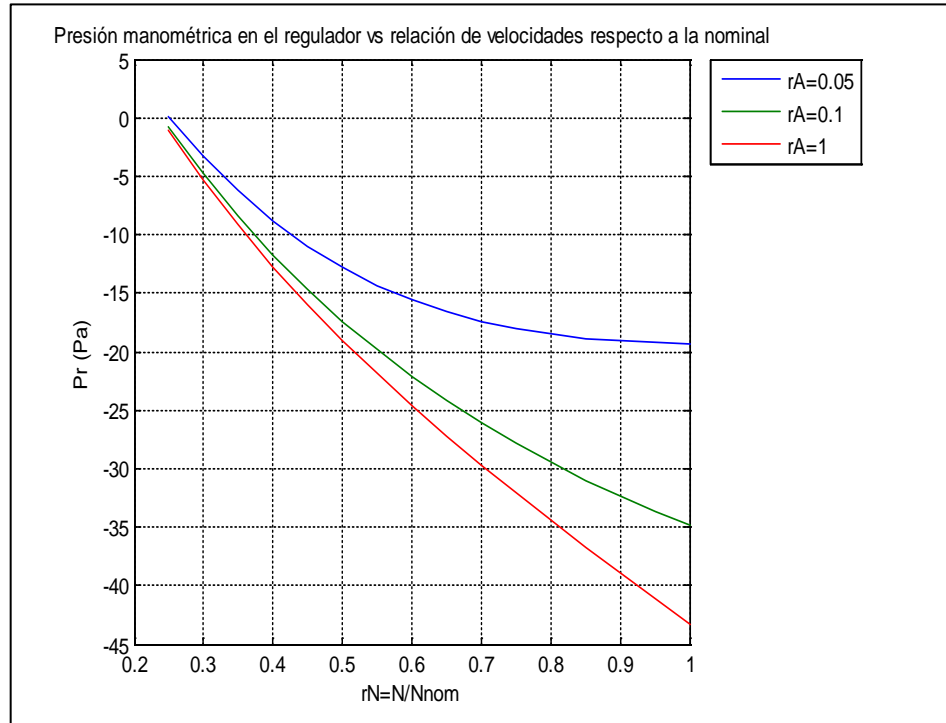


**Figura 4.22** Caída de presión en la garganta del mezclador en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.

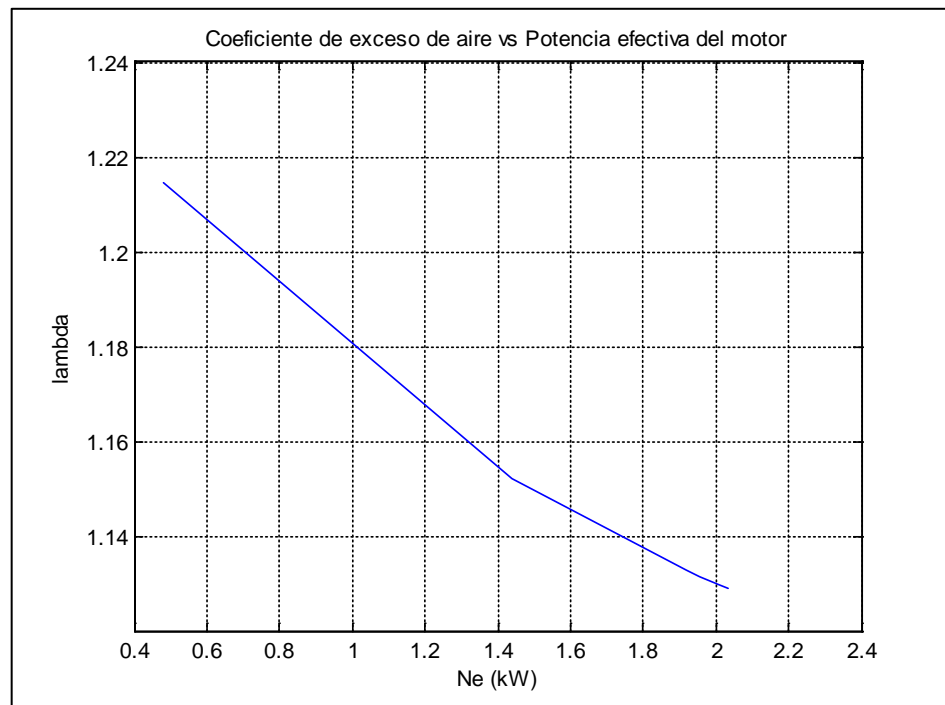


**Figura 4.23** Consumo específico de combustible en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.

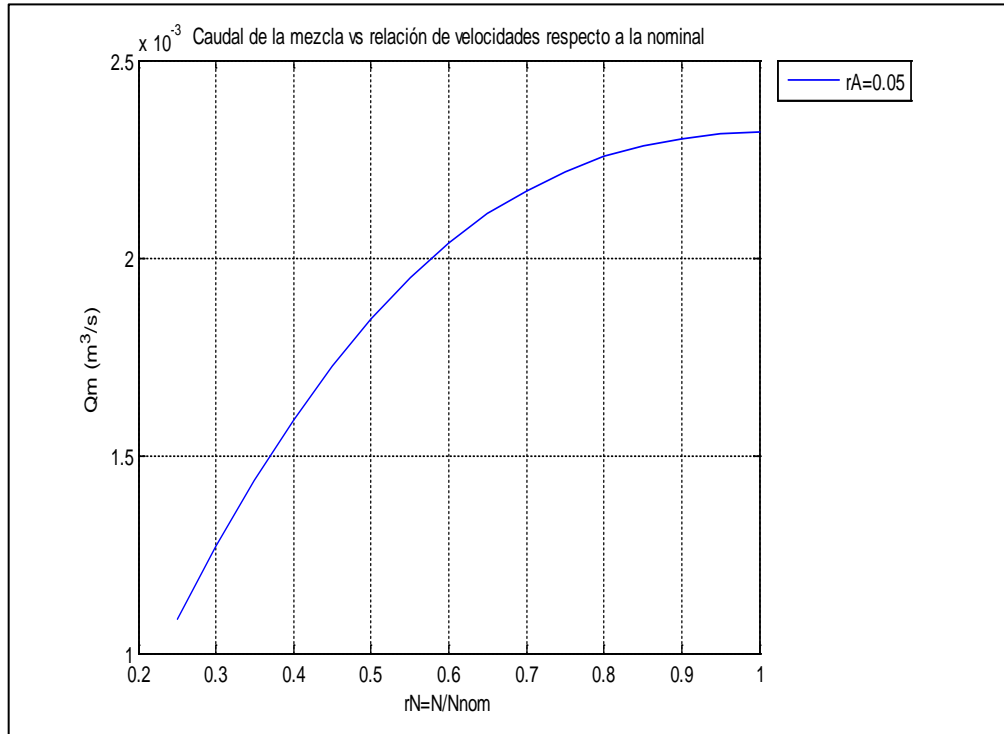




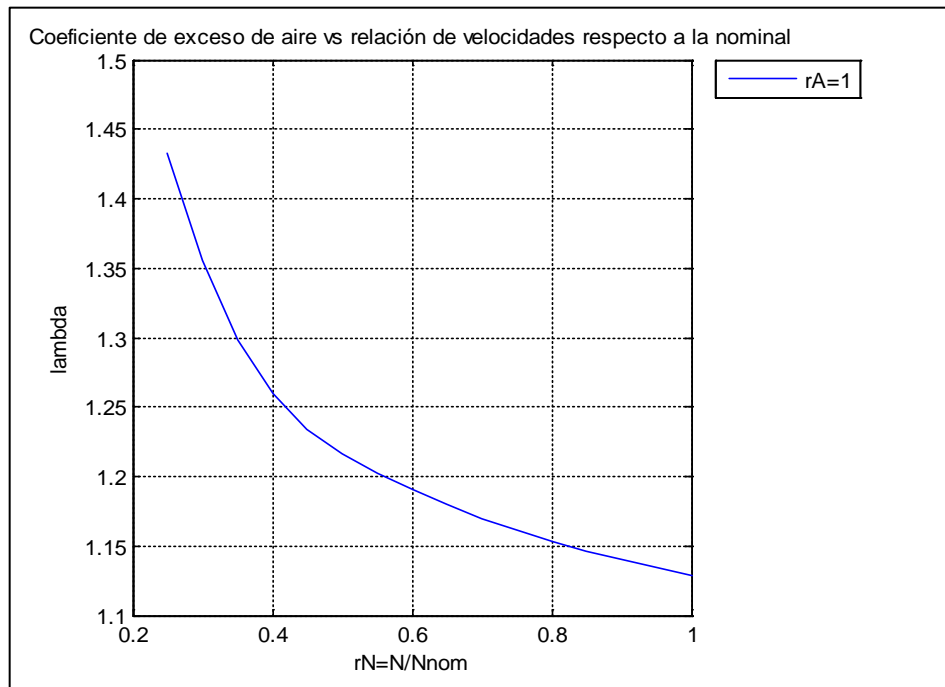
**Figura 4.24** Presión manométrica en el regulador en función de la velocidad del motor para diferentes relaciones de áreas del paso ( $rA$ ) a través de la válvula de mariposa.



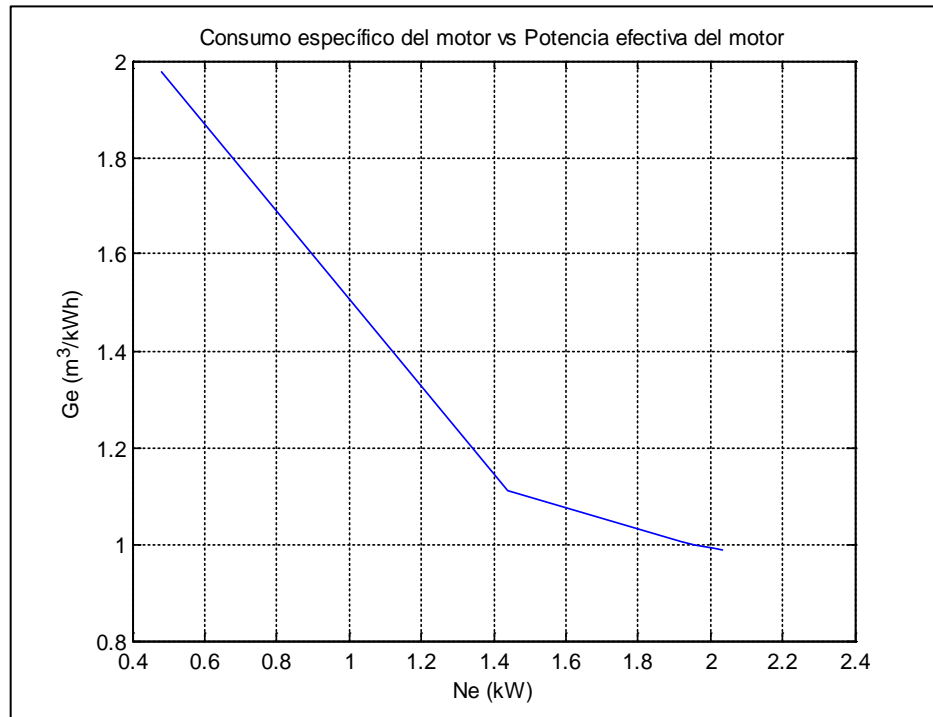
**Figura 4.25** Coeficiente de exceso de aire en función de la Potencia efectiva del motor a la velocidad nominal.



**Figura 4.26** Caudal de la mezcla aire – biogás en función de la velocidad del motor para la mínima apertura de la válvula de mariposa.



**Figura 4.27** Coeficiente de exceso de aire en función de la velocidad del motor para la máxima apertura de la válvula de mariposa.



**Figura 4.28** Consumo específico de biogás en función de la Potencia efectiva del motor.

### Notas importantes:

- Las gráficas en función de la velocidad del motor son netamente teóricas. el motor del grupo electrógeno solamente funciona a la velocidad nominal, es decir,  $N_{nom} = 3600 \text{ rpm}$ . Por ello únicamente se toman en cuenta los puntos de intersección de todas las gráficas a diferente  $r_A$  con la recta  $r_N = \frac{n}{n_{nom}} = 1$  para compararlos con los resultados experimentales.
- Las gráficas en función de  $N_e$  están, en realidad, en función de la potencia efectiva del grupo electrógeno. Para ello se tuvo que multiplicar la eficiencia de generación eléctrica al factor de corrección por pérdidas en la combustión  $f_{pc}$ .
- Obsérvese la similitud entre la figura 4.9 y la figura 4.16. Ello muestra la buena correspondencia que existe entre los resultados del modelo matemático con las gráficas de Orlin [Ref. 22].
- A bajas velocidades, el coeficiente de exceso de aire alcanza altos valores (alrededor de 1,4), ello se debe a la menor succión del motor y a la acción de los

resortes que normalmente tienden a cerrar el obturador, disminuyendo el flujo másico de biogás y empobreciendo la mezcla aire-biogás.

- Si se podría variar la velocidad de rotación del motor, a bajas velocidad se obtendrían muy bajas potencias (alrededor de 0,4 kW).
- La apertura del obturador siempre es menor que la apertura máxima determinada por factores de construcción del regulador. El levantamiento del obturador según la modelación matemática es alrededor de 1 mm, valor muy por debajo de los 12 mm de apertura máxima (figura 4.21).
- El consumo específico de combustible del grupo sería menor a  $1 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$  si el motor trabajara a bajas velocidades. Sin embargo, a velocidades cercanas a la nominal, la tendencia es muy cercana a dicho valor. Si la velocidad de rotación del motor fuera muy baja, el consumo específico sería mayor a  $1 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$  tal como se muestra en la gráfica 4.23.
- El coeficiente de exceso de aire decrece casi linealmente en función de la potencia. También es decreciente en función de la velocidad de rotación del motor, pero el incremento del coeficiente de exceso de aire a bajas velocidades es mayor que a bajas cargas.
- La figura 4.28 muestra la disminución del consumo específico de biogás a medida que incrementa la carga eléctrica del grupo electrógeno. Para bajas cargas, el consumo específico de combustible presenta valores altos de consumo, hecho que resalta la importancia de evitar que el grupo electrógeno funcione a bajas cargas durante tiempos prolongados.
- Según los resultados del programa, la potencia del motor con biogás es el 80% de la potencia del motor con gasolina a régimen nominal.
- El modelo matemático y el programa desarrollado, permiten también un análisis de sensibilidad del sistema, porque nos ayuda a identificar los parámetros de las componentes que más influyen en el funcionamiento del motor.

## CAPÍTULO V

### **CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA REGULADOR-DOSIFICADOR Y MEZCLADOR DE BIOGÁS**

#### **5.1 Dimensionado del regulador-dosificador:**

El diseño del regulador-dosificador de biogás debe ser acorde a los materiales y partes disponibles localmente; por ejemplo, el diámetro interior del regulador y el espesor de la pared deben ser tales que el diafragma de acrílico nitrilo, el cual está disponible en nuestro medio, pueda quedar fijo por medio de pernos allen que lo mantenga entre la pared del regulador y la tapa superior. Otro aspecto importante es la eventual fabricación de este diafragma, lo cual, en principio, es posible realizarla en el país, pero no es tan sencillo debido al material especial del que está hecho. Es por este motivo que es preferible adquirirlo localmente. Estos diafragmas se importan en diferentes marcas y modelos estándares. Todos los demás componentes se diseñaron y fabricaron en función a este elemento.

De lo anterior se deducen dos premisas importantes que el regulador debe cumplir:

1. Que tenga el menor costo posible, para una producción en serie.
2. Que las características y dimensiones de los accesorios sean estándar, para facilitar la intercambiabilidad de los repuestos.

El diámetro de diafragma, preferentemente, debe ser del menor tamaño posible por razones de economicidad y ligereza del componente. Sin embargo, su dimensión no debe limitar la predisposición de los elementos internos ni su función; por ejemplo, la dificultad de seleccionar un diámetro pequeño del diafragma resultará en una menor fuerza de

accionamiento que levante el obturador del balancín, corriendo el riesgo de que el biogás no pase a través del regulador, aparte de la necesidad de preparar el ingreso de biogás con un diámetro más pequeño.

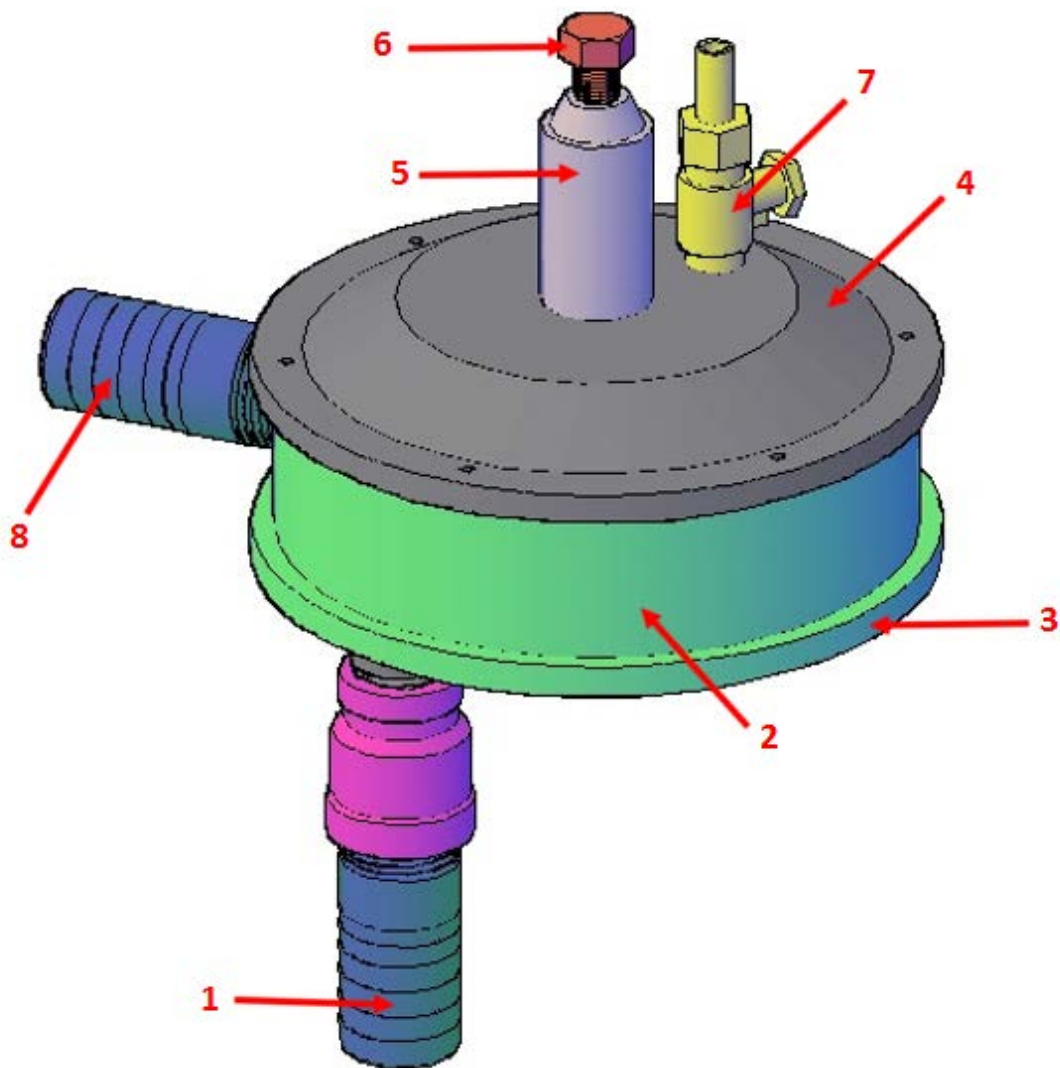
Se evaluó la disponibilidad en el mercado de componentes de kits de conversión de vehículos a GLP y GNV, resultando la conveniencia de seleccionar el diafragma modelo "Lovato RGE92" de 140 mm de diámetro en la marca italiana MEMTEX, una de las más comerciales de nuestro mercado.

Para facilitar la construcción de la pared circular del regulador, se eligió un tubo de acero comercial de 5" de diámetro cédula 40, de tal manera que el diafragma pueda ser fijado mediante pernos allen de 1/8" en la pared circular del tubo. De ahí la importancia de elegir los pernos de un tamaño adecuado que no rebasen el espacio disponible en el espesor del tubo. Obviamente las tapas superior e inferior deben ser de igual tamaño para sellar el regulador. Los brazos de palanca de los resortes, diafragma y obturador tienen que estar en proporción al diámetro interior del tubo elegido, así como también al diámetro de ingreso de alimentación de biogás. La longitud del tubo debe ser suficiente para que el centro del diafragma en el interior del regulador pueda desplazarse libremente (axialmente) desde el cierre del obturador hasta la apertura máxima del obturador. Esta longitud predeterminada del tubo, permitirá también el acoplamiento directo de un conector espiga para la salida del regulador. La longitud del resorte de mínima carga, ubicado entre el balancín y la base del regulador, debe acomodarse al espacio predeterminado, ya que esta longitud no influye en la constante de rigidez según la ecuación 4.1; sin embargo, el número de espiras del resorte debe corresponder al establecido en el programa. El diámetro del alambre para la fabricación del resorte se eligió de 0,8 mm por ser el menor diámetro de fabricación disponible, hecho que facilita su compresión a bajas presiones como en este caso. La longitud del resorte de máxima carga, cuya compresión se ajusta con el tornillo hexagonal que se muestra en los planos, tampoco es predeterminado y puede elegirse una longitud razonable en función del espacio. La espiga de ingreso de biogás al regulador debe ser del tamaño de la manguera de biogás que sale del biodigestor; todas las espigas se eligieron de 1" para este caso. Por último, la salida del biogás está directamente frente a la salida del tubo surtidor por donde ingresa el biogás al regulador; cabe mencionar que la ubicación de la salida no influye en el flujo de biogás.

## **5.2 Procedimiento de fabricación:**

Una vez seleccionado el diafragma, se adquirió un tubo de acero comercial de 5" de diámetro, cédula 40, cuyo espesor nos permitía el maquinado de agujeros roscados con el fin de ensamblar las tapas superior e inferior y el diafragma al tubo con un nivel de hermeticidad aceptable tal como ya se mencionó en el apartado anterior.

Para la construcción de las tapas superior e inferior, se seleccionaron discos de acero comercial de 6" de diámetro y una pulgada de espesor en el caso de la tapa superior y de media pulgada para la tapa inferior. Con estos materiales principales adquiridos, conociendo los criterios de diseño del apartado anterior y de los resultados del programa de simulación desarrollado en el capítulo anterior, se procedió a dibujar los planos de construcción en programas CAD que nos permitieron visualizar la distribución preliminar de los componentes internos, así como el desplazamiento vertical del centro del diafragma unido con el balancín y de los resortes de regulación.



**Figura 5.1** Diseño del regulador mostrando la distribución de los componentes: 1. Tubería de ingreso de biogás, 2. Cuerpo central del regulador, 3. Tapa inferior, 4. Tapa superior, 5. Soporte del perno de regulación del resorte de máxima carga, 6. Perno de regulación del resorte de máxima carga, 7. Válvula de respiradero, 8. Tubería de salida de biogás.

Una vez compatibilizada la distribución de los componentes en el espacio disponible, se procedió a la construcción del regulador mediante un proceso de maquinado de piezas, bajo la supervisión de los autores de la presente tesis, identificando dificultades de montaje, que posteriormente se resolvieron con ayuda del diseño CAD y la pericia del maestro encargado del proceso de maquinado.



**Figura 5.2** Construcción del cuerpo cilíndrico y la tapa inferior del regulador.

El primer elemento a maquinar, fue el cilindro de acero a partir de la tubería de 5 pulgadas de diámetro, cédula 40. La altura de este cilindro se determinó en función del desplazamiento del diafragma con el balancín. Posteriormente, se refrentaron ambas superficies circunferenciales y paralelas, para que permitan un buen acoplamiento con los sellos y las tapas. Se perforaron 8 agujeros en cada una de las superficies con rosca de 1/8" de diámetro, que servirán para ajustar las tapas mediante pernos allen de grado 10.

La tapa inferior se obtuvo mediante un proceso de maquinado a partir de un disco de acero de 6" de diámetro, refrentando ambas superficies y realizando una ligera pestaña circunferencial para el mejor centrado y hermeticidad en el ensamblaje con el cuerpo cilíndrico. En esta tapa se perforó un agujero roscado para alojar la conexión de ingreso de biogás. Se preparó también en la superficie interna de esta tapa, un alojamiento roscado de poca profundidad para colocar la columna de apoyo pivotante del balancín. Se aseguró al cuerpo cilíndrico realizándole 8 agujeros pasantes, donde se ubican los pernos allen.





**Figura 5.3** Construcción de la tapa superior del regulador de biogás.

La tapa superior se hermetizó, también, mediante una pestaña circunferencial además de asegurar un buen centrado con el cuerpo cilíndrico. Internamente, esta tapa tiene forma cónica para permitir el desplazamiento vertical del diafragma, debido a la compresión del resorte de mínima carga. Dicho resorte actúa en un punto determinado del balancín, haciendo que el extremo junto al pivote mantenga cerrado el obturador, impidiendo de esta manera el ingreso de biogás al regulador cuando el motor no está en funcionamiento.

En el centro de la tapa superior se preparó un alojamiento para el resorte regulador de máxima carga, que fue construido a partir de una barra cilíndrica de fierro de una pulgada de diámetro. En el extremo inferior de la barra se realizó una rosca para unirla con la tapa. En el extremo superior de este alojamiento se preparó un agujero roscado con la finalidad de introducir un perno hexagonal M10 de 3/8", cuya función es regular la compresión inicial del resorte de máxima carga.

En la tapa superior se colocó una pequeña válvula de bola de 1/4 de pulgada mediante un agujero roscado ubicado a 3 cm del centro. Esta válvula cumple la función de respiradero, ya que la parte superior del diafragma necesita estar sometida a la presión atmosférica. Se ha comprobado, en experiencias anteriores, que esta área de acceso del aire atmosférico influye notablemente en el funcionamiento del equipo. Por ello, es necesario manipular la apertura de la válvula hasta determinar la posición que permita el óptimo desempeño del motor; ésta posición debe mantenerse fija, pudiendo después retirarse la palanca de regulación de apertura de esta válvula.



**Figura 5.4** Construcción de la entrada y salida de biogás del regulador.

Para el ingreso de biogás se seleccionó un niple roscado de acero inoxidable de 3/4" de diámetro. Este niple fue maquinado en uno de sus extremos para eliminar la rosca hasta una longitud determinada, de manera que, el extremo liso pueda ingresar al interior del regulador hasta llegar a la rosca sobrante que se acopla con el agujero roscado realizado previamente en la tapa inferior para el ingreso de biogás.

Este niple se unió en su extremo no maquinado a una espiga roscada de acero inoxidable de una pulgada de diámetro mediante un reductor tipo campana, también de acero inoxidable. Esto se realizó con la finalidad de conectar el reductor directamente a la manguera de salida de biogás, de la planta de biodigestión ubicada en el Hipódromo de Monterrico, que esta estandarizado en una pulgada de diámetro.

Con el criterio anterior, se seleccionó la misma espiga para la salida del biogás del reductor hacia el mezclador. Esta espiga se fija en el cuerpo cilíndrico mediante un agujero roscado preparado previamente.

El elemento que sirve de pivote al balancín se construyó a partir de una barra cilíndrica de acero inoxidable, el cual fue perforado en uno de sus extremos para que pueda conectarse con el balancín por medio de un pasador. En su otro extremo se preparó una rosca macho para fijarlo en el agujero de poca profundidad preparado en la superficie interna de la tapa inferior. Dicho agujero roscado debe tener una distancia determinada entre centros con el agujero de ingreso de biogás, una vez que se determine el brazo de palanca del obturador (distancia "a" de la figura 3.4).

El balancín fue construido a partir de una platina de acero inoxidable, mediante procesos de corte y perforación en prensa mecánica, dándole la forma de “z”. En uno de los extremos del balancín se preparó un uña ranurada tipo ojo chino, de manera que este se conecte con el pin del diafragma y este pin pueda desplazarse a lo largo de la ranura en la medida que el diafragma suba o baje durante su funcionamiento. En su otro extremo se preparó un agujero que conecte con el pin del obturador. En el punto pivotante del balancín se preparó unas orejas que se doblaron perpendicularmente, y que cuidadosamente fueron agujereadas para permitir el ingreso del pasador que lo conecta con la columna del pivote. En otro punto se preparó un agujero para que ingrese el pin del elemento cilíndrico que fija la acción del resorte de mínima carga en el balancín.

Los resortes de mínima y de máxima, se mandaron a preparar en tiendas dedicadas a la fabricación de los mismos. Los datos que los fabricantes necesitan son el diámetro del resorte, el diámetro de alambre, material del resorte, número de espiras activas y la longitud total. El mínimo diámetro de alambre para fabricación es de 0,8 mm, diámetro que se eligió para que la regulación no sea muy rígida. Los demás datos se determinaron en el programa según la ecuación 4.1. El resorte de mínima carga se fijó a la tapa inferior del regulador a través de un agujero del diámetro del resorte, de poca profundidad para que este asiente; dicho resorte se fijó al balancín a través de un pin cilíndrico de nylon, de manera que el resorte no pueda desplazarse lateralmente al empujar el balancín. El resorte de máxima carga se fijó al centro del diafragma a través de un anillo cilíndrico de diámetro interior igual al diámetro del resorte, dicho anillo fue pegado con silicona al diafragma asegurando la acción directa en dirección vertical del resorte.

La tapa del obturador fue fabricada de nylon. En un regulador original de GLP, el obturador es de jebe, asegurando el buen cierre de biogás cuando este se asiente en el tubito surtidor. El obturador debe ser liviano y asegurar la hermeticidad del cierre del tubito surtidor. Debido a ello se eligió este material, ya que el jebe de cualquier tipo debe mandarse a fabricar según las medidas que se necesiten; hecho que encarece esta componente. La hermeticidad del cierre del obturador es de suma importancia, ya que la succión del motor al descender el pistón es la que genera el vacío en el regulador que hace descender el diafragma. Para probar el obturador se inyectó aire a través del tubito surtidor cerrado, inspeccionando que dicho aire no pase a través de la tapa.

Cuando se realizó el sellado del regulador con la tapa inferior mediante pernos allen, se utilizó una empaquetadura de jebe en forma de anillo circular del tamaño de la sección del tubo utilizado como pared del regulador. Esto con la finalidad de asegurar la hermeticidad en la base del regulador, ya que la parte superior es asegurado con el diafragma. Posteriormente se le realizaron agujeros para el pase de los pernos allen en el momento del ensamble de los componentes.

### 5.3 Costos de fabricación:

A continuación se muestra un resumen los costos realizados en la fabricación de cada componente del regulador-dosificador de biogás, según la tabla 5.1:

**Tabla 5.1** Resumen de costos en la fabricación del regulador de biogás.

<b>Relación de elementos y costos del regulador de biogás</b>				
<b>Item</b>	<b>Componente</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
1	Diafragma de acrílico nitrilo	S/. 150,00	1	S/. 150,00
2	Retazo de tubería de acero de 5", céd. 40	S/. 20,00	1	S/. 20,00
3	Discos de acero comercial de 6"	S/. 7,50	2	S/. 15,00
4	Pernos allen 1/8" grado 10	S/. 0,20	30	S/. 6,00
5	Espiga roscada de 1" de acero inoxidable	S/. 12,00	2	S/. 24,00
6	Niple 3/4" de acero inoxidable	S/. 4,00	1	S/. 4,00
7	Reductor tipo campana de 1" a 3/4"	S/. 5,00	1	S/. 5,00
8	Resorte de regulación de acero inoxidable	S/. 3,50	2	S/. 7,00
9	Válvula de bola de 1/4"	S/. 15,00	1	S/. 15,00
10	Empaquetaduras de sellado con las tapas	S/. 15,00	2	S/. 30,00
11	Obturador y cilindros fijadores de resortes de nylon	S/. 2,00	4	S/. 8,00
12	Plancha pequeña de acero para fabricar el balancín	S/. 5,00	1	S/. 5,00
13	Mano de obra del maquinado de piezas	S/. 150,00	-	S/. 150,00
			<b>Total</b>	<b>S/. 439,00</b>

La persona encargada del maquinado realizó la fabricación y ensamble de todas estas componentes en un tiempo de 5 días, trabajando un aproximado de 2 horas diarias, lo que hacen un total de 10 horas de maquinado. Ello resultaría en un costo promedio de 15 soles por hora de mano de obra.

#### **5.4 Dimensionado del mezclador:**

Las medidas principales del mezclador son dependientes del carburador original de gasolina del motor.

El housing o carcasa del mezclador (ver figura 3.7) debe tener el diámetro interno del mismo tamaño que la cavidad interna del carburador de gasolina, por donde ingresaba el aire para mezclarse con la gasolina. Además, el housing debe tener también un diámetro externo igual al diámetro externo del carburador para facilitar su conexión en serie por medio de espárragos de acero inoxidable. Originalmente el carburador del grupo está directamente unido al motor y al filtro de aire mediante espárragos de Acero. Ahora que se adiciona el mezclador, el housing debe tener agujeros del tamaño de estos espárragos ubicados a cada lado. Dichos espárragos ahora deben comprarse de un material más resistente debido al peso adicional y a la vibración del motor del grupo eléctrico; además, deben ser más largos para que puedan conectar en serie el filtro de aire, el mezclador y el carburador al motor, en ese orden. El housing debe tener un diámetro interior un tanto mayor durante un primer tramo de su longitud para que pueda albergar a la tobera del mezclador, de manera que la tobera quede limitada por el tope del cambio de diámetro. Para limitar el desplazamiento de la tobera por el otro extremo, debe realizarse una rosca tipo hembra, de manera que un anillo roscado pueda fijar a la tobera dentro del housing evitando su desplazamiento axial. Finalmente, se debe realizar otro agujero roscado tipo hembra en la superficie del housing, con el fin de conectarse con la espiga de 1" y esta a su vez con la manguera de salida del regulador-dosificador de biogás.

La tobera debe tener forma aerodinámica con el fin de minimizar las pérdidas hidráulicas. Su diámetro externo debe permitirle ingresar dentro del housing. Las demás medidas son resultado de la simulación numérica realizada con el programa desarrollado en el anterior capítulo.

#### **5.5 Procedimiento de fabricación:**

El housing se confeccionó a partir de una barra cilíndrica de aluminio del diámetro más cercano posible al diámetro exterior del carburador de gasolina; se eligió dicho material debido a su ligereza y facilidad de maquinado. Primeramente se tuvo que reducir el diámetro exterior a 58 mm en el torno; luego se le paso una primera broca al centro del tubo de 23 mm de diámetro (diámetro interior del regulador de gasolina) y después, una segunda broca de 1" hasta el 70% de su longitud total, de manera que la tobera pueda ingresar con normalidad hasta el tope del cambio de diámetros. A la longitud restante, luego de ingresada la tobera, se le realizó un roscado tipo hembra para que un anillo

circular de 1" de diámetro exterior y de 22,5 mm de diámetro interior pueda fijar la tobera axialmente. Se le realizaron dos agujeros de 1/4" a lo largo de toda su longitud a una distancia de 21 mm del centro, con el fin de pasar los espárragos de acero inoxidable que sirven de sujeción. A la altura de los agujeros de la tobera, que, en este caso, está a 20 mm del extremo por donde se enrosca el anillo circular, se realizó un agujero roscado desde la superficie hasta la cavidad interna del housing, con la finalidad de introducir la espiga de acero inoxidable de 1". Dicha espiga se conecta con la manguera flexible a la salida del reductor.



**Figura 5.5** Componentes fabricados del mezclador de biogás: **1.** Espiga de 1", **2.** Housing o carcasa del mezclador, **3.** Tobera, **4.** Anillo fijador.

La tobera se fabricó a partir de una barra de bronce de 1" de diámetro cortada a 50 mm, longitud indicada en el programa. Se desbastó la superficie, para obtener una forma cilíndrica lisa que pueda entrar en el housing. Se perforó con una broca de 1/4" de diámetro. Para conseguir el perfil parabólico tal como muestra la figura 3.5, se colocó la cuchilla del torno en un ángulo de convergencia respecto al eje de la tobera. Se realizó una reducción del diámetro exterior en una región de la tobera, con el fin de que el biogás que ingresa por la espiga se distribuya alrededor de esta zona. En dicha región se realizaron los 6 agujeros de 3,2 mm a la tobera con una inclinación de 15°, a la altura de la garganta tal como se calculó en el programa, para facilitar la mezcla del biogás con el aire a su entrada por estos agujeros.

El anillo circular se fabricó a partir de la misma barra de bronce, haciéndole un roscado exterior y dándole los diámetros exteriores e interiores que este requería para limitar el desplazamiento axial de la tobera a lo largo del housing.

## 5.6 Costos de Fabricación:

Los costos de fabricación del mezclador se resumen en la tabla 5.2:

**Tabla 5.2** Resumen de costos en la fabricación del mezclador de biogás.

<b>Relación de elementos y costos del mezclador de biogás</b>				
<b>Item</b>	<b>Componente</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
1	Barra circular de aluminio de 60 mm de diámetro	S/. 12,00	1	S/. 12,00
2	Barra de bronce de 1" de diámetro	S/. 18,00	1	S/. 18,00
3	Espiga roscada de 1" de acero inoxidable	S/. 12,00	1	S/. 12,00
4	Mano de obra del maquinado de piezas	S/. 90,00	-	S/. 90,00
<b>Total</b>				<b>S/. 132,00</b>

La misma persona encargada del maquinado del regulador realizó la fabricación del mezclador, trabajando durante 6 horas en un solo día. Ello nos resulta en un costo promedio de mano de obra de 15 soles por hora, el mismo resultado que la fabricación del regulador.

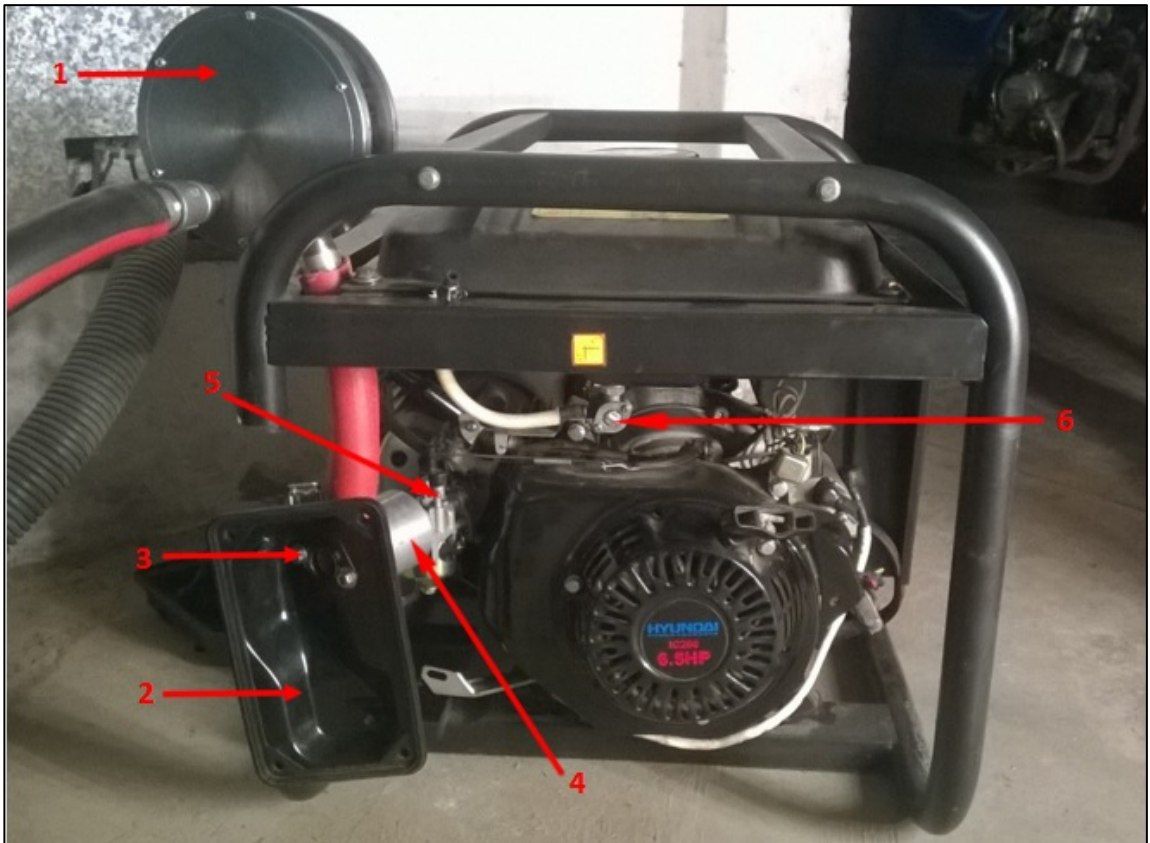
## 5.7 Ensamble de los componentes:

Es importante mencionar aquí que con el presente trabajo de investigación se logró dar un paso más a las exitosas experiencias anteriores, donde se modificaban reguladores originales de kits de conversión de GLP automotriz, utilizándose sólo la última etapa de regulación. De hecho, esto nos sirvió mucho para este diseño y proceso de construcción, la experiencia adquirida en la adaptación de reguladores originales fue nuestro principal punto referencial y comparativo, tanto en la construcción como en el funcionamiento en sí del nuevo regulador, validándose de alguna manera nuestro diseño. Ahora ya podemos contar con un diseño propio, cuya sencillez constructiva y probada funcionalidad, permitirá un mayor desarrollo de las aplicaciones energéticas del biogás en nuestro país.

Se debe resaltar también, que el regulador fabricado en esta investigación, no es más que un prototipo experimental. Si se quisiera implementar esta tecnología en las zonas remotas del país sin electrificación, lo idóneo sería la fabricación en serie de estas componentes, lo cual abarataría mucho más los costos de fabricación. Además, tanto el regulador-dosificador como el mezclador de biogás podrían ser fabricados por fundición. Cabe mencionar que la fundición de materiales plásticos como el polietileno o el nylon es una tecnología de común aplicación en nuestro país. Ello mejoraría en gran medida el

proceso de fabricación, ya que no solamente reduciría los costos; sino que nuestros componentes serían más ligeros y de fácil transporte.

Para asegurar que no exista fuga durante el paso del aire desde el filtro hasta llegar al motor una vez mezclado con el biogás, se utilizaron empaquetaduras entre uniones del mezclador de biogás, el carburador de gasolina y el filtro de aire. Dichas empaquetaduras tuvieron que mandarse a fabricar a medida del carburador, utilizándose también pernos que restringían el movimiento de cualquiera de las componentes a lo largo de los espárragos tal como se muestra en la figura 5.6. El paso de biogás desde el regulador hasta el mezclador se realizó por medio de una manguera flexible de 1" de diámetro, conectada entre las espigas, ello con el fin de absorber las vibraciones del motor, ya que una conexión metálica rígida podría afectar el funcionamiento normal de estas componentes debido a dicho efecto. El regulador fue fijado al bastidor del grupo electrógeno por medio de cintillos.



**Figura 5.6** Ensamble de las componentes fabricadas al motor. **1.** Regulador-dosificador de biogás, **2.** Tapadera del filtro de aire, **3.** Pernos de restricción, **4.** Mezclador de biogás, **5.** Carburador de gasolina, **6.** Válvula de ingreso de gasolina al motor.



Los costos del ensamble del regulador-dosificador y mezclador de biogás al grupo electrógeno son resumidos en la tabla 5.3:

**Tabla 5.3** Resumen de costos del ensamble de los componentes al grupo electrógeno.

<b>Relación de costos del ensamble de las componentes</b>				
<b>Item</b>	<b>Componente</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
1	Grupo electrógeno HY3100 LE	S/. 2.400,00	1	S/. 2.400,00
2	Regulador-dosificador de biogás	S/. 439,00	1	S/. 439,00
3	Mezclador de biogás	S/. 132,00	1	S/. 132,00
4	Manguera flexible de 1"	S/. 15,00	1	S/. 15,00
5	Cintillos eléctricos	S/. 1,00	1	S/. 1,00
6	Empaquetaduras	S/. 2,00	2	S/. 4,00
7	2 m de espárrago de acero inoxidable de 1/4"	S/. 5,00	1	S/. 5,00
			<b>Total</b>	<b>S/. 2.996,00</b>

## CAPÍTULO VI

### ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 6.1 Características del banco de pruebas:

El banco de pruebas está compuesto por un grupo electrógeno marca Hyundai, modelo HY3100 LE, un panel de 40 focos incandescentes de 100 W cada uno, donde la carga varía a medida que se encienden o apagan los focos de 1 en 1, un flujómetro analógico para la medida del flujo de biogás que ingresa al motor, y por último un analizador de gases marca Pierburg Instruments Hermann. El biogás se obtuvo de la planta generadora de biogás ubicado en el Hipódromo de Monterrico.



**Figura 6.1** Banco de pruebas. **1.** Flujómetro analógico, **2.** Batería de encendido, **3.** Grupo electrógeno modificado, **4.** Analizador de los gases de escape.

**Grupo electrógeno marca Hyundai, modelo HY3100 LE:**

El grupo electrógeno es del tipo monocilíndrico de 4 tiempos refrigerado por aire. Puede ser arrancado en forma manual a través de una cuerda de rebobinado inmediato, o de forma automática a través de una bujía eléctrica de encendido por llave. Posee una autonomía de 8 horas de funcionamiento a la potencia nominal. Tiene incorporado un panel digital donde se muestran las medidas de voltaje, corriente, potencia y frecuencia de la corriente generada. Existen dos salidas de corriente alterna monofásica a 220 V y una salida de corriente continua de 12 V, ambos protegidos por un fusible. Por último, la regulación de voltaje es del tipo AVR, los datos técnicos del motor están resumidos en la tabla 4.3.

**Sistema de biodigestión del Hipódromo de Monterrico:**

En el hipódromo de Monterrico, se crían alrededor de 2000 ejemplares de caballos de carrera, que diariamente producen 30 toneladas de estiércol aproximadamente. Esta producción se almacenaba a la intemperie por periodos diarios y en ocasiones por más de dos días, hasta que camiones de la municipalidad de Surco se encargaban del recojo y transporte para su posterior uso en viveros municipales.

Este almacenaje provocaba la emanación de olores desagradables y la abundante presencia de moscas, representando molestias tanto para los habitantes y trabajadores del hipódromo, como para los vecinos.

Es así que se buscó solucionar este problema con la construcción de una planta de biogás para procesar, mediante técnicas de biodigestión anaeróbicas, esta producción considerable de estiércol, con la finalidad de producir biogás y fertilizantes.

La planta cuenta con un área aproximada de 1000 m<sup>2</sup> y en una primera etapa, su diseño permitiría el procesamiento de 10 toneladas diarias de estiércol. Cuenta para ello con un silo subterráneo de forma cónica, en el cual los operarios vierten las carretillas de estiércol a través de una reja metálica. En el fondo del silo, está dispuesto un transportador helicoidal, cuyo movimiento permite el desplazamiento del estiércol hacia una faja transportador vertical, que eleva la carga a una altura aproximada de 6 m para nuevamente ser transportada horizontalmente mediante un eje helicoidal, vertiendo el estiércol hacia un tanque ecualizador donde es mezclado con un volumen similar de agua mediante un agitador. Una vez homogenizada la mezcla, se deriva hacia tres biodigestores semicontinuos mediante tres tuberías de 8 pulgadas de diámetro cada una, con sus respectivas válvulas manuales tipo mariposa.

Cada biodigestor tiene una capacidad aproximada de 300 m<sup>3</sup>, construidos con paredes de concreto y cubiertos por membranas elásticas que hermetizan y almacenan preliminarmente el biogás producido, indicando visualmente el nivel de producción.

Una vez identificada la producción de biogás, cuando las membranas se encuentran infladas, el biogás es succionado a través de una tubería de PVC con un soplador de lóbulos y reinyectado en un segundo biodigestor tipo UASB (del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), con la finalidad de aumentar la retención de CO<sub>2</sub> del biogás, en el líquido fertilizante o biol, aumentando la calidad del líquido fertilizante y mejorando la concentración de metano en el biogás, para su mejor aprovechamiento energético.

El biogás reinyectado es recogido del UASB, por medio de tuberías de PVC y derivado hacia una bolsa hermética de 300 m<sup>3</sup> de capacidad para su almacenamiento.

Finalmente, y para la utilización del biogás en los grupos electrógenos instalados, se toma el biogás almacenado en la bolsa, mediante una tubería de PVC de 2 pulgadas de diámetro, pasando previamente por un filtro de ácido sulfhídrico, para reducir la presencia de este ácido contenido en el biogás y evitar efectos dañinos en el interior de los motores.



**Figura 6.2** Planta de generación de biogás del hipódromo de Monterrico. (a) Sistema de transporte del estiércol equino, (b) Biodigestor tipo UASB y bolsa de recepción de biogás.

## 6.2 Instrumentación utilizada:

1. Instrumento para medir el volumen de biogás: Se utilizó un flujómetro analógico.  
Marca: American Meter Company, modelo AL-425.  
Rango: 0 – 12,04  $m^3/h$   
Precisión: 0,01  $m^3$
2. Instrumento para medir la composición de los gases de escape, los hidrocarburos emitidos, el coeficiente de exceso de aire ( $\lambda$ ), y la velocidad angular de giro del motor ( $RPM$ ): Se ha utilizado un Analizador digital de gases.  
Marca: Pierburg Instruments Hermann, modelo MHC 208.  
Rango: CO: 0 – 10% (*vol*); CO<sub>2</sub>: 0 – 20% (*vol*); HC: 0 – 15000 *ppm vol* C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>; O<sub>2</sub>: 0 – 4 % (*vol*);  $\lambda$ : 0,5 – 2; Revoluciones: 0 – 9990 rpm.  
Precisión: CO: 0,01% (*vol*); CO<sub>2</sub>: 0,01% (*vol*); HC: 1 *ppm vol* C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; O<sub>2</sub>: 0,01 % (*vol*);  $\lambda$ : 0,001; revoluciones: 10 rpm.
3. Instrumento para medir el voltaje y la frecuencia: Se ha utilizado el panel digital del grupo electrógeno.  
Marca: Hyundai, modelo HY3100 LE.  
Rango: 80 – 250 V (AC); 10 – 99,9 Hz.  
Precisión: 1 V; 0,1 Hz.
4. Instrumento para medir la intensidad de corriente y la potencia: Se ha utilizado el panel digital del grupo electrógeno.  
Marca: Hyundai, modelo HY3100 LE.  
Rango: 0 – 12 A; 0 – 6 kW.  
Precisión: 0,1 A; 0,1 kW.
5. Instrumento para medir el tiempo: Se utilizó un cronómetro digital.  
Rango: 0 – 10 h.  
Precisión: 0,01 s.
6. Instrumento para medir el ruido: Se utilizó la aplicación de una tablet a modo de decibelímetro.  
Rango: 0 – 140 dB.  
Precisión: 0,1 dB.

### 6.3 Metodología experimental:

#### 6.3.1 De las pruebas experimentales:

Los ensayos han sido realizados en un banco de pruebas montado en el Hipódromo de Monterrico, donde se procesa los residuos orgánicos de los caballos para la producción de biogás diaria. Las pruebas se realizaron siguiendo una metodología previamente establecida, donde se realizaron pruebas rápidas del banco para observar el correcto funcionamiento de las componentes, días antes de los ensayos finales para la toma de datos.

Antes de proceder al ensayo del motor, se comprobó el paso de biogás por el regulador variando la compresión inicial de los resortes; debió comprobarse también que no haya fugas de combustible a su paso por el mezclador y el carburador de gasolina. Una vez encendido el motor, se cerró la válvula de alimentación de gasolina y, para mayor seguridad, se retiró la manguera de alimentación de gasolina del carburador, tapándola luego con cinta aislante para evitar la pérdida de presión de vacío que se genera en el motor al descender el pistón, lo cual impediría la debida succión de biogás. Antes de la toma de datos se esperó la estabilización del funcionamiento del motor, ya que el carburador puede aún contener gasolina en su interior, lo que impediría la correcta medición de la potencia del motor con biogás.

Una vez arrancado el motor y luego de hacer la conmutación de gasolina a biogás, se esperó un tiempo aproximado de tres minutos para que se estabilice el funcionamiento del motor. Luego se procedió a tomar los datos correspondientes insertando la sonda del analizador de gases en el tubo de escape del motor, y conectando las pinzas de medición de rpm a la bujía. Se prendió la cantidad de focos necesarios de 4 en 4, siendo la carga eléctrica de estos focos cada punto de medición.

Ante el aumento de carga, el motor requerirá más combustible, por lo que el motor provocará una mayor succión que a su vez producirá una mayor apertura del obturador y de la válvula mariposa, proporcionando al motor un flujo adecuado de combustible.

Las medidas como: frecuencia (Hz), voltaje (V), amperaje (A) y potencia (kW), se obtienen del panel digital del grupo electrógeno. La composición de los gases de escape (CO, CO<sub>2</sub>, HC y O<sub>2</sub>), las rpm del motor y el coeficiente de exceso de aire ( $\lambda$ ) se muestran en el analizador de gases. Para la medición del ruido debe colocarse el instrumento de medición a un metro de la fuente según norma ISO 1996 “*Description, Measurement and assessment of environmental noise*” por ello se coloca la Tablet con dicha aplicación, a esa distancia, para registrar los decibeles (dB).

Cada vez que el medidor de flujo de biogás marca un volumen de ingreso al motor ( $m^3$ ) determinado, se detiene el cronómetro terminando la prueba. Dicho tiempo se prefiere que sea el mayor posible para tener una medida más exacta del consumo específico de combustible ( $m^3/kW.h$ ); sin embargo, debe limitarse al tiempo disponible teniendo en cuenta la cantidad de puntos de medición. Por ejemplo, en el caso específico del flujómetro registra hasta centésimas de metro cúbico; en un corto tiempo de prueba se registrarán valores pequeños de volumen, aumentando la incertidumbre de la medición (centésimas de  $m^3/s$ ). No obstante, si el tiempo de medición es mayor, se registrarán valores de flujo con una menor incertidumbre ( $m^3/min$ ).

Inmediatamente después de tomar los datos se prende otro grupo de 4 focos y se repite el procedimiento anterior hasta conseguir la máxima potencia que se nota cuando las revoluciones del motor se ven alteradas. Una buena referencia de ello es cuando la frecuencia de salida de la corriente esté por debajo de los 58 Hz.

Para la medición del consumo específico de combustible del motor funcionando con gasolina, en lugar del flujómetro se utilizó una bureta conectado mediante una manguera al carburador de gasolina. De esta manera, se toma el tiempo de consumo de un volumen determinado entre marcas de la bureta. Las demás medidas de voltaje, frecuencia, emisiones, etc. se determinan de forma similar a las pruebas con biogás.

### **6.3.2 De la incertidumbre de la medición:**

La experimentación siempre está sujeta a errores, a pesar del cuidado con los cuales son realizados. Algunos de estos errores tienen una naturaleza aleatoria y otros son producto de la experimentación. Entre los errores producto de la experimentación están los errores sistemáticos, los cuales causan que lecturas repetidas presenten la misma magnitud del error. Por ejemplo, un instrumento mal calibrado causará que la medida siempre este desviada de su valor real en una misma cantidad. Otros errores sistemáticos pueden ser estimados por métodos teóricos; por ejemplo un termómetro de mercurio tiene una parte externa expuesta al ambiente donde se encuentra el punto de medición, dicha diferencia de temperaturas entre la parte expuesta al ambiente del termómetro y la insertada en el punto de medición, influenciará en la medida. Dicha desviación de la medida puede ser estimada conociendo las propiedades térmicas del material del termómetro, del foco de medición y la transferencia de calor.

Otro tipo de errores son los de escala, que se debe a la limitación del poder resolutivo del instrumento de medición. Dichos errores pueden corregirse asociando cifras significativas a la medida.

Están también los errores personales, que son errores cometidos con frecuencia cuando se tiene poca experiencia en el laboratorio: lectura inadecuada de un aparato, uso inadecuado de un reactivo, etc.

Los errores aleatorios son las fluctuaciones en las distintas variables que influyen en el sistema. Son imprevisibles e inevitables ya que no se puede ejercer un control sobre estas fluctuaciones, incluso normalmente no se conocen todas las variables que influyen. Estos errores aleatorios usualmente siguen un cierto patrón de distribución estadística, pero no siempre.

Los errores sistemáticos y personales presentan dificultad para cuantificarlos, por ello cuando se cometen es recomendable comenzar el experimento de nuevo. Los errores aleatorios se pueden cuantificar analizando su patrón estadístico.

En el caso de las prueba del grupo electrógeno funcionando con biogás se tomaron las precauciones y cuidados correspondientes para evitar dichos errores. En el caso del analizador de gases, se comprobó que su certificado de calibración tenga vigencia al momento de realizar las pruebas, al igual que el medidor de flujo de biogás. El panel digital del grupo puede tener errores asociados a la forma de medición de todos los parámetros que muestra, para ello fue necesario comparar las medidas que marcaba el panel con un multímetro digital, comprobando de esta manera su correcto funcionamiento.

La frecuencia que marca el panel digital, puede compararse con el medidor de RPM del analizador de gases para mayor seguridad. Los instrumentos de medición directa como el cronómetro, el decibelímetro, el analizador de gases tienen mayor probabilidad de errores cometidos por el observador, errores personales, dichos errores no pueden cuantificarse; sin embargo, se puede tomar como una estimación del error cometido la precisión en la medida de dichos instrumentos.

En el caso particular del flujómetro, existe un error de escala asociado al tiempo de medición del volumen de biogás que ingresa al motor. Un mayor tiempo de medición marcará un volumen mayor de biogás que ingresa al motor, pudiendo ser registrado por el instrumento sin limitaciones de su resolución. Lo anterior es necesario para determinar el flujo másico y consumo específico de biogás, tomando el mayor tiempo posible en cada prueba para su correcta determinación, pero acorde con el tiempo total con el que disponemos para obtener todos los puntos de medición.

En las pruebas del grupo electrógeno funcionando con gasolina, puede cometerse errores personales al leer el volumen de gasolina consumido entre marcas de la bureta, conectada al carburador de gasolina. Para solucionar lo anterior asociamos un valor de error a criterio según la vista del observador.



## 6.4 Fórmulas utilizadas:

### 6.4.1 De los parámetros de funcionamiento del grupo electrógeno:

1. Potencia eléctrica generada:

$$Pot = V \cdot I / 1000 \quad (kW) \quad (6.1)$$

Donde:

$V$ : Voltaje (V).

$I$ : Intensidad de corriente (A).

2. Consumo horario de combustible:

$$G_{comb} = \frac{3.600 \cdot \Delta V}{t} \quad (m^3/h) \quad (6.2)$$

Donde:

$\Delta V$ : Volumen consumido de combustible ( $m^3$ ).

$t$ : Tiempo (s).

3. Consumo específico de combustible:

$$g_e = \frac{G_{comb}}{Pot} \quad (m^3/kW \cdot h) \quad (6.3)$$

Donde:

$G_{comb}$ : Consumo horario de combustible ( $m^3/h$ ).

$Pot$ : Potencia eléctrica generada (kW).

4. Eficiencia efectiva:

$$\eta_e = \frac{1}{H_u \cdot g_e} \quad (6.4)$$

Donde:

$H_u$ : Poder calorífico del combustible ( $kJ/m^3$  ó  $kJ/kg$ ).

$g_e$ : Consumo específico de combustible ( $m^3/kJ$  ó  $kg/kJ$ ).

### 6.4.2 De la incertidumbre de la medición:

Sea la función R definida por:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Donde:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ : Variables independientes.

Entonces, la incertidumbre de la función dependerá de la incertidumbre de cada variable independiente según la siguiente relación [Ref. 28]:

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.5)$$

Donde:

$w_R$ : Incertidumbre de la función.

$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ : Incertidumbres en las variables independientes.

Aplicando lo anterior a las fórmulas para determinación de los parámetros de funcionamiento del grupo electrógeno, resulta:

1. Incertidumbre en la potencia eléctrica:

$$\frac{w_P}{P} = \sqrt{\left( \frac{w_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{w_I}{I} \right)^2} \quad (6.6)$$

Donde:

$w_P$ : Incertidumbre de la potencia eléctrica.

$w_V$ : Incertidumbre en la medición del voltaje.

$w_I$ : Incertidumbre en la medición de la intensidad de corriente.

2. Incertidumbre en el consumo de combustible:

$$\frac{w_G}{G} = \sqrt{\left( \frac{w_{\Delta V}}{\Delta V} \right)^2 + \left( \frac{w_t}{t} \right)^2} \quad (6.7)$$

Donde:

$w_G$ : Incertidumbre en el consumo de combustible.

$w_v$ : Incertidumbre en la medición del volumen consumido de combustible.

$w_t$ : Incertidumbre en la medición del tiempo.

3. Incertidumbre en el consumo específico de combustible:

$$\frac{w_{g_e}}{g_e} = \sqrt{\left(\frac{w_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{w_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta V}}{\Delta V}\right)^2 + \left(\frac{w_I}{I}\right)^2} \quad (6.8)$$

Donde:

$w_{g_e}$ : Incertidumbre en el consumo específico de combustible.

4. Incertidumbre en la eficiencia efectiva:

$$\frac{w_{\eta_e}}{\eta_e} = \sqrt{\left(\frac{w_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{w_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta V}}{\Delta V}\right)^2 + \left(\frac{w_I}{I}\right)^2} \quad (6.9)$$

Donde:

$w_{\eta_e}$ : Incertidumbre en la eficiencia efectiva.

Los errores que se pueden cometer durante la medición de los parámetros, según lo anterior, se muestran a continuación para el grupo electrógeno funcionando a la potencia nominal (2 kW para el biogás, y 2,5 kW para la gasolina):

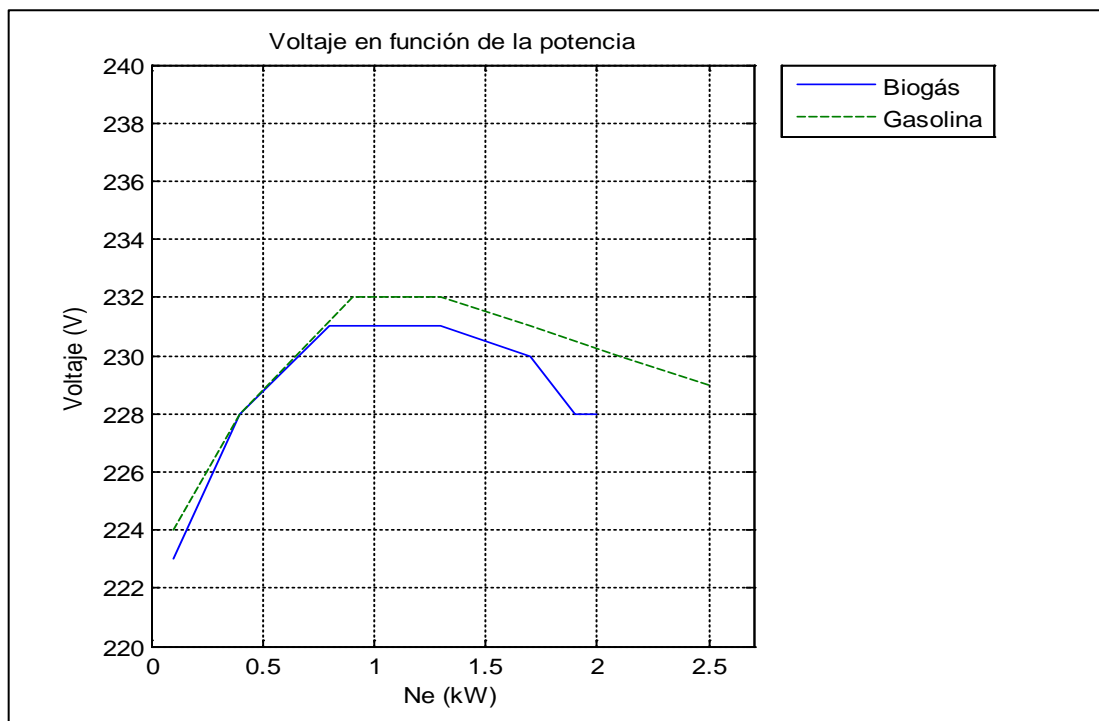
- Potencia eléctrica:  $\pm 0,025$  kW (biogás y gasolina).
- Consumo de combustible:  $\pm 0,063$  m<sup>3</sup>/h (biogás),  $\pm 0,34$  L/h (gasolina).
- Consumo específico de combustible:  $\pm 0,033$  m<sup>3</sup>/kW.h (biogás),  $\pm 102.316$  g/kW.h (gasolina).
- Eficiencia efectiva:  $\pm 0,62\%$  (biogás),  $3,2\%$  (gasolina).

## 6.5 Análisis y discusión de los resultados experimentales:

Los resultados experimentales obtenidos de los diferentes parámetros de funcionamiento del grupo electrógeno utilizando como combustible biogás o gasolina, deben graficarse a fines de analizar su comportamiento y diferencias. Es necesario, también, el análisis de la composición de los gases de escape del motor, a fines de apreciar la reducción de las emisiones y el impacto ambiental, cuando el motor funciona con biogás. Los resultados de las pruebas experimentales se muestran en los protocolos de pruebas (Anexo B).

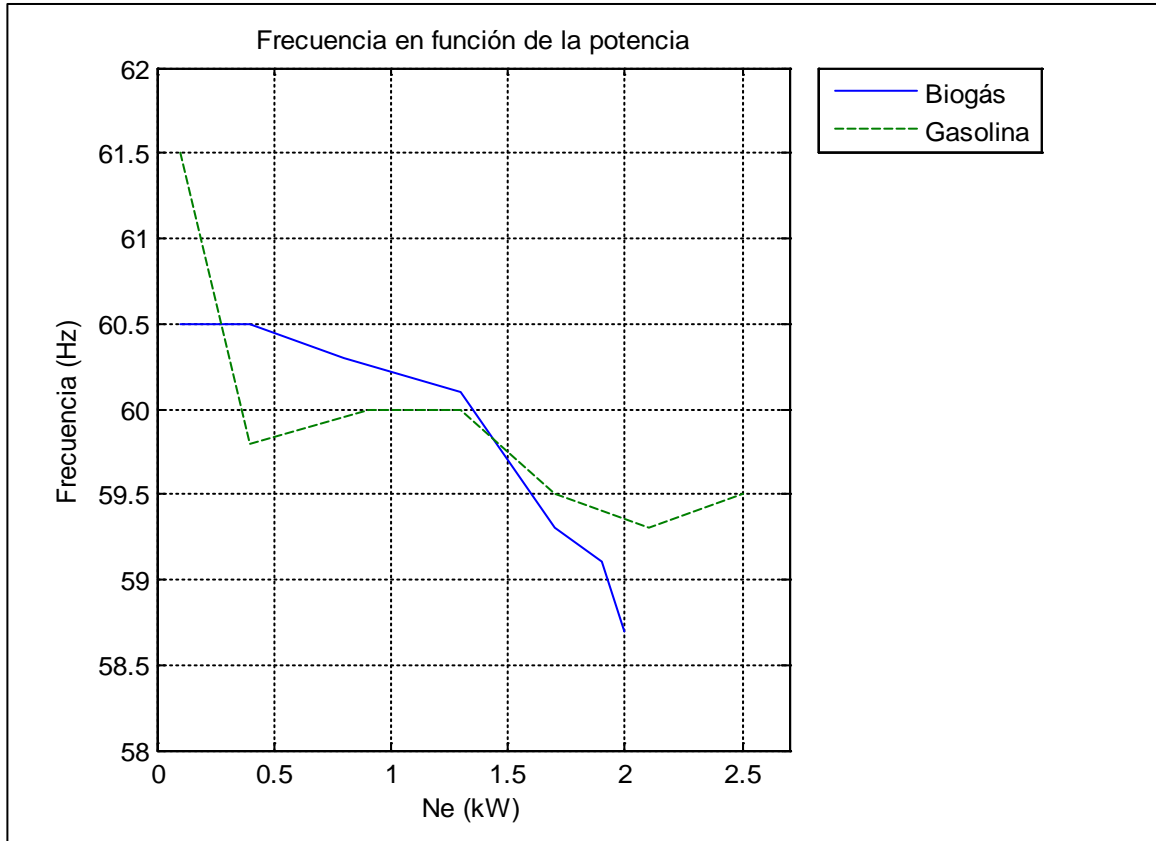
### 6.5.1 Voltaje y frecuencia:

La figura 6.3 muestra como varía el voltaje en función de la potencia generada, donde se puede notar que el voltaje varía desde un valor de 223 V para el trabajo en vacío del motor hasta un valor de 228 V a la máxima carga en el caso del biogás, llegando hasta un máximo de 231 V. El voltaje es de 1,4% a 5% mayor que el voltaje nominal funcionando con biogás, lo cual asegura una operación confiable del motor en cualquier régimen de carga, ya que para obtener energía eléctrica de calidad se admite como máximo una tolerancia de hasta  $\pm 5\%$  de la tensión nominal [Ref. 29].



**Figura 6.3** Variación del voltaje en función de la potencia del grupo funcionando con biogás y gasolina.

En la Figura 6.4 se aprecia la variación de la frecuencia para diferentes valores de la potencia generada del funcionamiento del motor con biogás y con gasolina. Los valores obtenidos en el caso del biogás varían desde los 60.5 Hz a bajas cargas hasta los 58.7 Hz a la máxima potencia, obteniéndose una desviación máxima del 2.17% de la frecuencia nominal, por lo que se puede esperar un suministro confiable de energía eléctrica, ya que la norma IEC 60034-3:1996 considera una tolerancia de hasta  $\pm 2\%$  [Ref. 30].

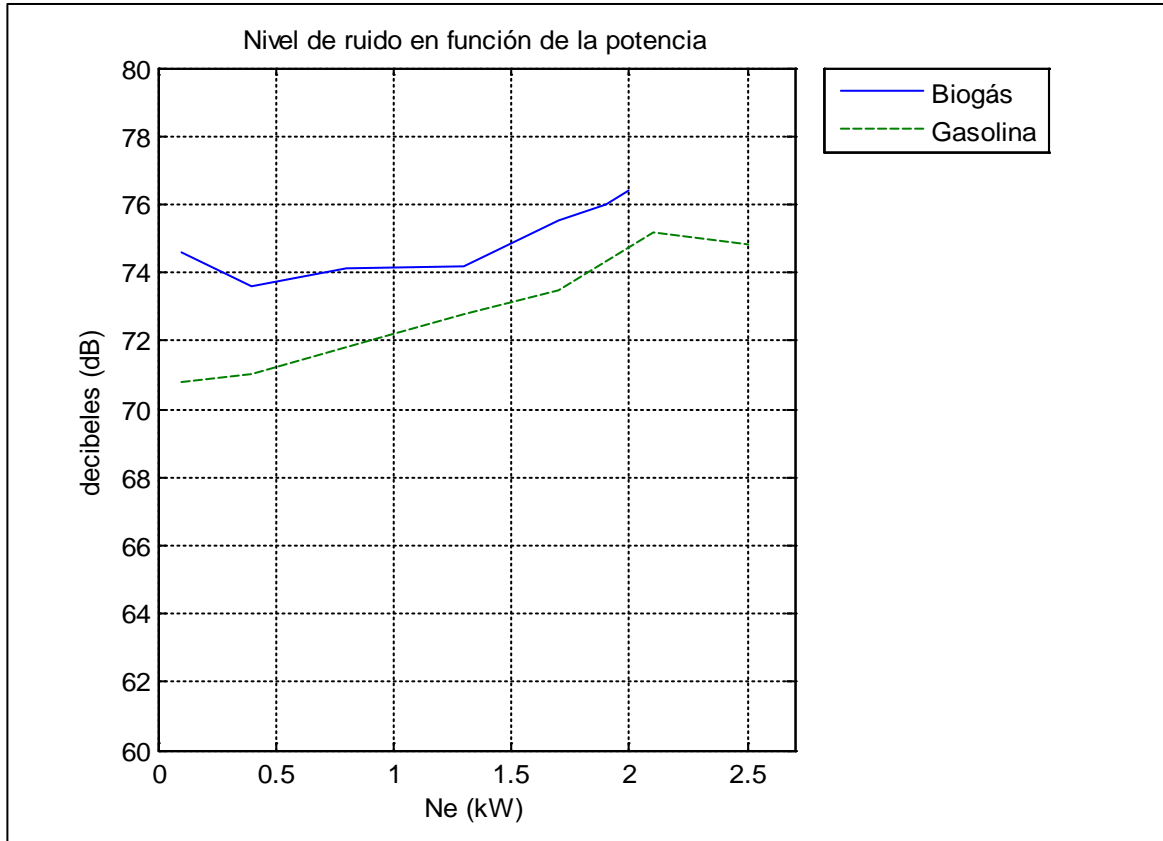


**Figura 6.4** Variación de la frecuencia en función de la potencia del grupo funcionando con biogás y gasolina.

### 6.5.2 Nivel de ruido:

Con la finalidad de comparar el ruido que produce el motor funcionando con biogás y gasolina se realizó la medición del nivel del ruido con ambos combustibles a una distancia de 1m según norma. En vacío, el motor funcionando a biogás presenta un nivel de ruido mayor en 5,5% que el ruido medido durante el funcionamiento a gasolina. Sin embargo, a medida que aumenta la carga eléctrica, los niveles de ruido del funcionamiento en ambos combustibles van haciéndose similares. Así tenemos que, en la carga nominal, el nivel del ruido con biogás es sólo 2,2% mayor que el nivel de ruido medido en el funcionamiento con gasolina a este régimen.

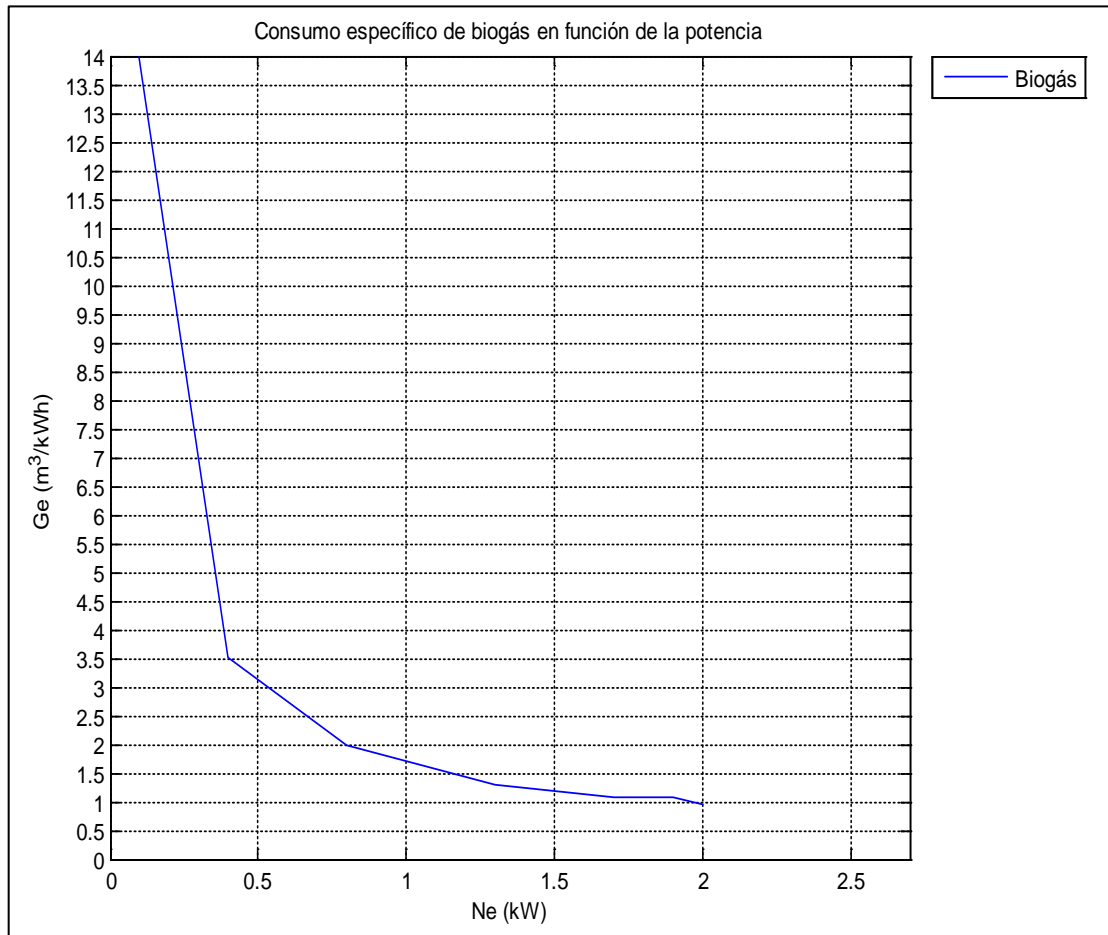
En general, el mayor nivel de ruido producido durante todo el rango de funcionamiento del motor a biogás con respecto al nivel de ruido con gasolina, es indicio también del mayor nivel de vibración del motor funcionando con biogás. Esto es probablemente debido a la existencia de una única etapa de regulación en el regulador-dosificador de biogás, lo cual no permite una alta estabilidad del flujo de biogás y del funcionamiento del motor.



**Figura 6.5** Variación del nivel de ruido en función de la carga del grupo funcionando con biogás y gasolina, medida a una distancia de 1 m.

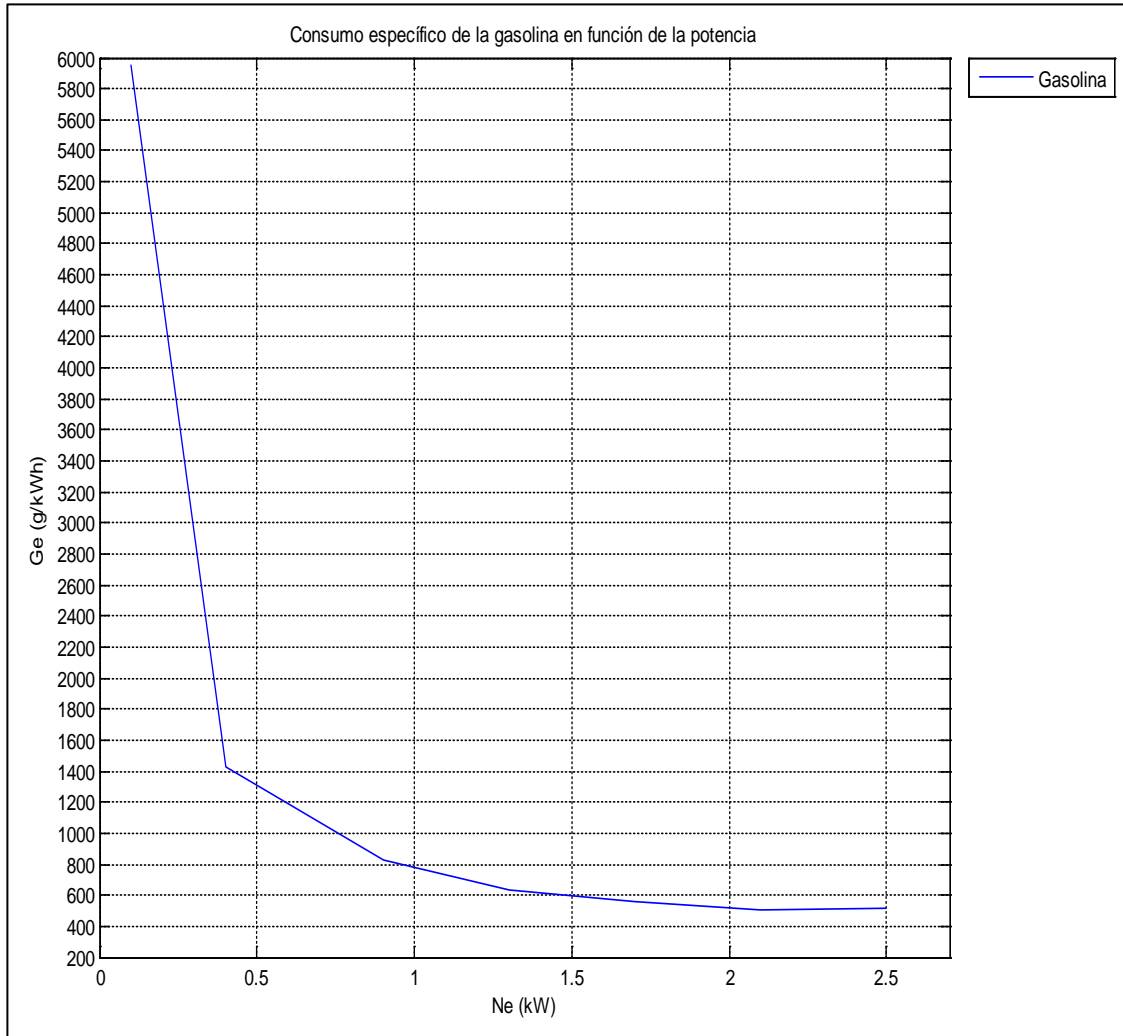
### 6.5.3 Consumo de combustible:

En la figura 6.6 se muestra la variación del consumo específico de biogás en función de la potencia generada según los resultados experimentales. El menor valor del consumo específico es de  $0,94 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$  para una potencia de  $2 \text{ kW}$ . Este valor del consumo específico se encuentra en el rango que indica la bibliografía ( $0,65 - 1,0 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$ ) [Ref. 17] para motores de ciclo Otto modificados a biogás.



**Figura 6.6** Variación del consumo específico de biogás en función de la potencia.

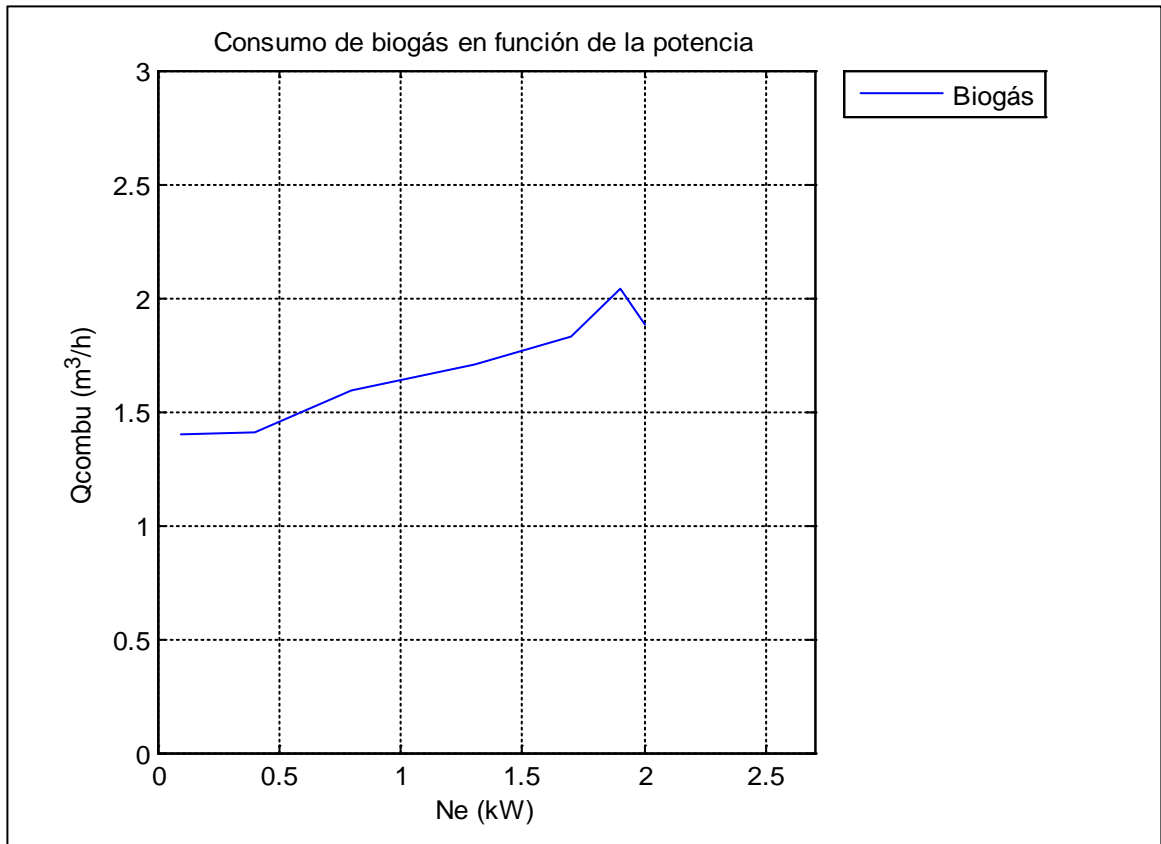
En la figura 6.7 se muestra la variación del consumo específico de gasolina en función de la potencia generada del grupo electrógeno. El menor valor de consumo específico obtenido es de  $511 \text{ g/kW.h}$  con el motor funcionando a la potencia nominal. Los datos experimentales se obtuvieron utilizando gasolina de 90 octanos.



**Figura 6.7** Variación del consumo específico de gasolina en función de la potencia del grupo.

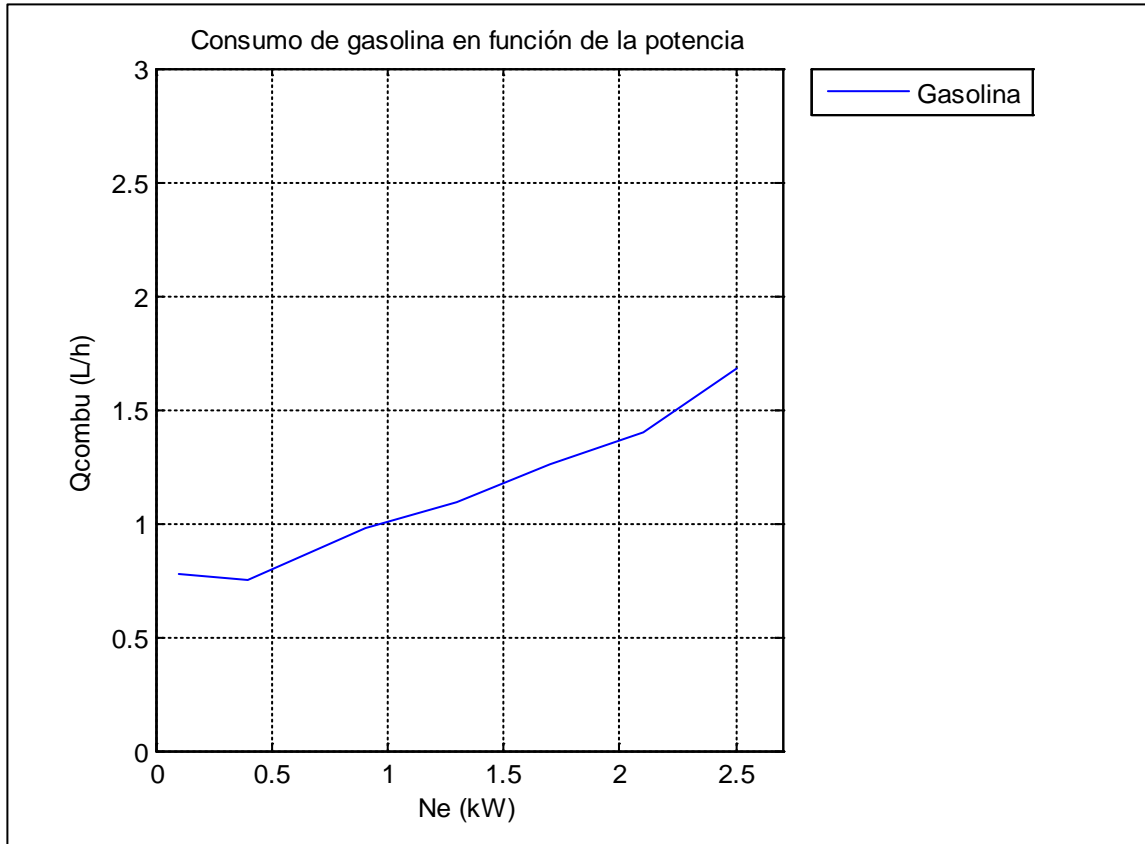
La figura 6.8 muestra la variación del flujo de consumo de biogás en función de la potencia generada del grupo electrógeno. Según los resultados experimentales se obtiene un consumo aproximado de  $1,40 \text{ m}^3/\text{h}$  para la marcha en vacío del motor y de  $1,9 \text{ m}^3/\text{h}$  para una potencia de 2 kW. Este dato es de mucha utilidad para el dimensionamiento de la planta de biogás a construir, ya que si se quisiera 4 horas de energía eléctrica al día, con el motor funcionando a una carga de 1,9 kW, el consumo horario de biogás sería  $2,04 \text{ m}^3/\text{h}$  (según gráfica); por lo tanto la planta de biogás deberá ser dimensionada para abastecer un volumen de  $8,16 \text{ m}^3$  de biogás al día (4 horas por día de funcionamiento).





**Figura 6.8** Variación del consumo volumétrico de biogás en función de la potencia.

La figura 6.9 muestra la variación del consumo de gasolina, en función de la potencia del grupo. Para la potencia nominal del grupo electrógeno de 2,5 kW, se tiene un consumo de gasolina de 1,68 L/h. La capacidad del tanque de combustible es de 13 litros, ello indicaría que el grupo funcionaría 7,74 horas de forma continua a la potencia nominal. Lo anterior es concordante con la autonomía de 8 horas de funcionamiento indicada en el manual.



**Figura 6.9** Variación del consumo de gasolina en función de la potencia del grupo.

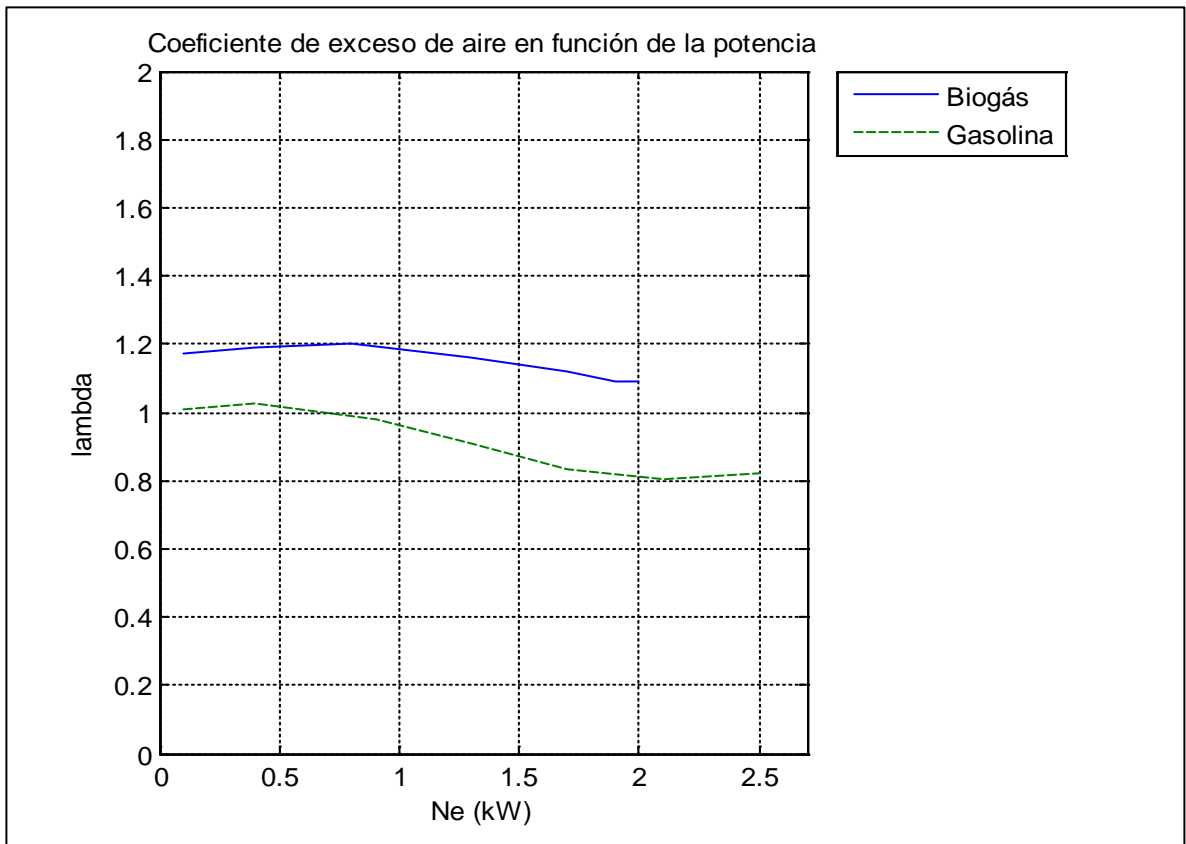
#### 6.5.4 Coeficiente de exceso de aire:

La figura 6.10 muestra la tendencia que siguen las curvas del coeficiente de exceso de aire en función de la potencia generada para los ensayos con biogás y con gasolina.

En el caso del grupo funcionando con biogás, se puede notar que el motor opera siempre con mezclas pobres, obteniéndose valores que van desde 1,17 para el régimen de ralentí hasta 1,09 para la máxima carga del motor. Lo anterior representa una importante ventaja en la economía del combustible con un proceso de combustión suficientemente estable [Ref. 18]. Además, con los valores de  $\lambda$  obtenidos, se asegura que las emisiones de monóxido de carbono sean mínimas y que el aprovechamiento del biogás sea eficiente.

En el caso del grupo funcionando con gasolina, el motor opera prácticamente con mezclas ricas, obteniéndose un coeficiente de exceso de aire de 0,82 para la potencia nominal de 2,5 kW. Ello se debe a que el fabricante prioriza la potencia del motor,

asegurando que  $\lambda$  se encuentre entre 0,85 a 0,90 [Ref. 18]. Esto es lo contrario del caso anterior, ocasionando un mayor consumo de combustible y también un mayor perjuicio al medio ambiente debido a las mayores emisiones de monóxido de carbono en los gases de escape.



**Figura 6.10** Variación del coeficiente de exceso de aire para el grupo funcionando con biogás y gasolina en función de la potencia.

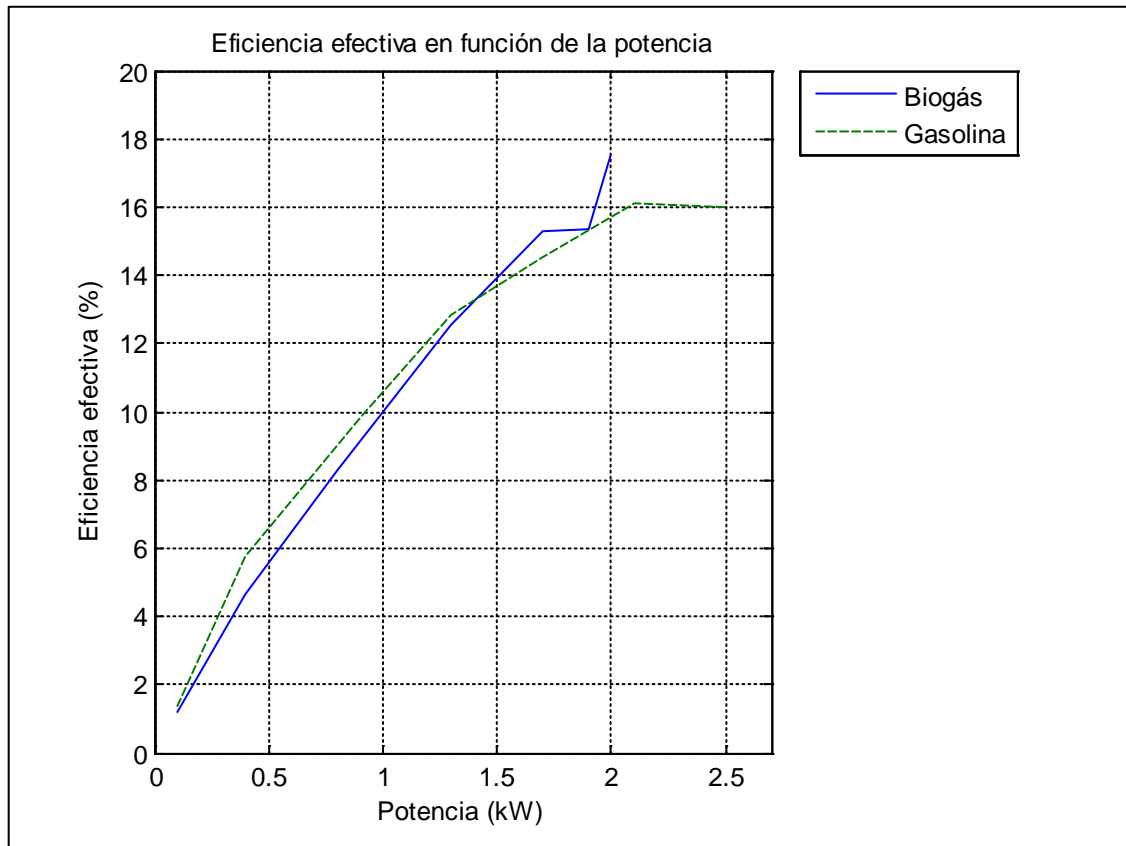
### 6.5.5 Eficiencia efectiva:

En la figura 6.11 se puede apreciar la variación de la eficiencia efectiva del grupo electrógeno en función de la potencia generada para el biogás y la gasolina. La eficiencia efectiva, en el caso del biogás, varía desde 1,2% para el régimen de ralentí hasta una eficiencia de 17,5% para la potencia de 2 kW. Los valores de la eficiencia efectiva con el grupo funcionando a gasolina son muy cercanos a los del biogás, varían desde 1,4% en el régimen de ralentí hasta 16,0% para la potencia de 2,5 kW.

Se debe indicar también que, en el régimen nominal, la eficiencia efectiva del grupo funcionando a biogás es 9,3% mayor respecto a la eficiencia efectiva del grupo

funcionando a gasolina. Lo anterior se debe a que durante todo el funcionamiento del grupo a biogás, se ha tenido un coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  mayor que 1, es decir, el motor trabajó con una mezcla pobre.

Los valores relativamente bajos de la eficiencia efectiva del grupo electrógeno, es debido principalmente al tamaño pequeño del motor, lo cual produce mayores pérdidas de calor.



**Figura 6.11** Variación de la eficiencia efectiva del grupo funcionando con biogás y gasolina en función de la potencia.

### 6.5.6 Composición de los gases de escape:

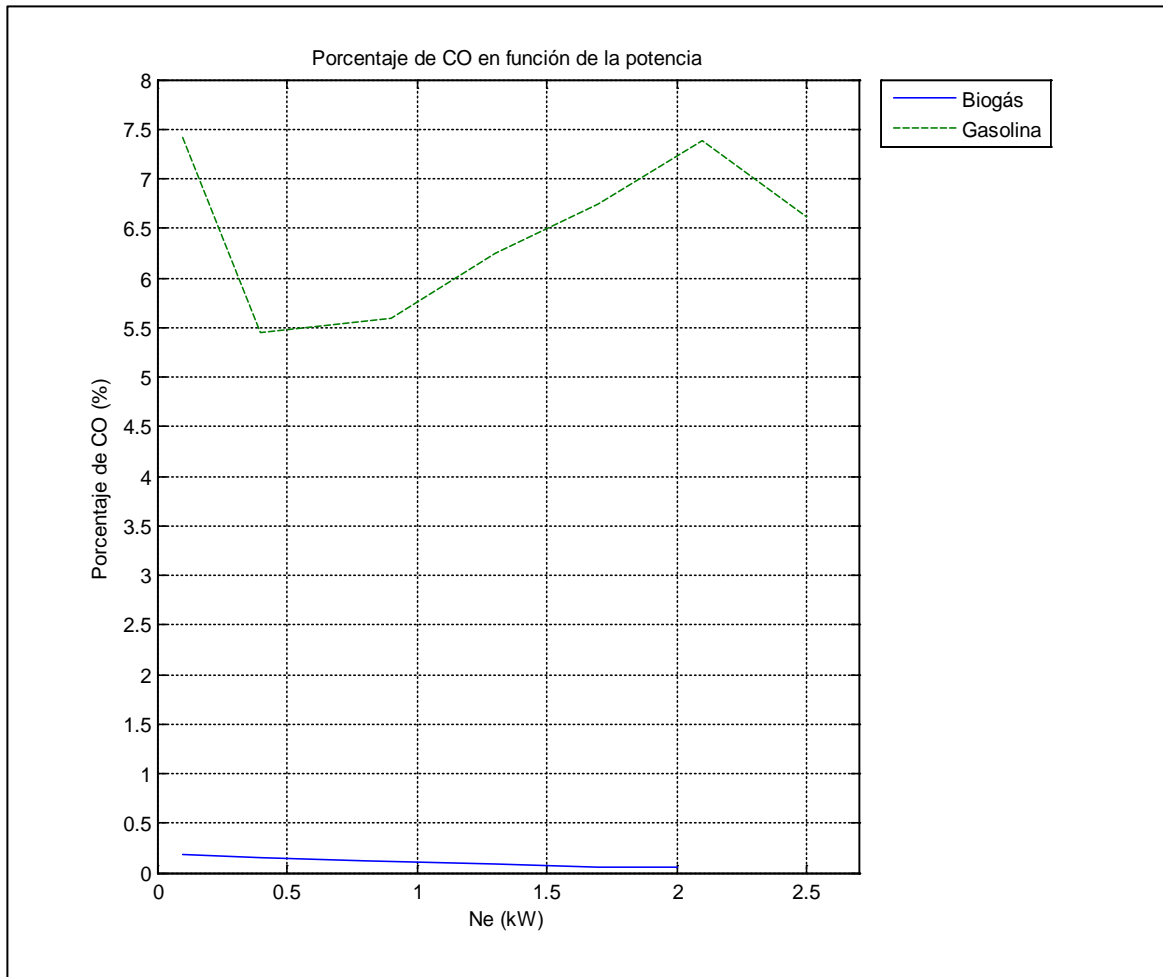
Las figuras 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 muestran los niveles de CO (%) y de HC (ppm) para diferentes valores de la potencia generada (kW) y del coeficiente de exceso de aire, tanto para los ensayos realizados con gasolina, así como con biogás. La emisión de hidrocarburos y de monóxido de carbono se midió con el analizador de gases programándolo para gas natural en el caso de biogás y en gasolina para el otro caso.

Las bajas emisiones de CO con biogás (menores al 1%) se deben tanto a la mezcla homogénea aire-biogás, como al hecho que el coeficiente  $\lambda$  es ligeramente mayor a 1.

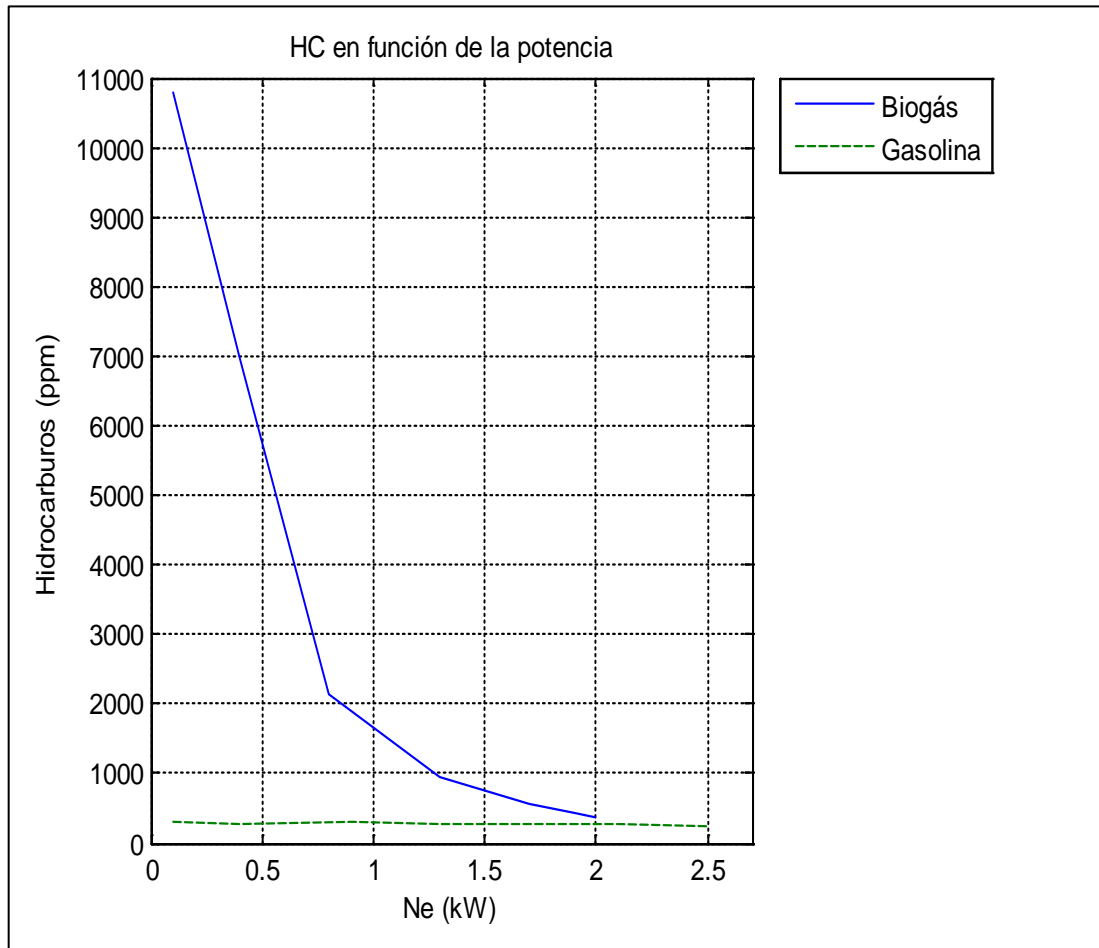
Según los resultados, se tienen relativamente altos valores de HC a bajas cargas en el caso del biogás, obteniéndose luego valores cercanos de emisión con gasolina a la potencia nominal. En cambio, para la gasolina, las emisiones de hidrocarburos se mantienen prácticamente constantes.

Respecto al nivel relativamente alto de las emisiones de hidrocarburos en el caso del biogás a bajas cargas, esto se debe probablemente a que la temperatura de combustión es baja cuando la mezcla es pobre, lo cual impide que el metano se quemé completamente y se tenga una lectura alta de estas emisiones.

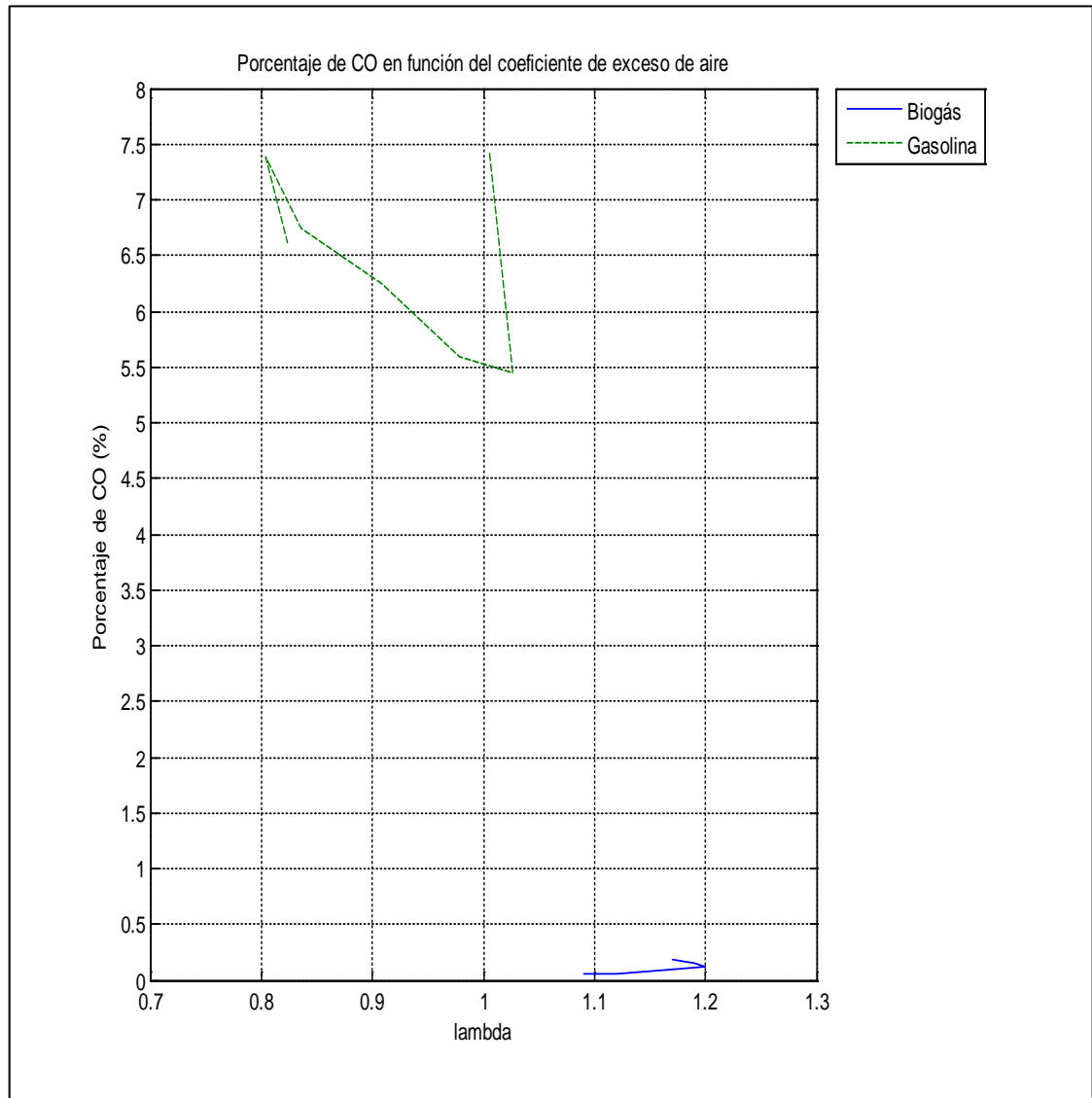
Aun así, a bajas cargas, los hidrocarburos no tienen una presencia notable en los gases de escape en el caso del biogás, ya que su mayor valor (11000 ppm) representa tan solo el 1,1% del total de emisiones.



**Figura 6.12** Porcentaje de CO en los gases de escape en función de la potencia del grupo electrógeno funcionando con gasolina y con biogás.

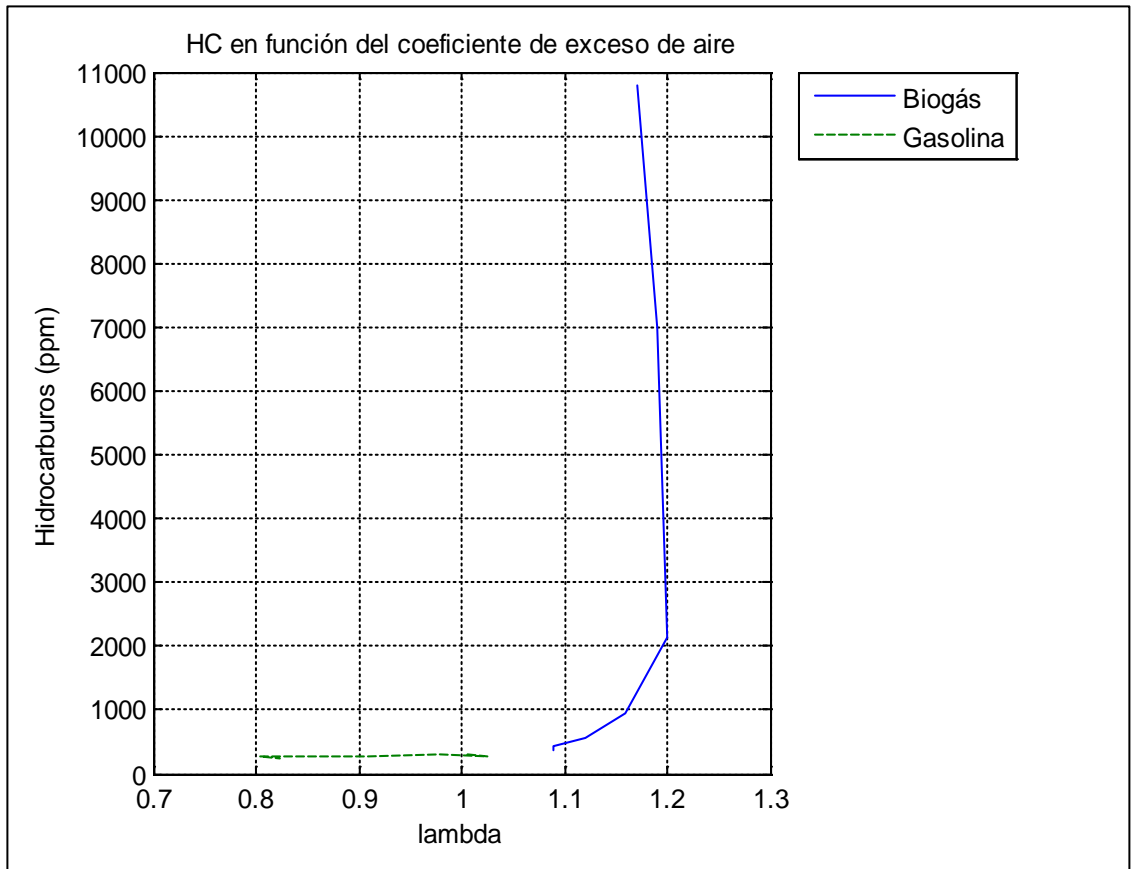


**Figura 6.13** Emisiones de Hidrocarburos (ppm) en función de la potencia del grupo electrógeno funcionando con gasolina y con biogás.



**Figura 6.14** Porcentaje de CO en los gases de escape en función del coeficiente de exceso de aire del grupo funcionando con gasolina y con biogás.





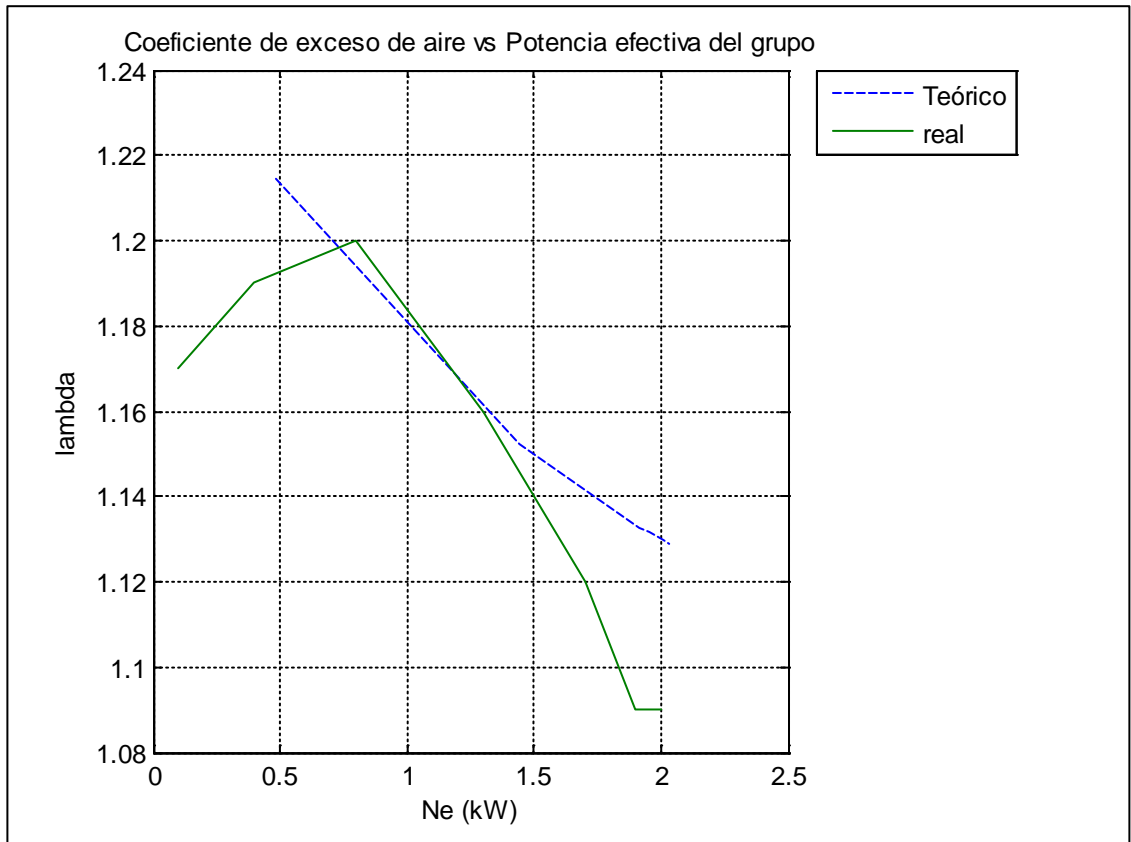
**Figura 6.15** Emisiones de Hidrocarburos (ppm) en función del coeficiente de exceso de aire del grupo funcionando con gasolina y con biogás.

### 6.6 Validación del modelo matemático:

Una vez realizado los ensayos experimentales, se pueden realizar comparaciones (contrastaciones) entre los resultados obtenidos por medio de cálculos teóricos y los obtenidos de la experiencia, utilizando biogás como combustible. El grado de aproximación del modelo teórico con los datos reales validará o descartará nuestro modelo.

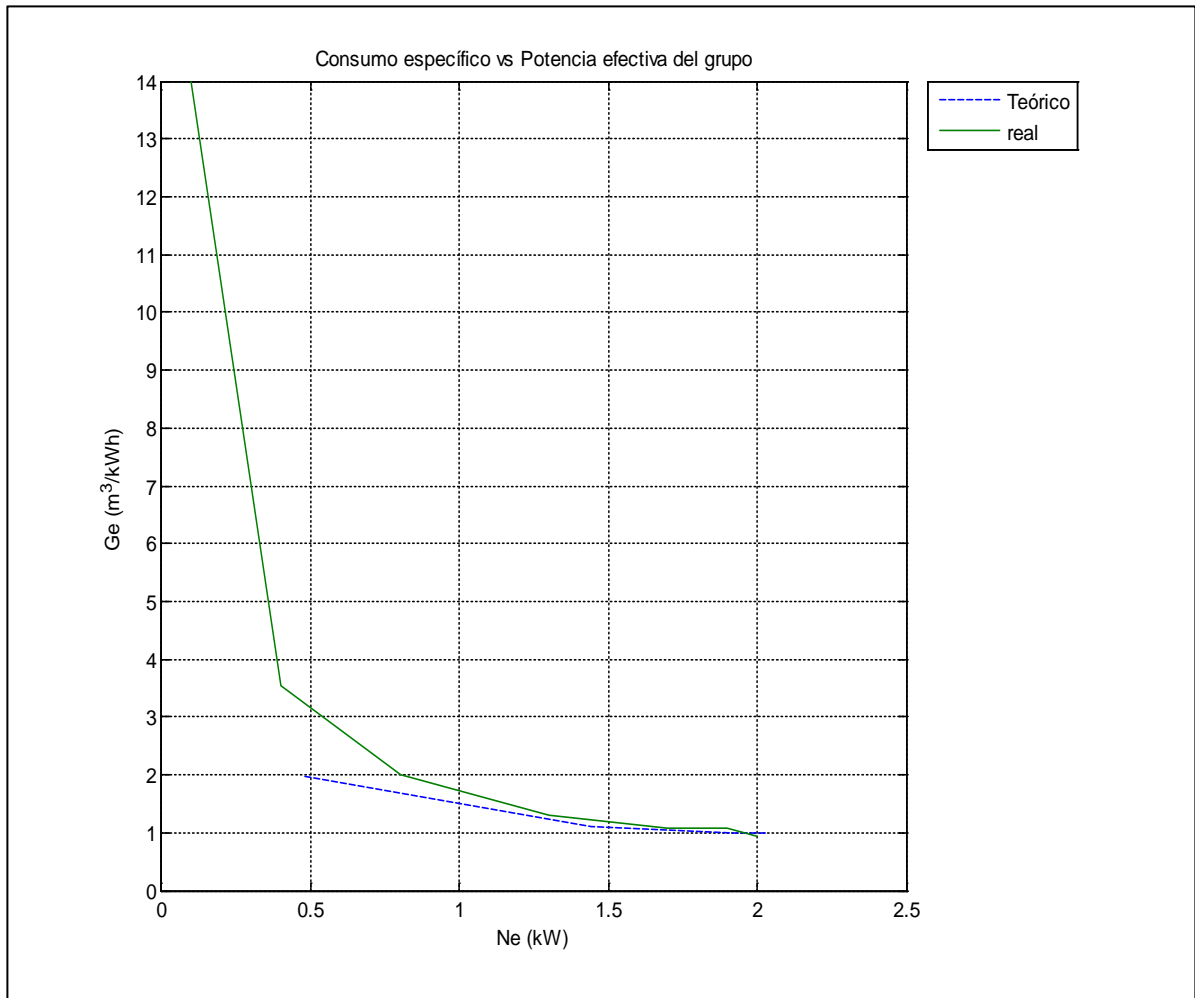
El coeficiente de exceso de aire presenta una mayor diferencia entre los resultados obtenidos a través de la modelación matemática y los obtenidos a través de la experimentación en el régimen nominal, cuando el grupo alcanza los 2 kW de potencia eléctrica. Dicha diferencia es del 3,57% respecto al valor teórico. Sin embargo, en todo

el régimen de funcionamiento del grupo, las curvas teóricas y reales presentan buena aproximación, según se muestra en la figura 6.16.



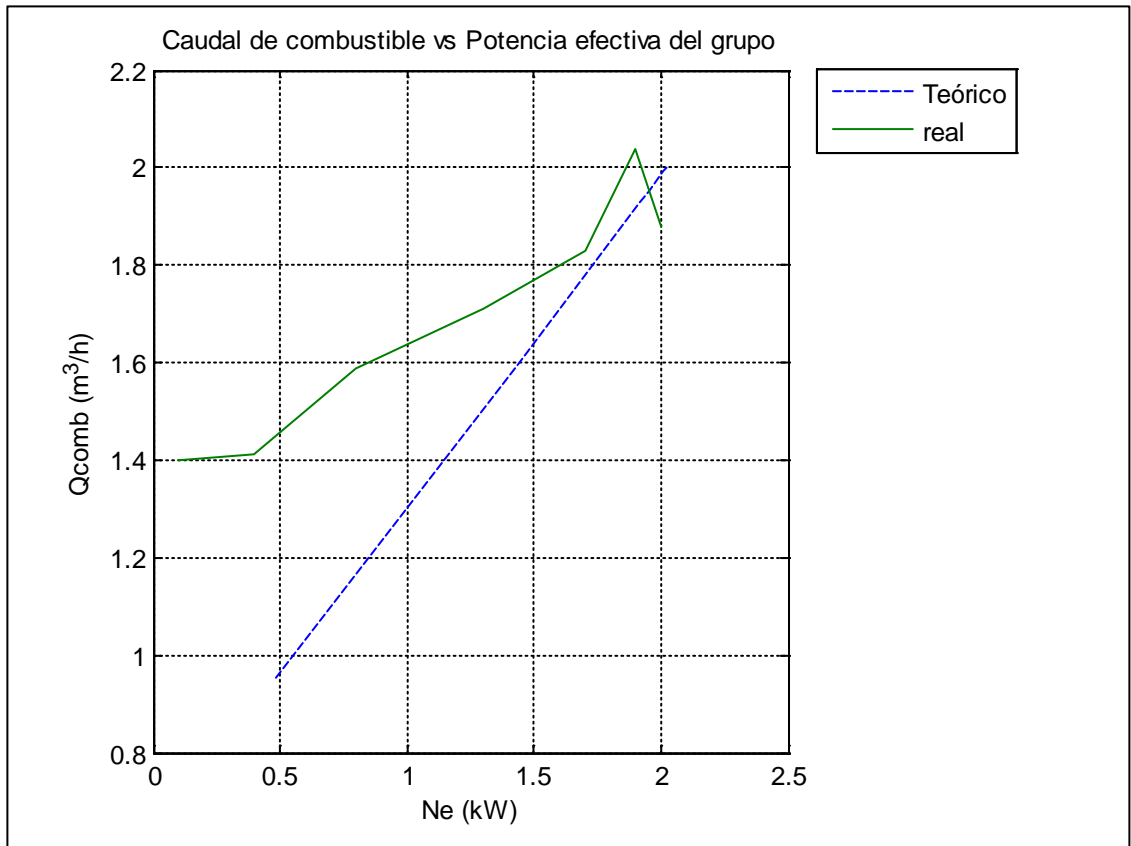
**Figura 6.16** Coeficiente de exceso de aire en función de la potencia efectiva del grupo electrógeno utilizando biogás como combustible.

En el caso del consumo específico de combustible, la diferencia entre los resultados teóricos y reales se incrementa a medida que disminuye la potencia eléctrica del grupo, tal como se muestra en la figura 6.17. Sin embargo, se puede lograr una mayor aproximación entre dichos resultados, a bajas potencias, variando la tensión inicial o la constante de rigidez de los resortes (máxima o mínima carga).



**Figura 6.17** Consumo específico de combustible en función de la potencia efectiva del grupo electrógeno utilizando biogás como combustible.

El caudal de consumo de biogás presenta mayor diferencia entre resultados teóricos y reales a bajas potencias (figura 6.18). A 25% de la potencia nominal la diferencia es de 78.75% respecto a los datos teóricos. No obstante, al igual que el caso anterior, ambas curvas se pueden aproximar en dicho régimen variando la tensión inicial de los resortes.



**Figura 6.18** Caudal de combustible de consumo en función de la potencia efectiva del grupo electrógeno utilizando biogás como combustible.

A continuación se resumen en la tabla 6.1 los datos del grupo electrógeno obtenidos experimentalmente a la potencia nominal y los obtenidos de la modelación matemática cuando el grupo electrógeno utiliza biogás como combustible.

**Tabla 6.1** Cuadro comparativo de los resultados experimentales con el modelo matemático a régimen nominal utilizando biogás como combustible.

PARAMETRO	Resultados reales	Resultados teóricos	Diferencia porcentual de resultados (%)
Coefficiente de exceso de aire ( $\lambda$ )	1,09	1,13	3,57
Potencia del grupo con biogás [kW]	2,00	2,03	1,71
Caudal de combustible de consumo [m <sup>3</sup> /h]	1,88	2,01	6,76
Consumo específico [m <sup>3</sup> /kW.h]	0,94	0,99	4,96

La potencia del grupo electrógeno, su consumo específico y el coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  presentan muy buena aproximación con diferencias menores al 5% en régimen nominal. El caudal de combustible de consumo real y teórico, difieren en menos de 7%, esto puede considerarse una buena aproximación ya que no supera el 10%. Lo anterior valida nuestro modelo matemático para el funcionamiento del grupo electrógeno modificado, utilizando biogás como combustible.

Es importante notar que la tendencia casi constante de  $\lambda$  experimental en la gráfica 6.10, en el caso del biogás, se debe a la acción del regulador-dosificador desarrollado. Si no se hubiera instalado este dispositivo, la tendencia de la curva sería totalmente distinta, enriqueciéndose la mezcla al disminuir la carga, lo que hubiese ocasionado no sólo el aumento del consumo específico de combustible a bajas cargas, sino también el aumento de las emisiones de CO y HC y el trabajo inestable del motor a estas cargas.

Gracias a los resultados del programa, el proceso constructivo del sistema ha sido más directo, con ahorro de tiempo y dinero, y con la experimentación se han logrado los ajustes necesarios para la mejor respuesta en el funcionamiento del motor. Estos ajustes realizados en el sistema durante la experimentación, permiten también un proceso de retroalimentación de datos en el programa para lograr su mejora continua, corrigiendo los coeficientes empíricos utilizados en la modelación.

El programa permite realizar un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más críticos que influyen notablemente durante el funcionamiento del motor a biogás. Es así que se confirmó la influencia de la presión de suministro de biogás, del diámetro de la garganta del mezclador, de la cantidad de agujeros del mezclador y sus respectivos diámetros, el diámetro del obturador en el regulador y la dimensión y compresión de sus resortes internos, algo que inicialmente se subestimó, pero luego se identificó la

importancia de este último parámetro en el valor del coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  y el funcionamiento del motor.

Entonces, según el análisis anterior, puede inferirse que el coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  es la variable que sintetiza la influencia de todos los parámetros que aparecen durante la admisión de biogás y de aire. Por ello puede considerarse a  $\lambda$  como la variable más significativa del sistema de admisión y de funcionamiento del motor a biogás.

El motor funcionando con biogás y con mezcla pobre, contribuye a una mayor eficiencia de generación eléctrica y a la disminución de las emisiones tóxicas. Sin embargo, podría aumentarse el diámetro de la garganta del mezclador, o variar cualquiera de las otras variables influyentes en el  $\lambda$ , con el objetivo de obtener una mayor potencia. Lo recomendable en este caso sería ir haciendo los cambios y medir la potencia del motor o el coeficiente de exceso de aire  $\lambda$  (medido con el analizador de gases) hasta obtener los parámetros de funcionamiento deseados.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones:

- Se ha logrado la generación de energía eléctrica en un grupo electrógeno de 2,5 kW utilizando biogás con las características de sencillez, confiabilidad y economía del sistema de alimentación propuesto en la presente tesis.
- Se ha comprobado que el funcionamiento del sistema de alimentación de biogás, con regulación automática en función de la carga, ha sido muy satisfactorio.
- Como resultado de los ensayos y pruebas experimentales realizadas en la presente tesis, se ha logrado la validación del modelo matemático desarrollado que determina los parámetros constructivos del sistema de alimentación de biogás.
- La potencia máxima desarrollada por el motor es de aproximadamente 2 kW, lo cual es un 20% menor que la potencia nominal del motor (2,5 kW) trabajando con gasolina.
- Los resultados de las pruebas con biogás arrojaron un consumo específico de  $0,94 \text{ m}^3/\text{kW}\cdot\text{h}$  con el motor trabajando a plena carga, valor aceptable para motores de encendido por chispa modificados a biogás.

- La implementación del sistema de alimentación de biogás no requiere ninguna modificación en el sistema de alimentación de gasolina del motor utilizado. Además, el motor trabaja de forma estable a bajas cargas con dicho sistema.
- Las virtudes principales del sistema desarrollado, son su sencillez, confiabilidad y bajo costo, lo que ha permitido una sustancial simplificación respecto a los sistemas convencionales de gran potencia, los cuales incluyen procesos de compresión y almacenamiento de biogás en tanques de acero, derivándose al grupo electrógeno mediante sistemas complejos de reducción y regulación de biogás, encareciendo el sistema y reduciendo la eficiencia energética de la planta.
- Las emisiones tóxicas de monóxido de carbono utilizando biogás como combustible, sólo son el 0,8% de las emisiones de monóxido con gasolina, lo cual demuestra su importancia en la preservación del medio ambiente.

## 7.2 Recomendaciones:

- Se recomienda diseñar un conmutador biogás-gasolina que permita cambiar de combustible de una forma más sencilla, ya que la válvula de cierre de suministro de gasolina puede dañarse debido a su reiterada manipulación.
- Medir la concentración de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) en ppm que ingresa al motor luego de pasar por el filtro, a manera de comprobar su efectividad. También, sería de mucha utilidad comprobar el estado de las componentes internas del motor luego de un tiempo para determinar el retraso del efecto corrosivo que el ácido sulfhídrico genera.
- Comprobar la efectividad del regulador-dosificador de biogás fabricado de materiales más ligeros y resistentes a la acción corrosiva del ácido sulfhídrico, tales como plásticos o polímeros.
- Difundir aún más la tecnología del biogás como combustible de generación eléctrica en motores estacionarios. El regulador-dosificador de biogás diseñado puede ser replicado en escala para varios grupos, pudiendo llegar a lugares remotos sin acceso a la red eléctrica.



**BIBLIOGRAFÍA**

Referida a los antecedentes, biogás y su utilización:

1. **Lobera Lossel, Juan Bautista.** “Historia del biogás”. Proyecto Metabioresor. Marzo. 2011.
2. **Varnero Moreno, María Teresa.** “Manual del biogás”, auspiciado por el Ministerio de Energía. Santiago de Chile, Chile. 2011.
3. **Oliveros Donohue, Alfredo.** Informe Final, Proyecto de Investigación: “Uso del biogás en Motores”. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. Febrero del 2000.
4. **Trelles Salvador, Juan Pablo.** Tesis de Competencia Profesional “Modelamiento y Optimización del diseño de un carburador para biogás”. FIM-UNI. Lima, Perú. 2001.
5. **Huamaní Bellido, Marlon Max.** Tesis de Competencia Profesional “Diseño y construcción de un quemador de biogás para uso doméstico”. FIM-UNI. Lima, Perú. 2003.
6. **Espinoza Paredes, Rafael.** Informe Final, Proyecto de Investigación “Generación de biogás para aplicaciones termoeléctricas”. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. 2004.
7. **Espinoza Paredes, Rafael.** Informe Final, Proyecto de Investigación “Generación y uso productivo de energía final Mecánica, Térmica y Eléctrica a partir de la biomasa”. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. Agosto del 2005.
8. **Espinoza Paredes, Rafael.** Informe Final, Proyecto de Investigación “Economía de las energías Mecánica y Eléctrica obtenidas por combustión de Biogás”. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. 2006.

9. **Lira Cacho, Juan Guillermo y Contreras Paredes, Alex.** Informe Final “Regulación automática del sistema de alimentación de biogás de un motor de Combustión Interna”. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVIII-SPES). Lima, Perú. Noviembre del 2011.
10. **Lira Cacho, Juan Guillermo, Oliveros Donohue, Alfredo y Barrera Escobedo, Jhoany Jhordann.** “Sistema de alimentación de biogás para un motor de Combustión Interna”. Revista TECNICA, Vol. 13, N° 1. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 2003.
11. **Heredia Muñoz, Manuel Antonio.** Tesis de Competencia Profesional “Modelo matemático para un motor de encendido por chipa usando Biogás como combustible”. FIM-UNI. Lima, Perú. 2003.
12. **Barrera Escobedo, Jhoany Jhordann.** Tesis de Competencia Profesional “Optimización del sistema de alimentación de combustible de un motor de combustión de encendido por chispa a biogás, estacionario de 6 kW de potencia”. FIM-UNI. Lima, Perú. 2003
13. **McKinsey, S.** Tesis de Competencia Profesional. “Removal of Hydrogen sulfide from biogas using cow manure compost”. Universidad de Cornell, USA. Página 104. 2003.
14. **Oliveros Donohue, Alfredo.** “Tecnología Energética y Desarrollo”, auspiciado por el CONCYTEC, Ediciones: Tecnología y sociedad. editorial Tarea. Lima, Perú. 1990.
15. **Grupo de investigación en cooperación y desarrollo humano.** “Manual de diseño y manejo de biodigestores familiares de bajo coste - Instrucciones para la implementación y el manejo de una planta piloto en Baños del Inca, Cajamarca”, Universidad politécnica de Cataluña. Perú. Mayo del 2010.
16. **Unión Temporal ICONTEC-AENE.** “Guía de implementación de sistemas de producción de biogás”. Bogotá, Colombia. Marzo del 2003.

Referida a Motores de Combustión Interna:

17. **Von Mitzlaff, Klaus,** “Engines for Biogas”. Editorial Fried, Viewler & Sonh Braunschweig. Weisbaden, Alemania. 1998.

18. **Jóvaj, M.S.**, “Motores de Automóvil”. Editorial MIR. Moscú, Rusia. 1982.
19. **Lira Cacho, J. G., Condori Antezana, J.C.**, “Un sistema de alimentación dual GLP/gasolina de bajo costo para Motores Automotrices de pequeña cilindrada”. Revista TECNICA, Vol. 15, N°2. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Diciembre del 2005.
20. **Heywood, J. B.**, “Internal Combustion Engine Fundamentals”. Editorial McGraw Hill Inc. USA. 1988.
21. **Griгорiev E. G., Kolybaiev B. D., Erojov V. I., Zubariev A. A.**, “Automóviles a gas”. Editorial Mashinostroenie. Moscú, Rusia. 1989.
22. **Orlin A. S., Kruglov M. G.**, “Motores de combustión Interna”. Editorial Mashinostroenie. Moscú, Rusia. 1985.

Referida a Resistencia de Materiales:

23. **Shigley J. E.**, “Diseño en ingeniería mecánica”. Traducción del inglés al español, Editorial Mc. Graw Hill Interamericana. México. 1990.

Referida a Mecánica de Fluidos:

24. **Mataix Claudio**, “Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas”. Ediciones del Castillo S. A., segunda edición. Madrid, España. 1986.
25. **L. Mott Robert**, “Mecánica de fluidos”. Editorial Pearson educación, sexta edición. México. 2006.
26. **R. W. Fox, T. A. McDonald**, “Introducción a la Mecánica de fluidos”. Editorial Jhohn Wiley & Sons Inc. Segunda edición. Nueva York, USA. 1978.

Referida a Métodos Numéricos:

27. **Díaz Moreno, José Manuel, Benítez Trujillo, Francisco**, “Introducción a los Métodos Numéricos para la resolución de ecuaciones”. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, primera edición. Andalucía, España. 1998.

Referida a la incertidumbre de medición:

28. **Holman J. P.**, “Métodos Experimentales para Ingenieros”. Editorial McGraw-Hill, octava edición. New York, USA. 2012.

Referida a la calidad de energía eléctrica:

29. **INDECOPI**, “Proyecto de Norma Técnica Peruana PNTP 399.450-2003”. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales. Lima, Perú.
30. **Rodríguez Castillo, Daniel Alfredo**. Tesis de Competencia Profesional “Criterios, metodología y desarrollo de un esquema de rechazo de carga por mínima frecuencia para el sistema eléctrico peruano”. FIEE-UNI. Lima, Perú. 2008.

## ANEXO A: CATÁLOGOS DEL GRUPO ELECTRÓGENO

Tabla A.1 Especificaciones técnicas del grupo electrógeno Hyundai HY3100 LE según manual.

8. SPECIFICATION						
MODEL		HY2500L	HY3100L(E)	HY6000L(E)		
GENERATOR	Type	AVR Automatic voltage Regulation				
	AC Voltage	50/60Hz	220V,230V,240V			
	Max. Output	50Hz	2.9 Kva	3.8Kva	5.6 Kva	
		60Hz	3.2 Kva	4.2Kva	6.2Kva	
	Rated Output	50Hz	2.5 Kva	3.1 Kva	4.8 Kva	
		60Hz	2.8Kva	3.4Kva	5.3 Kva	
	Voltage Regulator	A.V.R				
	Power Factor	0.8				
DC Output	12V/10A(Optional)					
ENGINE	Model	IC160	IC200(E)	IC340E		
	Type	Air-cooled, 4 cycle, OHV, Gasoline Engine				
	Bore × Stroke	mm × mm	68 × 45	68 × 54	82 × 64	
	Displacement		163cc	196cc	337cc	
	Max. Output		5.5HP/4000rpm	6.5HP/4000rpm	11HP/4000rpm	
	Fuel	Regular Automobile Gasoline				
	Fuel tank Capacity	12 liters				
	Rated Continuous Operation	50Hz	11 hours	10 hours	10 hours	
		60Hz	9.5 hours	8hours	8hours	
	Lubricating oil	Engine Oil SD Class or Higher				
	Lubricating oil Capacity		0.6 liter		1.0 liter	
	Starting System	Recoil Starter				
	Ignition system	T.C.I.				
Spark Plug: Type		F6RTC	BPR-4ES(NGK)			
DIMENSION	Net dimension	L×W×H	545×425×440 mm		674×510×532mm	
	Overall dimension	L×W×H	560×440×460 mm		700×530×550mm	
	Net Weight		43 Kg	48 Kg	75 Kg	
	Gross Weight		45 Kg	50 Kg	78 Kg	

**Tabla A.2** Especificaciones técnicas del grupo electrógeno Hyundai HY3100LE según catálogo.

	MODELO DE GENERADOR	HY1200L <small>NEW</small>	HY3100L	HY6000LK	HY7000LK	HY7000LEK
GENERADOR	Frecuencia (Hz)	50	50	50	50	50
	Potencia Nominal	0.9 kW	2.5 kW	4.0 kW	5.0 kW	5.0 kW
	Potencia Máxima	1.0 kW	2.8 kW	4.4 kW	5.5 kW	5.5 kW
	Voltage (V)	220	220	220	220	220
	Corriente (A)	-	12.1	19.1	24	24
	Enchufes	1x16A	2x16A	2x16A	2x16A	2x16A
	Pantalla	Analógica	LED4	LED4	LED4	LED4
	Capacidad de depósito (L)	6	13	25	25	25
	Funcionamiento a 50% carga (hr.)	6.3	20	23	22	22
	Nivel de ruido a 7 Metros; 50% carga (dBA)	74	67	68	68	68
Salida corriente continua (V/A) (2)	12 / 8.3	12 / 8.3	12 / 8.3	12 / 8.3	12 / 8.3	
Batería (Ah)	-	-	-	-	14*	
MOTOR	Tipo de Motor	Gasolina	Gasolina	Gasolina	Gasolina	Gasolina
	Motor modelo	IC90	IC200	IC390	IC390	IC390E
	Potencia (HP)	2.5	6.5	13	13	13
	Modo de arranque	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual / Eléctrico
	Cilindrada (ml)	82	212	389	389	389
	Capacidad de aceite (L)	0.6	0.6	1.1	1.1	1.1
ALTERNADOR	Alternador	A1H	A3L	A4L	A5L	A5L
	Potencia nominal (kVA)	1	2.5	4	5	5
	Factor de potencia (Cosφ)	1	1	1	1	1
	Tipo de regulación del voltaje	Condensador	AVR*	AVR*	AVR*	AVR*
DATOS LOG.	Peso Neto (kg)	28	45	82	83	83
	Peso Bruto (kg)	30	48	84	85	85
		330 euros	530 euros	860 euros	950 euros	1.050 euros

**Tabla A.3** Especificaciones técnicas del motor a gasolina del grupo electrógeno.

Diesel Engine Model	IC160	IC200	IC210	IC340	IC390	IC420
Description	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
Type	OHV, tilt by 25 degree, single cylinder, air cooling and 4 stroke					
Rated output (hp/rpm)	5.5/3600	6.5/3600	6.7/3600	12.5/3600	14.5/3600	16/3600
Output (kW/rpm)	3.5/3600	3.8/3600	4.0/3600	11/3600	13/3600	15/3600
Displacement (cc)	163	196	208	337	389	420
Torque, Max. (N.m/2500rpm)	10.5	13	26.5	23.50	26.50	29.00
Bore*Stroke (mm)	68*45	68*54		82*64	88*64	95*66
Compression ratio	8.5:1			8.0:1		
Stable speed unloaded(±100r/min)	1550			1,550.00		
Speed fluctuation ratio	10%			0.10		
Noise db(A)	≤68			≤70		
Lubrication	Splash			Splash		
Rotation	Anti-clockwise (from P.T.O slide)			Anti-clockwise (from P.T.O slide)		
Valve clearance	Input valve:0.1mm-0.15mm and output 0.15mm-0.2mm			Input valve:0.1mm-0.15mm and output 0.15mm-0.2mm		
Spark plug clearance	0.6mm-0.8mm			0.6mm-0.8mm		
Air cleaner	Semi-dry/oil bath/foam filter			Semi-dry/oil bath/foam filter		
Ignition system	TCI			TCI		
Starting system	Recoil/ Electric			Recoil/ Electric		
Fuel tank capacity(L)	3.6			3.60		
Oil capacity (L)	0.6			0.60		
Fuel designation	90#			90#		
Oil designation	15W/45SAE			15W/45SAE		
Fuel consumption(g/kwh)	≤395			≤374		
Oil consumption (g/kwh)	≤6.8			≤6.8		
Dimension (L*W*H) (mm)		405*340*390		510*445*475		520*450*480
Weight (kg)	14.8	15		31.00		33.00

## ANEXO B: PROTOCOLOS DE PRUEBAS

### PROTOCOLO N° 1:

Realizado en la planta de biogás del Hipódromo de Monterrico.

PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA LA MEDICION DE DATOS DEL GRUPO ELECTROGENO FUNCIONANDO CON BIOGAS												
Altura (msnm): 197,5		T. Ambiental (°C): 20		Fecha: 1/11/2014		Hora: 2:50 p.m.		Humedad relativa: 73%		Ruido ambiente (dB): 51		
Tiempo (s)	Qcomb (m <sup>3</sup> )	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Frecuencia (Hz)	Potencia (kW)	Ruido (dB)	n (rpm)	$\lambda$	CO (%Vol)	CO <sub>2</sub> (%Vol)	CH <sub>4</sub> (ppm)	O <sub>2</sub> (%Vol)
772	0,3	223	4	60,5	0,1	74,6	3660	1,17	0,18	8,80	10800	9,68
765	0,3	228	1,8	60,5	0,4	73,6	3650	1,19	0,16	10,16	6980	7,59
679	0,3	231	3,6	60,3	0,8	74,1	3640	1,20	0,12	11,89	2140	5,18
632	0,3	231	5,5	60,1	1,3	74,2	3612	1,16	0,09	12,84	960	3,80
590	0,3	230	7,3	59,3	1,7	75,5	3592	1,12	0,06	13,51	560	2,94
529	0,3	228	8,2	59,1	1,9	76,0	3560	1,09	0,05	14,04	420	2,14
574	0,3	228	8,7	58,7	2,0	76,4	3528	1,09	0,05	14,05	360	2,20



**PROTOCOLO N° 2:**

Realizado en el taller de la empresa “TRADING LUIS CAR & MOTOR S.A.C.”.

<b>PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA LA MEDICION DE DATOS DEL GRUPO ELECTROGENO FUNCIONANDO CON GASOLINA</b>												
<b>Altura (msnm): 276,5</b>		<b>T. Ambiental (°C): 18</b>		<b>Fecha: 6/11/2014</b>		<b>Hora: 8:10 p.m.</b>		<b>Humedad: 83%</b>		<b>Ruido ambiente (dB): 51</b>		
<b>Tiempo (s)</b>	<b>Qcomb (mL)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Amperaje (A)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Ruido (dB)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>CO (%Vol)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%Vol)</b>	<b>HC (ppm)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%Vol)</b>
23	5	224	0	61,5	0,1	70,8	3735	1,006	7,41	6,68	291	5,45
24	5	228	1,8	59,8	0,4	71	3605	1,026	5,45	8,65	261	4,33
18,36	5	232	3,7	60	0,9	72	3604	0,979	5,59	9,31	301	3,46
16,52	5	232	5,5	60	1,3	72,8	3588	0,908	6,25	9,69	271	2,26
14,28	5	231	7,4	59,5	1,7	73,5	3587	0,836	6,74	10,56	277	0,62
12,85	5	230	9,2	59,3	2,1	75,2	3571	0,804	7,39	10,47	272	0,14
10,71	5	229	11	59,5	2,5	74,8	3580	0,823	6,62	10,95	256	0,12

## ANEXO C: EQUIVALENCIA DE SIMBOLOGÍA

Tabla C.1 Simbología utilizada en el programa de cálculo y en el diagrama de flujo.

Simbología utilizada en el programa	Simbología utilizada en el diagrama de flujo	Designación
Do	$D_o$	Diámetro de entrada al mezclador
d2mezclador	$d_g$	Diámetro de la garganta del mezclador
d3	$d_3$	Diámetro interior del tubito surtidor
d4	$d_4$	Diámetro interior de la tubería que conecta el regulador con el mezclador
d	$d_{eje}$	Diámetro del eje de la mariposa
Dmar	$D_{mar}$	Diámetro de la válvula mariposa
dag	$d_{aguj}$	Diámetro de los agujeros del mezclador
Docarb	$D_{ocarb}$	Diámetro de entrada al carburador de gasolina
d1carb	$d_{gcarb}$	Diámetro de la garganta del carburador de gasolina
cdaguj	$C_{daguj}$	Coefficiente de descarga de los agujeros del mezclador
cdh	$C_{dmez}$	Coefficiente de descarga del mezclador en toda su longitud
cd3i	$C_{d_{obt}}$	Coefficiente de descarga del pico surtidor u obturador
cd11(j)	$C_{dcarb_j}$	Coefficiente de descarga del carburador de gasolina para un determinado ángulo de apertura de la válvula mariposa
cd111	$C_{dcarbmax}$	Coefficiente de descarga del carburador de gasolina para el máximo ángulo de apertura de la mariposa
csi111	$C_{r1}$	Coefficiente de resistencia al flujo de la parte convergente del mezclador
csi222	$C_{r2}$	Coefficiente de resistencia al flujo de la parte divergente del mezclador
Lm	$L_{mez}$	Longitud total del mezclador
Lp0	$L_{p0}$	Longitud de la parte cilíndrica del mezclador
L1	$L_1$	Longitud total de las partes convergente y divergente del mezclador
x03, x04	$x$	Contracción previa que sufre el resorte de máxima carga o de mínima carga.
hv3(i)	$h_v$	Altura de levantamiento del obturador

h03	$h_o$	Altura máxima de levantamiento del obturador
Aefmez	$A_{efmez}$	Área efectiva del mezclador
Asal	$A_{sal}$	Área efectiva equivalente entre la salida el regulador dosificador y la garganta del mezclador
Aag	$A_{aguj}$	Área total de los agujeros del mezclador
Ar3(i)	$A_r$	Área efectiva equivalente de paso de la tubería de alimentación de biogás hacia el regulador o sección de paso del obturador
Ageom(j)	$A_{carb j}$	Área de paso a través de la válvula mariposa del carburador
Aef(j)	$A_{ef j}$	Área efectiva de paso a través de la válvula mariposa del carburador
Aefmax	$A_{efmax}$	Área efectiva de paso a través de la válvula mariposa del carburador para el máximo ángulo de apertura de la mariposa
Aefe	$A_{eftotal}$	Área efectiva equivalente total entre el mezclador de biogás y el carburador de gasolina
alpha1	$\alpha$	Ángulo de la parte convergente del mezclador o ángulo de ingreso del mezclador
alpha2	$\beta$	Ángulo de la parte divergente del mezclador o ángulo de salida del mezclador
PSIo	$\psi_o$	Ángulo mínimo para el cual la mariposa está totalmente cerrada o ángulo de cierre de la mariposa
PSImax	$\psi_{max}$	Ángulo máximo para el cual la válvula mariposa está totalmente abierta o ángulo máximo de apertura de la mariposa
phi(j)	$\psi_j$	Ángulo de apertura de la válvula mariposa
Qo	$\dot{V}_a$	Flujo volumétrico de aire que ingresa al motor
Ga	$\dot{m}_a$	Flujo másico de aire que ingresa al motor
Qm	$\dot{V}_m$	Flujo volumétrico de la mezcla aire-biogás que ingresa al motor
Qcomb(i)	$\dot{V}_{comb}$	Flujo volumétrico de biogás que ingresa al motor
rhobiogas	$\rho_g$	Densidad del biogás
rho	$\rho_{aire}$	Densidad del aire
PK1	$p_k$	Presión después de la válvula mariposa

palim	$p_{alim}$	Presión de suministro o alimentación de biogás al motor
p3r(i)	$p_r$	Presión interna del regulador
Po	$p_0$	Presión ambiental
delta_P_mezc	$\Delta p_{mez}$	Caída de presión que produce el flujo de mezcla aire-biogás al pasar por la garganta del mezclador
delta_pc(i)	$\Delta p_r$	Caída de presión dentro del regulador que produce la succión del motor al descender el pistón
Talim	$T_{alim}$	Temperatura de suministro o alimentación de biogás al motor
To	$T_0$	Temperatura ambiental
etav	$\eta_v$	Eficiencia volumétrica
Nnom	$n_{nom}$	Velocidad de rotación nominal del motor
N	$n$	Velocidad de rotación del motor
Nmax_aguj	$N_{max,aguj}$	Número máximo de agujeros del mezclador
Nag	$N_{aguj}$	Número de agujeros del mezclador
ic	$N_{cil}$	Número de cilindros del motor
u3, u4	$u$	Relación de brazos de palanca del resorte de máxima carga o de mínima carga
rL	$r_L$	Fracción de la longitud divergente a la longitud total del mezclador sin considerar la parte cilíndrica
rD	$r_d$	Relación de diámetros de la entrada al mezclador a la garganta del mezclador
rN	$r_N$	Fracción de la velocidad de rotación del motor a la velocidad de rotación nominal del motor
rA	$r_A$	Relación de áreas de apertura de la mariposa con respecto a la máxima apertura o área relativa de paso a través de la válvula de mariposa del carburador
w	$w$	Factor de empeoramiento del coeficiente de descarga del mezclador que toma en cuenta la limpieza del filtro y otras pérdidas secundarias del sistema de admisión
Vhi	$Cil$	Cilindrada del motor
k	$k$	Exponente adiabático del aire
Rair	$R_a$	Constante particular del aire
AA	$A$	Coefficiente empírico de la ecuación 4.18

BB	$B$	Coficiente empírico de la ecuación 4.18
a	$a$	Coficiente que considera la pulsación de la depresión en el conducto de admisión, referente a la ecuación 4.19
xai	$x_{ai}$	Límite inferior del intervalo donde posiblemente se encuentre la raíz de la función a resolver
xbi	$x_{bi}$	Límite superior del intervalo donde posiblemente se encuentre la raíz de la función a resolver
xr(i)	$x_{ri}$	Aproximación a la raíz de la función a resolver
ea(i)	$err_i$	Porcentaje de error obtenido en aproximaciones sucesivas a la raíz de la función a resolver
tol	$tol$	Porcentaje de tolerancia aceptable ingresado como dato
lambda		Coficiente de exceso de aire
Ne		Potencia eléctrica del grupo con biogás
Ne_nom_gasol		Potencia eléctrica nominal del grupo con gasolina
Ne_Ne_nom_gasol		Relación de la potencia eléctrica nominal del grupo con gasolina a la potencia eléctrica del grupo con biogás.
ge		Consumo específico de biogás.
Re		Número de Reynolds del biogás en la sección de la tubería de entrada al regulador
v		Velocidad de alimentación de biogás en la sección de la tubería de entrada al regulador
efigasol		Eficiencia efectiva del grupo electrógeno funcionando con gasolina
efigas		Eficiencia efectiva del grupo electrógeno funcionando con biogás
fpc		Factor de corrección que toma en cuenta las pérdidas de la combustión y la eficiencia de generación eléctrica

## ANEXO D: PROGRAMAS DE CÁLCULO

### Programa principal biogasnew.m:

```

clear;clc;

Mezclador=0;% "1" si es simple, "0" si es aerodinámico

%Constantes empíricas para el cálculo de la eficiencia volumétrica:
etav=A+B*Pk1
AA=-5.5;%A y B son constantes empíricas
BB=8.3e-4;

%Condiciones ambientales
To=298;%Temperatura ambiental (k)
Po=1.01e5;%presión atmosférica, en Pascal
rho=Po/1000/(0.287*To);%densidad del aire
k=1.40;%exponente adiabático del aire

%datos del motor

Nnom=3600;%velocidad nominal
rN=1;%relacion de velocidades con respecto a la nominal
rA=1;%relacion de áreas de la mariposa con respecto a la nominal
ic=1;%numero de cilindros
Vhi=0.196e-3;%cilindrada en m3
S_D=0.794;
S=(S_D^2*Vhi/ic*4/pi)^(1/3);
PSIo=4;%ángulo mínimo de la mariposa
d=2.0e-3;%diámetro del eje de la mariposa
w=1;%factor de empeoramiento de Cd del carburador que toma en cuenta el
filtro y otras pérdidas secundarias del sistema de admisión
efigasol=0.155;%eficiencia del motor a gasolina

%datos del mezclador

Do=22.5e-3;%Diámetro de entrada del mezclador
d2mezclador=15.3e-3;%Diámetro de la garganta del mezclador
Cdaguj=0.5;%coeficiente de descarga de los agujeros del mezclador
dag=3.2e-3;%diámetro de los agujeros
Ag=pi*d2mezclador^2/4;%área de la garganta del mezclador
if Mezclador==1
nn=4;% grado del polinomio
rd=[0.2 0.3 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 0.65 0.7 0.75 0.8 0.85];%relación de
diámetros del mezclador
Cdh=w*[0.595 0.6 0.607 0.615 0.623 0.637 0.652 0.67 0.692 0.722 0.763
0.824];%coeficiente de descarga del mezclador
Cdh1=polyfit(rd,Cdh,nn);%coeficiente de descarga del mezclador
rd=d2mezclador/Do;%relación de diámetros del mezclador

```

```

Cdh=polyval(Cdh1,rd);%coeficiente de descarga del mezclador
else
rL=0.80;%fracción de la parte divergente
Lm=5.04e-2;%(Do-d2mezclador)/2*7 %Longitud del mezclador
[alpha1,alpha2,Cdh,Lp0,csi111,csi222]=venturi2(d2mezclador,Do,w,Lm,rL);
%%Subrutina
end
Aefmez=Ag*Cdh;%Area efectiva del mezclador
[Do,d1carb,etav,Ga,PK]=efvolnew3(Nnom,rN,rA,ic,Vhi,PSIo,d,To,Po,k,AA,BB
,Aefmez);%Subrutina para el cálculo de la eficiencia volumétrica
Qo=Ga/rho;%caudal original de aire

%Datos del Biogás
fCH4=0.67;%fracción de metano
fCO2=1-fCH4;%fracción de dióxido
Rbiogas=8.314/(fCH4*16+fCO2*44);%constante del Biogás
rhobiogas=Po/1000/(Rbiogas*To);%densidad del Biogás
Lo=9.524*fCH4;%relación estequiométrica volumétrica
palim=1;%Presion de alimentación en cm H2O
Palim=Po+palim*(1.013e5/1033);%presión en el tanque
Talim=To;% Temperatura de alimentación
Qh=fCH4*50.010*Po*0.001/(8.314/16*To);%poder calorífico del Biogás, en
MJ/m3
fpc=0.68;%factor que toma en cuenta las pérdidas de la combustión

%datos del regulador
Dm3=130e-3;%diámetro de la membrana (m)
Am3=(pi*Dm3^2/4);%área de la membrana (m2)
alpham3=1;%constante de la membrana
d3=16.1e-3;%diametro del agujero del surtidor (m)
Cd3i=0.7;%coeficiente de descarga del obturador o válvula
h03=12e-3;%máxima apertura de la válvula (m)
alphav3=1.1;%constante de la válvula
a3=21e-3;%brazo de palanca (m)
b3=36e-3;%brazo de palanca (m)
u3=b3/a3;%relación de brazos de palanca
dres3=1e-3;%diámetro del alambre del resorte de máxima(m)
Dres3=14.5e-3;%diámetro del resorte (m)
Nres3=11;%número de espiras
G=8.14e10;%módulo de corte del resorte N/mm^2
kres3=dres3^4*G/(8*Dres3^3*Nres3);%constante del resorte
x03=1.9e-3;%compresión previa del resorte
Qv3=kres3*x03;%pre-carga del resorte
d4=21.4e-3;%diámetro de la tubería hacia el mezclador
Cd4=1;%coeficiente de descarga de la tubería hacia el mezclador

%Resorte de mínima

c=17e-3;%brazo de palanca (m)
u4=c/a3;%relación de brazos de palanca
dres4=0.8e-3;%diámetro del alambre del resorte (m)
Dres4=13.4e-3;%diámetro del resorte (m)

```

```

Nres4=5;%número de espiras
kres4=dres4^4*G/(8*Dres4^3*Nres4);%constante del resorte (N/m)
x04=1.9e-3;%compresión previa del resorte (m)
Qv4=kres4*x04;%pre-carga del resorte (N)

%Cálculo del caudal de la mezcla aire+Biogás

Qm=Qo;%Caudal de mezcla aire gas
Qm_Qo=Qm/Qo;%relación de caudales de mezcla y de aire original
PK1=1/BB*(100*Qm_Qo*etav-AA);%presión detrás de la válvula de mariposa
delta_P_mezc=((Qm/(1+1/Lo))/(Cdh*Ag))^2*rho/2;%caída de presión en la
garganta del mezclador, en Pascal

%Cálculos del reductor
i=1;
Cd3(i)=Cd3i;
Aa3=pi*d3^2/4;%área del surtidor
Aa4=pi*d4^2/4;%área de la tubería hacia el mezclador
Nmax_aguj=round(d2mezclador*pi/(2*dag));%Número máximo de agujeros del
mezclador
delta_pc(i)=0;%presión manométrica del regulador (valor inicial), en
Pascal,
p3r(i)=Po+delta_pc(i);%presión absoluta del regulador (valor inicial),
en Pascal,
Qcomb(i)=Qm/(Lo+1);%caudal de combustible (referencial), en m^3/s
Asal=Qcomb(i)/((2/rhobiogas)*(delta_pc(i)+delta_P_mezc))^0.5;%área
equivalente entre el regulador y el mezclador
Aag=(1/Cdaguj)*(Asal^-2-(Aa4*Cd4)^-2)^-0.5;%área total de los agujeros
Nag=round(Aag/((pi/4*dag^2)));%Número exacto de agujeros
if Nag>Nmax_aguj
    Nag=Nmax_aguj;
else
end
Aag=Nag*pi*dag^2/4;%área total de los agujeros
Asal=((Aag*Cdaguj)^-2+(Aa4*Cd4)^-2)^-0.5;%área equivalente entre el
regulador y el mezclador
Qcomb(i)=Asal*(2/rhobiogas)^0.5*(delta_pc(i)+delta_P_mezc)^0.5;%Caudal de
combustible
while i<=8
Ar3(i)=Qcomb(i)/(2/rhobiogas*(Palim-p3r(i)))^0.5;%área equivalente de
paso del obturador
if i==1
    hv3(i)=1/(Cd3(i)*pi*d3)*(Ar3(i)^-2)^-0.5;%levantamiento del
obturador
else
    hv3(i)=1/(Cd3(i)*pi*d3)*(Ar3(i)^-2-(Aa3)^-2)^-0.5;%levantamiento
del obturador
end
[Cd3(i)]=c_descarga(hv3(i));
if hv3(i)>h03 %cuando el vacío es muy alto
    hv3(i)=h03;
    p3r(i)=Palim-rhobiogas/2*(Qcomb(i)/((pi*d3*h03*Cd3(i))^2+(Aa3)^-
2)^-0.5)^2;%Presión absoluta en la cavidad del regulador

```



```

elseif hv3(i)<=0 %cuando el obturador está cerrado
    hv3(i)=0;
    p3r(i)=Po-delta_P_mezc;
else
    x3(i)=hv3(i)*u3;%cuando el vacío es intermedio
    p3r(i)=((Qv3-kres3*x3(i))*u3-
(Qv4+kres4*hv3(i)*u4)*u4+Po*alphan3*Am3*u3+Palim*alphav3*Aa3)/(alphan3*
Am3*u3+alphav3*Aa3);
    end
i=i+1;
Cd3(i)=Cd3(i-1);
hv3(i)=hv3(i-1);
p3r(i)=p3r(i-1);
delta_pc(i)=p3r(i)-Po;
Qcomb(i)=(Asal^-2+(pi*d3*hv3(i)*Cd3(i))^-2+(Aa3)^-2)^-
.5*(2/rhobiogas)^.5*(Palim+delta_P_mezc-Po)^.5;
end
format long
lambda=(Qm/Qcomb(i-1)-1)/Lo%Coeficiente lambda
d3
d4
hv3=hv3(i-1)
Asal;
dag
Nmax_aguj
Nag
p3r=p3r(i-1)
delta_pc=p3r-Po;
efigas=fpc*(-0.7308*lambda^2+1.6525*lambda-0.5819);
Vmp=S*Nnom*rN/30;
ppm=(0.05+0.0155*Vmp)*1e3;
Ne=Qcomb(i-1)*Qh*efigas*1000-ppm*Vhi*Nnom*rN/120
Ne_nom_gasol=Ga/14.7*efigasol*44000 %potencia del motor a gasolina
Ne_Ne_nom_gasol=Ne/Ne_nom_gasol
Qcomb=Qcomb(i-1)*3600
ge=Qcomb/Ne

%Cálculo de la velocidad de alimentación del biogás y del número de
Reynolds
vv=2;
T=[263 273 283 293 303 313 323 333 343 353 363 373 383 393];
visCH4=[1.2208e-5 1.2814e-5 1.3318e-5 1.3726e-5 1.4251e-5 1.4616e-5
1.4941e-5 1.5496e-5 1.5618e-5 1.5861e-5 1.5777e-5 1.6122e-5 1.6146e-5
1.64e-5];
visCO2=[1.4874e-5 1.5797e-5 1.6639e-5 1.7324e-5 1.7939e-5 1.8711e-5
1.9344e-5 1.9795e-5 2.0297e-5 2.058e-5 2.1005e-5 2.1271e-5 2.1622e-5
2.19e-5];
visBIO=1./(fCH4*(1./visCH4)+fCO2*(1./visCO2));
VIS1=polyfit(T,visBIO,vv);
VIS=polyval(VIS1,Talim);
Re=4*Qm/(pi*d4*(VIS/rhobiogas))
V=(Qcomb/3600)/(rhobiogas*(pi*d3^2/4))

```

```

%Calculo de lambda para diferentes cargas y velocidades
rA=0.05:0.05:1;%relación de áreas de la mariposa con respecto a la
nominal
tt=1;%contador de la relación de areas
while tt<=20%(0.95/0.05+1)
rN=0.25:0.05:1;%relación de velocidades con respecto a la nominal
ww=1;%contador de la relación de velocidades
www=(1-0.25)/0.05+1;
while ww<=www
[Do,d1carb,etav(ww),Ga(ww),PK(ww)]=efvolnew3(Nnom,rN(ww),rA(tt),ic,Vhi,
PSIo,d,To,Po,k,AA,BB,Aefmez);
Qo(ww)=Ga(ww)/rho;%caudal original de aire para diferentes cargas y
velocidades
Qm(ww)=Qo(ww);
Qm_Qo(ww)=Qm(ww)/Qo(ww);
PK1(ww)=1/BB*(100*Qm_Qo(ww)*etav(ww)-AA);
delta_P_mezc(ww)=((Qm(ww)/(1+1/(Lo)))/(Cdh*Ag))^2*rho/2;%caida de
presión en la garganta del mezclador, en Pascal
i=1;
Cd3(i)=Cd3i;
delta_pc(i)=0;%presión manometrica del regulador (referencial), en bar,
p3r(i)=Po+delta_pc(i);%presión absoluta del regulador (referencial), en
Pascal,
Qcomb(i)=Asal*(2/rhobiogas)^.5*(delta_pc(i)+delta_P_mezc(ww))^-.5;
while i<=8
Ar3(i)=Qcomb(i)/((2/rhobiogas*(Palim-p3r(i)))^-.5);%área equivalente de
paso del obturador
if i==1
hv3(i)=1/(Cd3(i)*pi*d3)*(Ar3(i)^-2)^-.5;%levantamiento del obturador
else
hv3(i)=1/(Cd3(i)*pi*d3)*(Ar3(i)^-2-(Aa3)^-2)^-.5;%levantamiento
del obturador
end
[Cd3(i)]=c_descarga(hv3(i));
if hv3(i)>h03
hv3(i)=h03;
p3r(i)=Palim-rhoGNV/2*(Qcomb(i)/((pi*d3*h03*Cd3(i))^-2+(Aa3)^-2)^-
.5)^2;%Presión absoluta en la cavidad del regulador
elseif hv3(i)<=0
hv3(i)=0;
p3r(i)=Po-delta_P_mezc(ww);
else
x3(i)=hv3(i)*u3;
p3r(i)=((Qv3-kres3*x3(i))*u3-
(Qv4+kres4*hv3(i)*u4)*u4+Po*alphan3*Am3*u3+Palim*alphav3*Aa3)/(alphan3*
Am3*u3+alphav3*Aa3);
end
i=i+1;
hv3(i)=hv3(i-1);
Cd3(i)=Cd3(i-1);
p3r(i)=p3r(i-1);
delta_pc(i)=p3r(i)-Po;%presión manométrica del regulador

```

```

    Qcomb(i)=(Asal^-2+(pi*d3*hv3(i)*Cd3(i))^-2+(Aa3)^-2)^-
    .5*(2/rhobiogas)^.5*(Palim+delta_P_mezc(ww)-Po)^.5;
end
H03(ww)=h03;
HV3(ww)=hv3(i);
P3R(ww)=p3r(i);
delta_pc(ww)=delta_pc(i);
Qcombu(ww)=Qcomb(i);
lambda(ww)=(Qm(ww)/Qcombu(ww)-1)/Lo;%lambda
efigas(ww)=fpc*(-0.7308*lambda(ww)^2+1.6525*lambda(ww)-0.5819);
Vmp(ww)=S*Nnom*rN(ww)/30;
ppm(ww)=(0.05+0.0155*Vmp(ww))*1e3;
Ne(ww)=Qcombu(ww)*(Qh)*efigas(ww)*1000-
ppm(ww)*Vhi*ic*Nnom*rN(ww)/120;%Potencia en kW
if Ne(ww)<0
    Ne(ww)=0;
else
end
ge(ww)=Qcombu(ww)/Ne(ww)*3600;
Re(ww)=4*Qm(ww)/(pi*d4*(VIS/rhobiogas));
V(ww)=(Qcombu(ww))/(rhobiogas*(pi*d3^2/4));
ww=ww+1;
end
if tt==1
    Qo1=[Qo];
    RE=[H03];
    PK11=[PK1];
    etav1=[etav];
    ge1=[ge];
    rN1=[rN];
    Ne1=[Ne];
    HV31=[HV3];
    P3R1=[P3R];
    delta_pc1=[delta_pc];
    delta_P_mezc1=[delta_P_mezc];
    Qcombu1=3600*[Qcombu];
    Qm1=[Qm];
    lambda1=[lambda];
    Ne181=Ne(16);
    etav181=etav(16);
    lambda181=lambda(16);
    Re181=Re(16);
    V181=V(16);
    ge181=ge(16);
    Qcombu181=3600*Qcombu(16);
elseif tt==2
    PK12=[PK1];
    etav2=[etav];
    ge2=[ge];
    rN2=[rN];
    Ne2=[Ne];
    HV32=[HV3];
    P3R2=[P3R];

```

```

delta_pc2=[delta_pc];
delta_P_mezc2=[delta_P_mezc];
Qcomb2=3600*[Qcombu];
Qm2=[Qm];
lambda2=[lambda];
Ne182=Ne(16);
etav182=etav(16);
lambda182=lambda(16);
Re182=Re(16);
V182=V(16);
ge182=ge(16);
Qcombu182=3600*Qcombu(16);
elseif tt==5
PK15=[PK1];
etav5=[etav];
ge5=[ge];
rN5=[rN];
Ne5=[Ne];
HV35=[HV3];
P3R5=[P3R];
delta_pc5=[delta_pc];
delta_P_mezc5=[delta_P_mezc];
Qcomb5=3600*[Qcombu];
Qm5=[Qm];
lambda5=[lambda];
Ne185=Ne(16);
etav185=etav(16);
lambda185=lambda(16);
Re185=Re(16);
V185=V(16);
ge185=ge(16);
Qcombu185=3600*Qcombu(16);
elseif tt==6
PK16=[PK1];
etav6=[etav];
ge6=[ge];
rN6=[rN];
Ne6=[Ne];
HV36=[HV3];
P3R6=[P3R];
delta_pc6=[delta_pc];
delta_P_mezc6=[delta_P_mezc];
Qcomb6=3600*[Qcombu];
Qm6=[Qm];
lambda6=[lambda];
etav186=etav(16);
Ne186=Ne(16);
lambda186=lambda(16);
Re186=Re(16);
V186=V(16);
ge186=ge(16);
Qcombu186=3600*Qcombu(16);
elseif tt==10

```

```

PK110=[PK1];
etav10=[etav];
ge10=[ge];
rN10=[rN];
Ne10=[Ne];
HV310=[HV3];
P3R10=[P3R];
delta_pc10=[delta_pc];
delta_P_mezc10=[delta_P_mezc];
Qcomb10=3600*[Qcombu];
Qm10=[Qm];
lambda10=[lambda];
etav1810=etav(16);
Ne1810=Ne(16);
lambda1810=lambda(16);
Re1810=Re(16);
V1810=V(16);
ge1810=ge(16);
Qcombu1810=3600*Qcombu(16);
elseif tt==20
PK120=[PK1];
etav20=[etav];
ge20=[ge];
rN20=[rN];
Ne20=[Ne];
HV320=[HV3];
P3R20=[P3R];
delta_pc20=[delta_pc];
delta_P_mezc20=[delta_P_mezc];
Qcomb20=3600*[Qcombu];
Qm20=[Qm];
lambda20=[lambda];
Ne1820=Ne(16);
etav1820=etav(16);
lambda1820=lambda(16);
Re1820=Re(16);
V1820=V(16);
ge1820=ge(16);
Qcombu1820=3600*Qcombu(16);
else
end
tt=tt+1;
end
Ne18=[Ne181 Ne182 Ne185 Ne186 Ne1810 Ne1820];
lambda18=[lambda181 lambda182 lambda185 lambda186 lambda1810
lambda1820];
etav18=[etav181 etav182 etav185 etav186 etav1810 etav1820];
Re18=[Re181 Re182 Re185 Re186 Re1810 Re1820];
V18=[V181 V182 V185 V186 V1810 V1820];
ge18=[ge181 ge182 ge185 ge186 ge1810 ge1820];
Qcombu18=[Qcombu181 Qcombu182 Qcombu185 Qcombu186 Qcombu1810
Qcombu1820];

```

```

figure(1);plot(rN1,etav1,rN2,etav2,rN5,etav5,rN6,etav6,rN10,etav10,rN20
,etav20);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('nv');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Eficiencia volumétrica vs relación de
velocidades respecto a la nominal');
figure(2);plot(rN1,lambda1,rN2,lambda2,rN20,lambda20);xlabel('rN=N/Nnom
');ylabel('lambda');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=1','Location','NorthEastOutside');titl
e('Coeficiente de exceso de aire vs relación de velocidades respecto a
la nominal');
figure(3);plot(rN1,Qcomb1,rN2,Qcomb2,rN5,Qcomb5,rN6,Qcomb6,rN10,Qcomb10
,rN20,Qcomb20);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Qcomb (m^3/h)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Caudal de combustible vs relación de
velocidades respecto a la nominal');
figure(4);plot(rN1,Ne1,rN2,Ne2,rN5,Ne5,rN6,Ne6,rN10,Ne10,rN20,Ne20);xla
bel('rN=N/Nnom');ylabel('Ne (kW)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Potencia efectiva del motor vs relación
de velocidades respecto a la nominal');
figure(5);plot(rN1,P3R1,rN2,P3R2,rN5,P3R5,rN6,P3R6,rN10,P3R10,rN20,P3R2
0);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Pr (Pa)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Presión en el regulador vs relación de
velocidades respecto a la nominal');
figure(6);plot(rN1,PK11,rN2,PK12,rN5,PK15,rN6,PK16,rN10,PK110,rN20,PK12
0);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Pk (Pa)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Presión después de la mariposa vs
relación de velocidades respecto a la nominal');
figure(7);plot(rN1,HV31,rN2,HV32,rN5,HV35,rN6,HV36,rN10,HV310,rN20,HV32
0,rN1,RE);axis([0 1 0 13e-3]);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Hv (m)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Levant
amiento máximo','Location','NorthEastOutside');title('Levantamiento del
obturador vs relación de velocidades respecto a la nominal');
figure(8);plot(rN1,delta_P_mezc1,rN2,delta_P_mezc2,rN5,delta_P_mezc5,rN
6,delta_P_mezc6,rN10,delta_P_mezc10,rN20,delta_P_mezc20);xlabel('rN=N/N
nom');ylabel('Pg (Pa)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Caída de presión en la garganta del
mezclador vs relación de velocidades respecto a la nominal');
figure(9);plot(rN1,ge1,rN2,ge2,rN5,ge5,rN6,ge6,rN10,ge10,rN20,ge20);xla
bel('rN=N/Nnom');ylabel('Ge (m^3/kWh)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=0.25','rA=0.3','rA=0.5','rA=1','Locati
on','NorthEastOutside');title('Consumo específico vs relación de
velocidades respecto a la nominal');
figure(10);plot(rN1,P3R1-Po,rN2,P3R2-Po,rN20,P3R20-
Po);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Pr (Pa)');grid
on;legend('rA=0.05','rA=0.1','rA=1','Location','NorthEastOutside');titl
e('Presión manométrica en el regulador vs relación de velocidades
respecto a la nominal');

```

```

figure(11);plot(Ne18,lambda18);xlabel('Ne (kW)');ylabel('lambda');grid
on;title('Coeficiente de exceso de aire vs Potencia efectiva del
motor');
figure(12);plot(rN1,Qo1);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('Qm (m^3/s)');grid
on;title('Caudal de la mezcla vs relación de velocidades respecto a la
nominal');
figure(13);plot(rN20,lambda20);xlabel('rN=N/Nnom');ylabel('lambda');grid
on;legend('rA=1', 'Location', 'NorthEastOutside');title('Coeficiente de
exceso de aire vs relación de velocidades respecto a la nominal');
figure(14);plot(Ne18,Re18);xlabel('Ne (kW)');ylabel('Re');grid
on;title('Número de Reynolds de la mezcla vs Potencia efectiva del
motor');
figure(15);plot(Ne18,V18);xlabel('Ne (kW)');ylabel('V (m/s)');grid
on;title('Velocidad de alimentación de biogás vs Potencia efectiva del
motor');
figure(16);plot(Ne18,ge18);xlabel('Ne (kW)');ylabel('Ge
(m^3/kWh)');grid on;title('Consumo específico vs Potencia efectiva del
motor');
figure(17);plot(Ne18,Qcomb18);xlabel('Ne (kW)');ylabel('Qcomb
(m^3/h)');grid on;title('Caudal de combustible vs Potencia efectiva del
motor');
Cdh%coeficiente de descarga del mezclador
Lm%longitud del mezclador
Lp0%longitud de la parte cilíndrica
alpha1%ángulo de la parte convergente del mezclador
alpha2%ángulo de la parte divergente del mezclador

```

### Subprograma venturi2.m:

```

function[alpha1,alpha2,Cdh,Lp0,csi111,csi222]=venturi2(d2mezclador,Do, .
..
    w,Lm,rL)
Lp0=d2mezclador;
L1=Lm-Lp0;
zz=2;
alpha1=2*atan(((Do-d2mezclador)/2)/((1-rL)*L1))*180/pi;%ángulo de la
parte convergente
rD=[1.4 1.6 1.8 2 2.4 3 10];
csia=[0.068 0.062 0.060 0.062 0.067 0.078 0.080; 0.068 0.062 0.060
0.062 0.067 0.078 0.080; 0.096 0.108 0.119 0.126 0.135 0.136 0.136;...
0.126 0.147 0.160 0.172 0.184 0.188 0.188 ;0.147 0.186 0.208
0.220 0.228 0.235 0.235; 0.172 0.220 0.250 0.265 0.276 0.278 0.278;
0.217 0.276 0.324 0.347 0.362 0.363 0.363];
alpha=[50 60 76 90 105 120 150];
i=0;
while(i<8)
    i=i+1;
    if alpha1>=alpha(i) & alpha1<alpha(i+1)
        break
    end

```

```

end
csi=csia(i,:)+(csia(i+1,:)-csia(i,:))*(alpha1-alpha(i))/(alpha(i+1)-
alpha(i));
a1=polyfit(rD,csi,zz);
rD=Do/d2mezclador;
csi111=polyval(a1,rD);
alpha2=2*atan((Do-d2mezclador)/2)/(rL*L1))*180/pi;%ángulo de la parte
divergente
rD=[1.1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.5 3 10];
csia=[0.01 0.02 0.02 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03; 0.01 0.02 0.03 0.04
0.04 0.04 0.04 0.04 0.05; 0.03 0.04 0.06 0.07 0.07 0.07 0.08 0.08 0.08;
0.05 0.09 0.12 0.14 0.15 0.16 0.16 0.16 0.16;...
0.10 0.16 0.23 0.26 0.28 0.29 0.30 0.31 0.31; 0.13 0.21 0.30 0.35
0.37 0.38 0.39 0.40 0.40; 0.16 0.25 0.36 0.42 0.44 0.46 0.48 0.48 0.49;
0.18 0.29 0.41 0.47 0.50 0.52 0.54 0.55 0.56;...
0.19 0.31 0.44 0.51 0.54 0.56 0.58 0.59 0.60; 0.20 0.33 0.47 0.54
0.58 0.60 0.62 0.63 0.64; 0.21 0.35 0.50 0.57 0.61 0.63 0.65 0.66 0.67;
0.23 0.37 0.53 0.61 0.65 0.68 0.70 0.71 0.72];
alpha=[2 6 10 15 20 25 30 35 40 45 50 60];
i=0;
while(i<13)
    i=i+1;
    if alpha2>=alpha(i) & alpha2<alpha(i+1)
        break
    end
end
csi22=csia(i,:)+(csia(i+1,:)-csia(i,:))*(alpha2-alpha(i))/(alpha(i+1)-
alpha(i));
a2=polyfit(rD,csi22,zz);
rD=Do/d2mezclador;
csi222=polyval(a2,rD);
Lm=(Do-d2mezclador)/2*(1/tan(alpha1*pi/360)+1/tan(alpha2*pi/360))+Lp0;
Cdh=w/(1+csi111+csi222)^.5;

```

### Subprograma efvolve3.m:

```

function [Docarb,d1carb,etav,Ga,PK1]=efvolve3(Nnom,rN,rA,ic,Vhi,...
    PSIo,d,To,Po,k,AA,BB,Aefmez)
n=4;
ii=[1 2 3 4 6 8];%número de cilindros
a=[24.2 17.1 14.15 13 11.9 11.5];

a3=polyfit(ii,a,n);
a=polyval(a3,ic);
Dmar=a*(Nnom*Vhi)^0.5/1000;%diámetro del alojamiento de la mariposa
Ath=pi*Dmar^2/4;%área de este alojamiento
Docarb=1.5*Dmar;%diámetro de entrada del carburador
d1carb=0.8*Dmar;%diámetro de la garganta del venturi del carburador
Rdiam=d/Dmar;

```



```

PSImax=acos(Rdiam*cos(PSIo*pi/180))*180/pi;%ángulo máximo de la
mariposa
phi=[PSIo 10 20 30 40 50 60 70 80 PSImax];%ángulo de la mariposa
Cd=[0.00 0.03 0.07 0.12 0.2 0.3 0.44 0.6 0.77 0.94];
a10=polyfit(phi,Cd,n);
Cd=polyval(a10,phi);%coeficiente de descarga del carburador
Cd111=polyval(a10,PSImax);
Aefmax=Cd111*Ath*(1-
cos(acos(Rdiam*cos(PSIo*pi/180)))/cos(PSIo*pi/180)+2/pi*(Rdiam/cos(acos
(Rdiam*cos(PSIo*pi/180)))*(cos(acos(Rdiam*cos(PSIo*pi/180)))^2-
Rdiam^2*cos(PSIo*pi/180)^2)^0.5-
cos(acos(Rdiam*cos(PSIo*pi/180)))/cos(PSIo*pi/180)*asin(Rdiam*cos(PSIo*
pi/180)/cos(acos(Rdiam*cos(PSIo*pi/180))))-Rdiam*(1-
Rdiam^2)^0.5+asin(Rdiam)));
rho=Po/1000/(0.287*To);%densidad del aire
N=Nnom*rN;%velocidad de rotacion
phi=PSIo:1:PSImax;
j=1;
while j<=(PSImax-PSIo)/1+1
    Cd11(j)=polyval(a10,phi(j));
    Ageom(j)=Ath*(1-
cos(phi(j)*pi/180)/cos(PSIo*pi/180)+2/pi*(Rdiam/cos(phi(j)*pi/180)*(cos
(phi(j)*pi/180)^2-Rdiam^2*cos(PSIo*pi/180)^2)^0.5-
cos(phi(j)*pi/180)/cos(PSIo*pi/180)*asin(Rdiam*cos(PSIo*pi/180)/cos(phi
(j)*pi/180))-Rdiam*(1-Rdiam^2)^0.5+asin(Rdiam)));
    Aef(j)=Cd11(j)*Ageom(j);
    if Aef(j)/Aefmax<=rA
        jj=j;
    else
        end
j=j+1;
end
Cd11=Cd11(jj);
phi=phi(jj);
Aef=Aef(jj);
Aefe=(Aef^-2+Aefmez^-2)^-0.5;
syms Pk
Rair=287;
Ga2=(AA+BB*Pk)*1e-2*Vhi*rho*N/120;
Ga1=Aefe*Po/(Rair*To)^0.5*(Pk/Po)^(1/k)*(2*k/(k-1)*(1-(Pk/Po)^((k-
1)/k)))^0.5;
Ga3=Aefe*Po/(Rair*To)^0.5*k^0.5*(2/(k+1))^(k+1)/(2*(k-1));
fun=Ga1-Ga2;
fun1=Ga3-Ga2;
xai=0;
xbi=Po;
tol=0.001;
f=inline(fun);
f1=inline(fun1);
i=1;
ea(1)=100;
if f(xai)*f(xbi)<0
    xa(1)=xai;

```

```

    xb(1)=xbi;
    xr(1)=(xa(1)+xb(1))/2;
while(abs(ea(i)>=tol))
    if xr(i)>0.528*Po
        if f(xa(i))*f(xr(i))<=0
            xa(i+1)=xa(i);
            xb(i+1)=xr(i);
        end
        if f(xa(i))*f(xr(i))> 0
            xa(i+1)=xr(i);
            xb(i+1)=xb(i);
        end
        xr(i+1)=(xa(i+1)+xb(i+1))/2;
        ea(i+1)=abs((xr(i+1)-xr(i))/(xr(i+1))*100);
        i=i+1;
    else
        if f1(xa(i))*f1(xr(i))<=0
            xa(i+1)=xa(i);
            xb(i+1)=xr(i);
        end
        if f1(xa(i))*f1(xr(i))> 0
            xa(i+1)=xr(i);
            xb(i+1)=xb(i);
        end
        xr(i+1)=(xa(i+1)+xb(i+1))/2;
        ea(i+1)=abs((xr(i+1)-xr(i))/(xr(i+1))*100);
        i=i+1;
    end
end
end
else
fprintf('No existe una raíz en ese intervalo');
end
format long
etav=(AA+BB*xr(i-1))/100;%eficiencia volumétrica en %
format short;
Ga=(AA+BB*xr(i-1))*1e-2*Vhi*rho*N/120;%flujo másico de aire kg/s
PK1=xr(i-1);%presión después de la mariposa

```

### Subprograma c\_descarga.m:

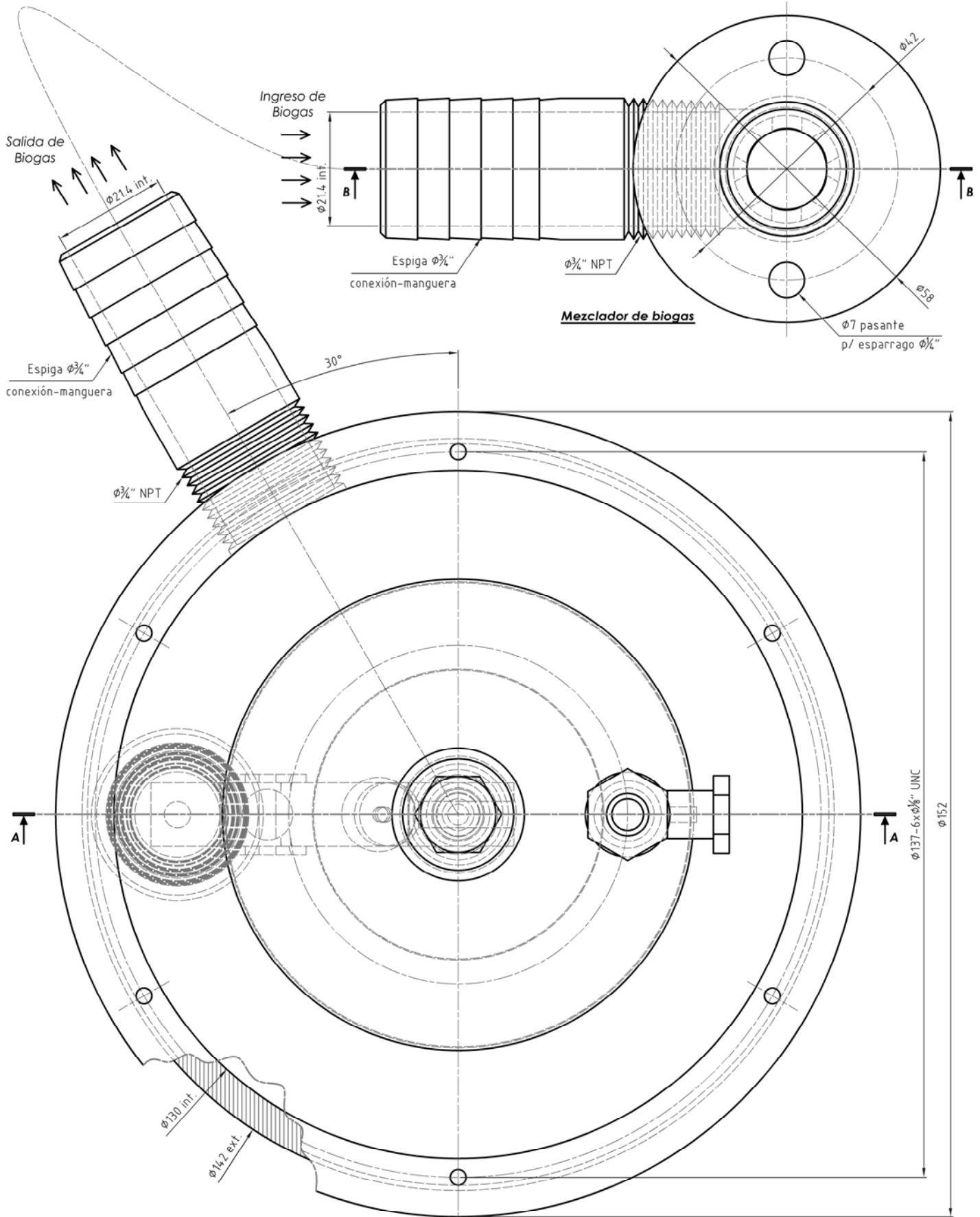
```

function[Cd]=c_descarga(hv);
zz=2;
Cd=[0 0.35 0.55 0.67 0.75 0.79 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8
0.8 0.8];
hv1000=1e-3*[0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5];
a1=polyfit(hv1000,Cd,zz);
hv1000=hv;
Cd=polyval(a1,hv);

```

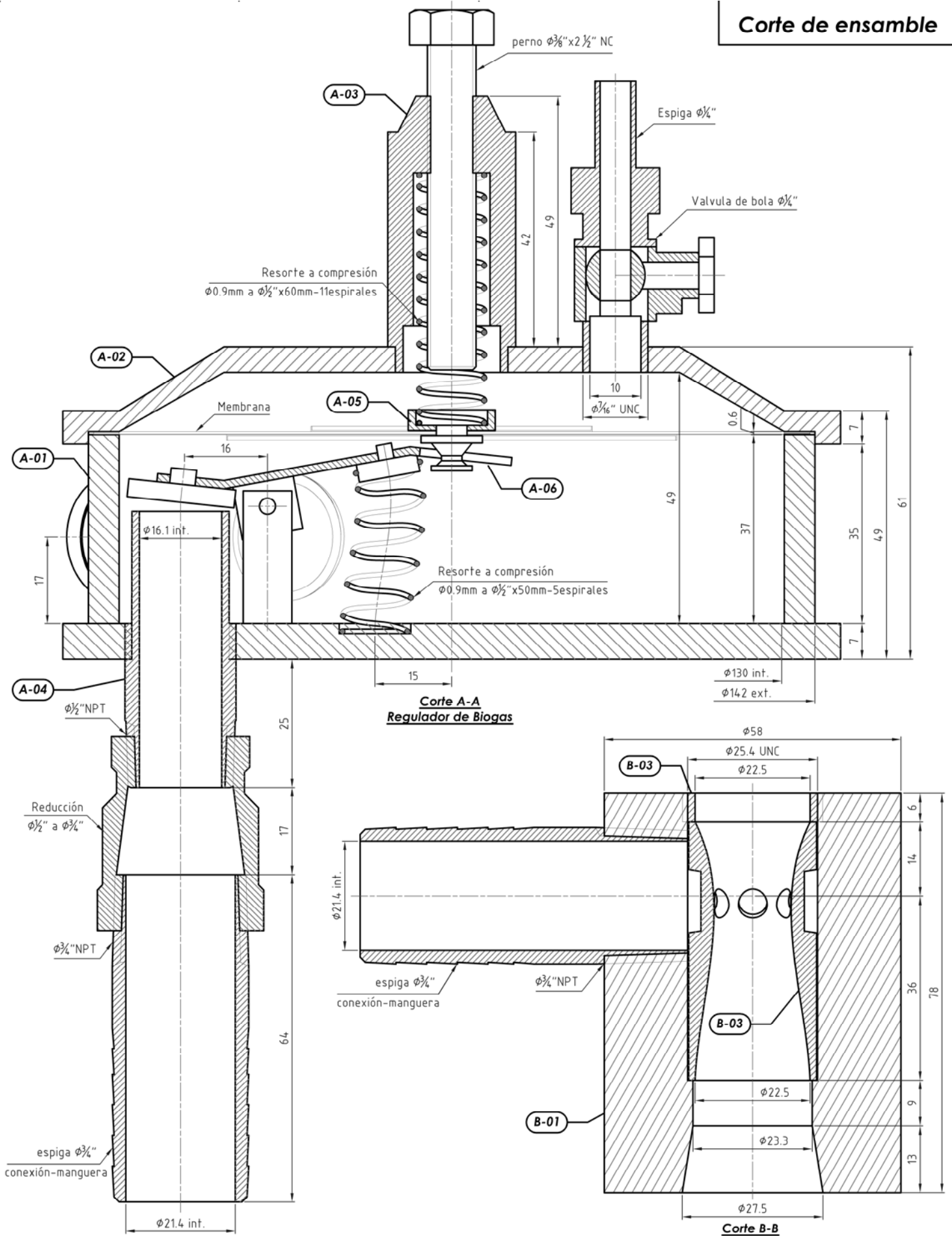
**PLANOS DE FABRICACIÓN DE LAS COMPONENTES**

Vista de ensamble



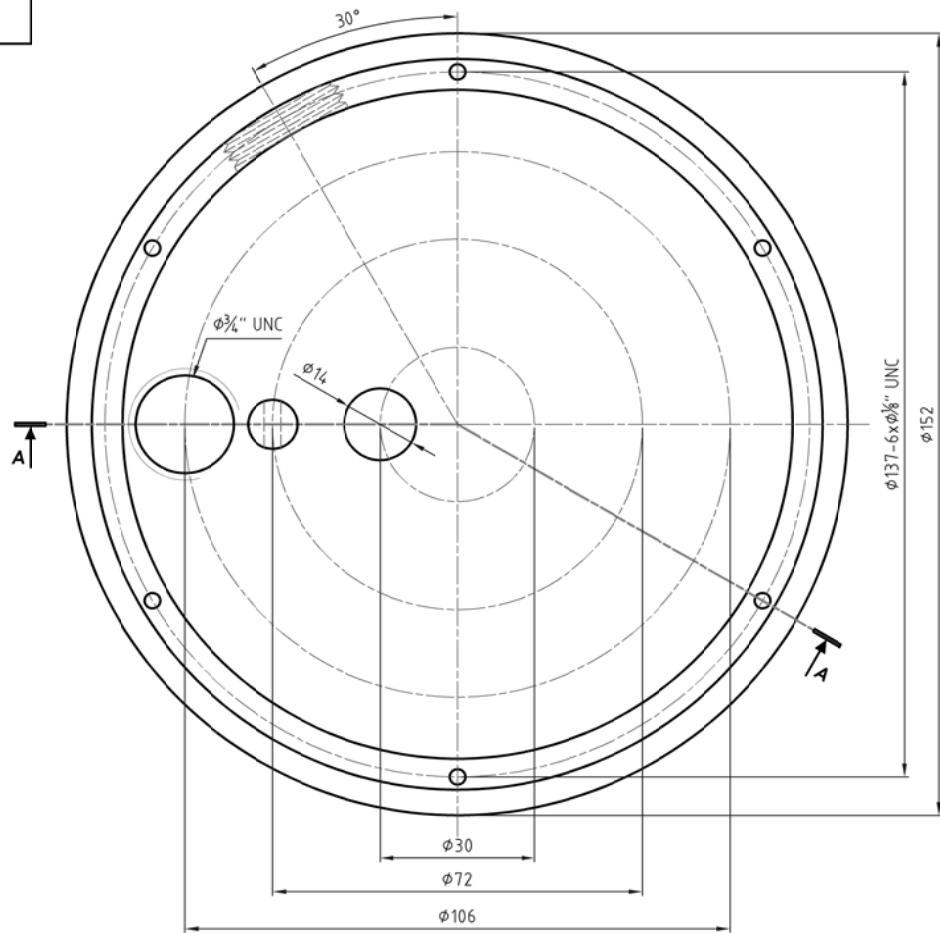
**Regulador de Biogas**

- Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones			<b>UNI-FIM</b> Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica		
	Diseñado	Fecha		Nombre	
	Dibujado	08.03.15		L.A.C.	
	Revisado	08.03.15		G.L.C.	
<b>Notas</b>			Aprobado	08.03.15	G.L.C.
Esc. 1:1	Referencia:		Plano N°: RDB-01		
Regulador y mezclador de Biogas			Rev: 01		

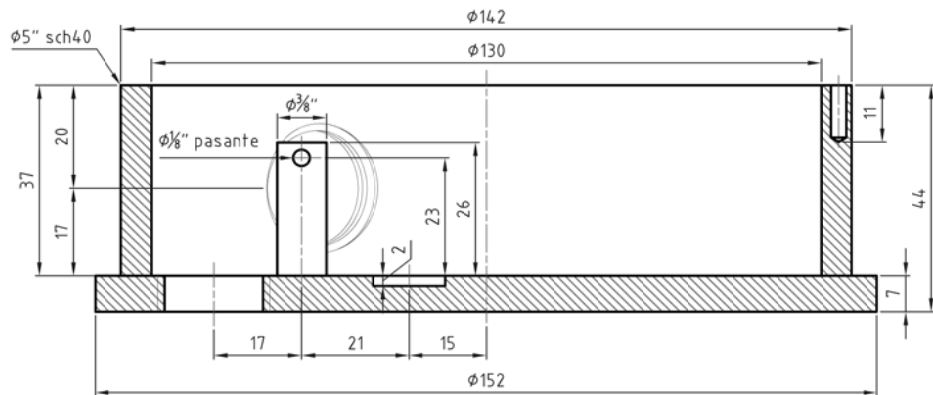


* Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones		Fecha	Nombre
	Diseñado	08.03.15	L.A.C.
	Dibujado	08.03.15	G.L.C.
	Revisado	08.03.15	G.L.C.
	Aprobado	08.03.15	G.L.C.
<b>Notas</b>			
Referencia:			
Esc. 1:1	Regulador y mezclador de Biogas		Plano N°: RDB-02
			Rev: 01

A-01

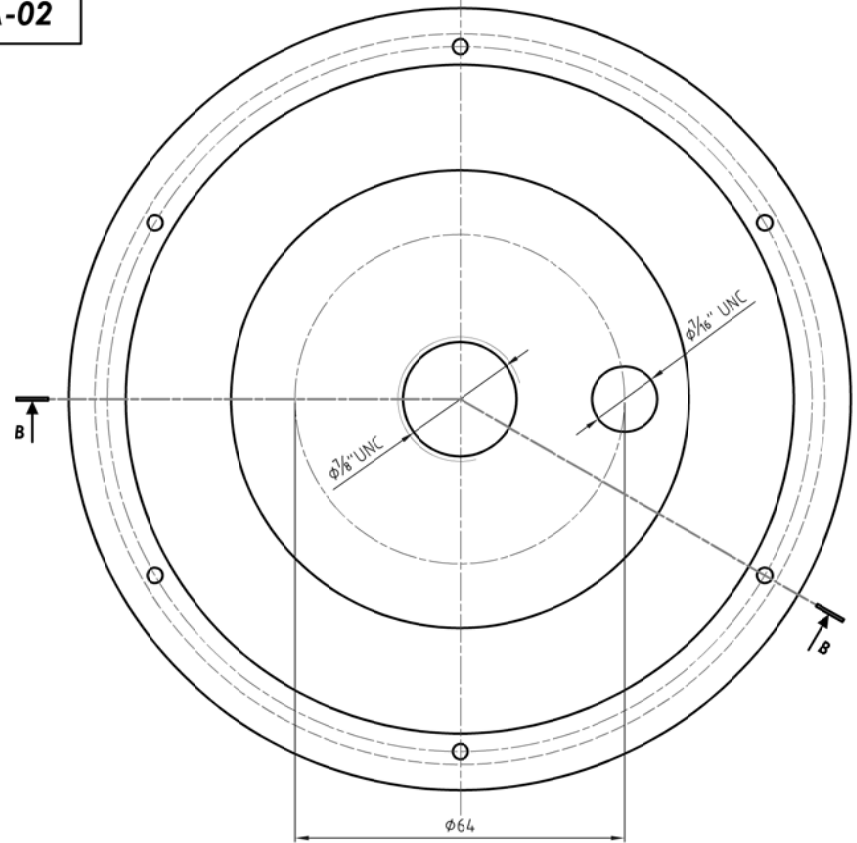


Vista Superior

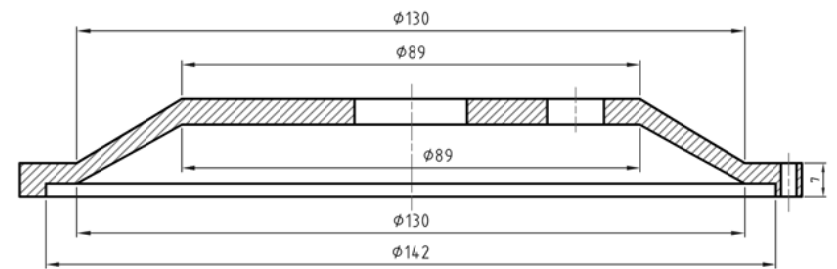


Corte A-A

A-02



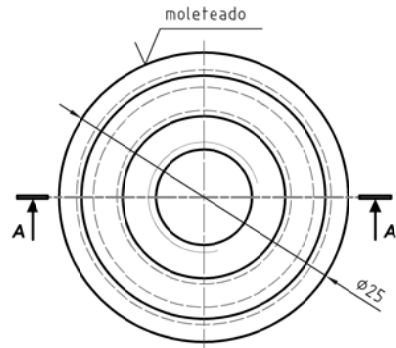
Vista Superior



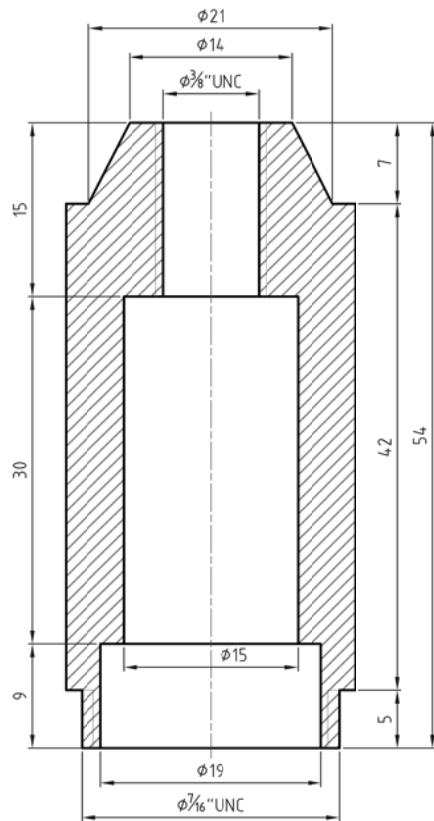
Corte B-B

Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones		Fecha	Nombre	<b>UNI-FIM</b> Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica
	Diseñado			
	Dibujado	08.03.15	L.A.C.	
	Revisado	08.03.15	G.L.C.	
Notas		Aprobado	08.03.15	G.L.C.
Esc. 1:1	Referencia: Tapas inferior y superior del regulador			Plano N°: RDB-03
				Rev: 01

A-03

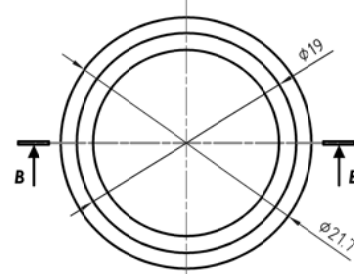


Vista superior

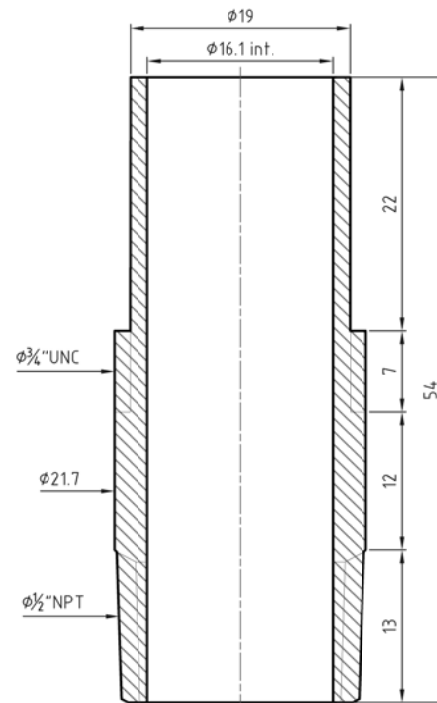


Corte A-A

A-04

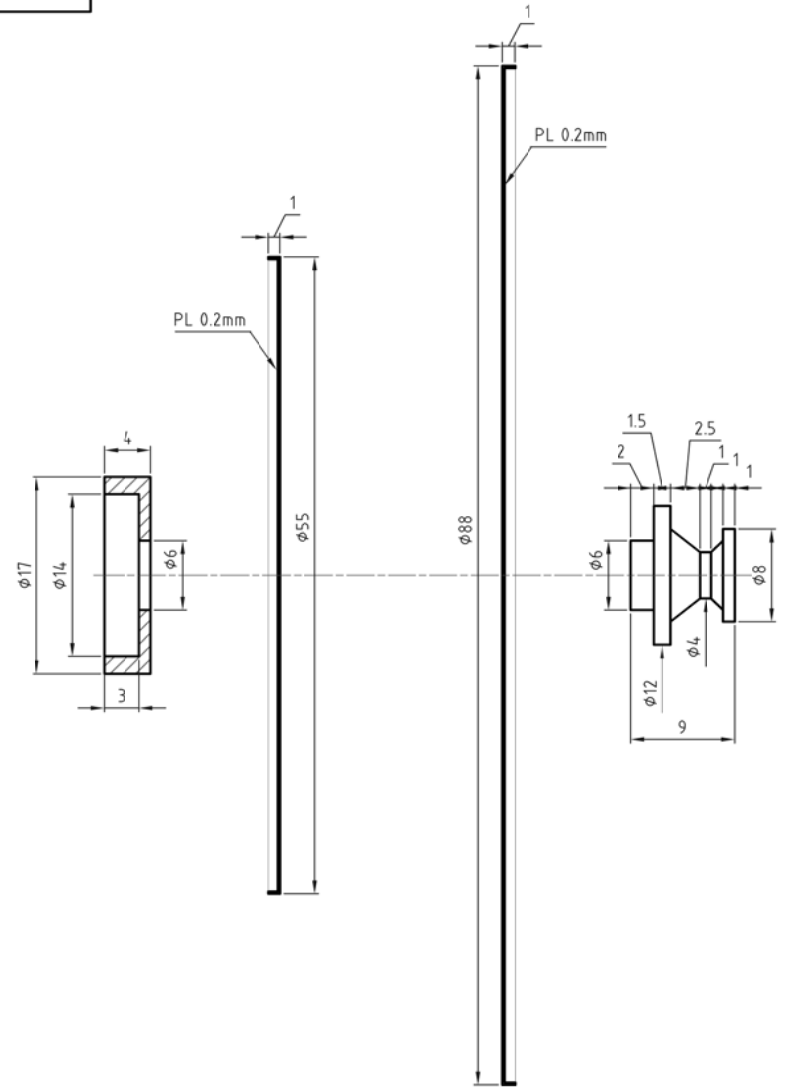


Vista superior



Corte B-B

A-05



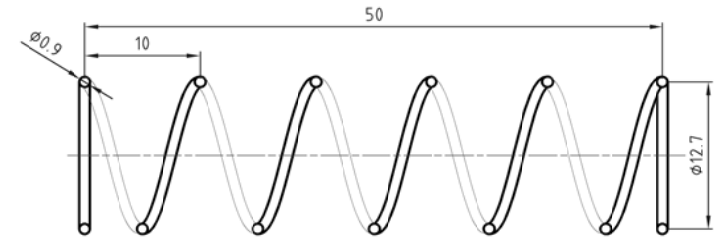
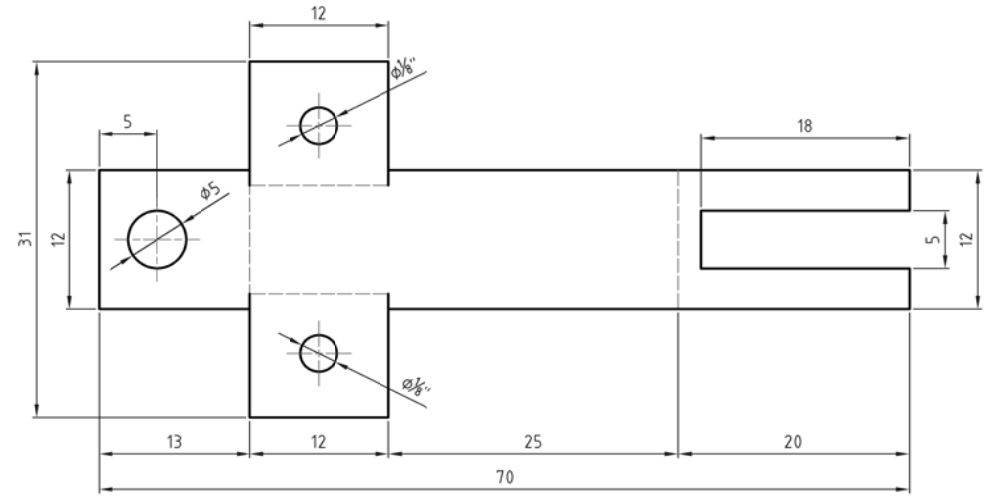
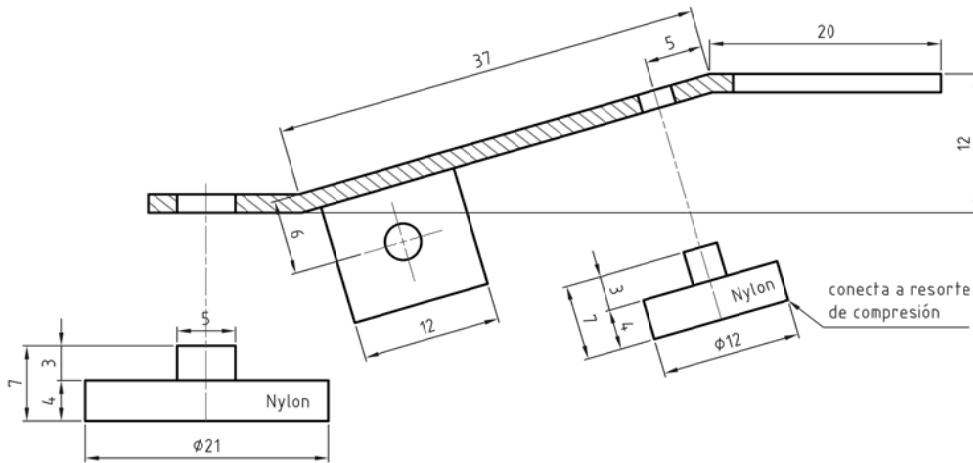
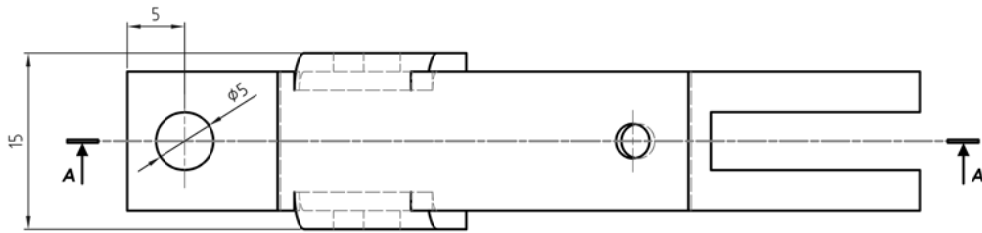
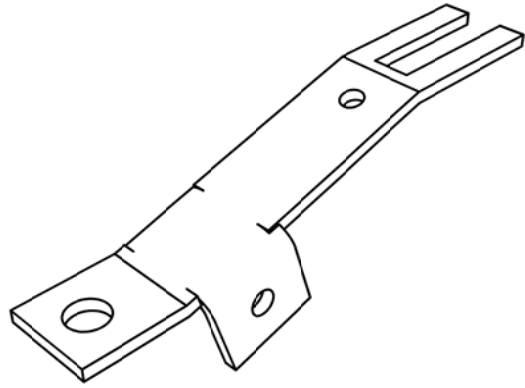
Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones		Fecha	Nombre
	Diseñado	08.03.15	L.A.C.
	Dibujado	08.03.15	G.L.C.
	Revisado	08.03.15	G.L.C.
	Aprobado	08.03.15	G.L.C.

**UNI-FIM**  
Universidad Nacional de Ingeniería  
Facultad de Ingeniería Mecánica

Notas	
Esc. 1:1	Referencia: Cavidad del resorte de máxima y espiga

Plano N°: RDB-04  
Rev: 01

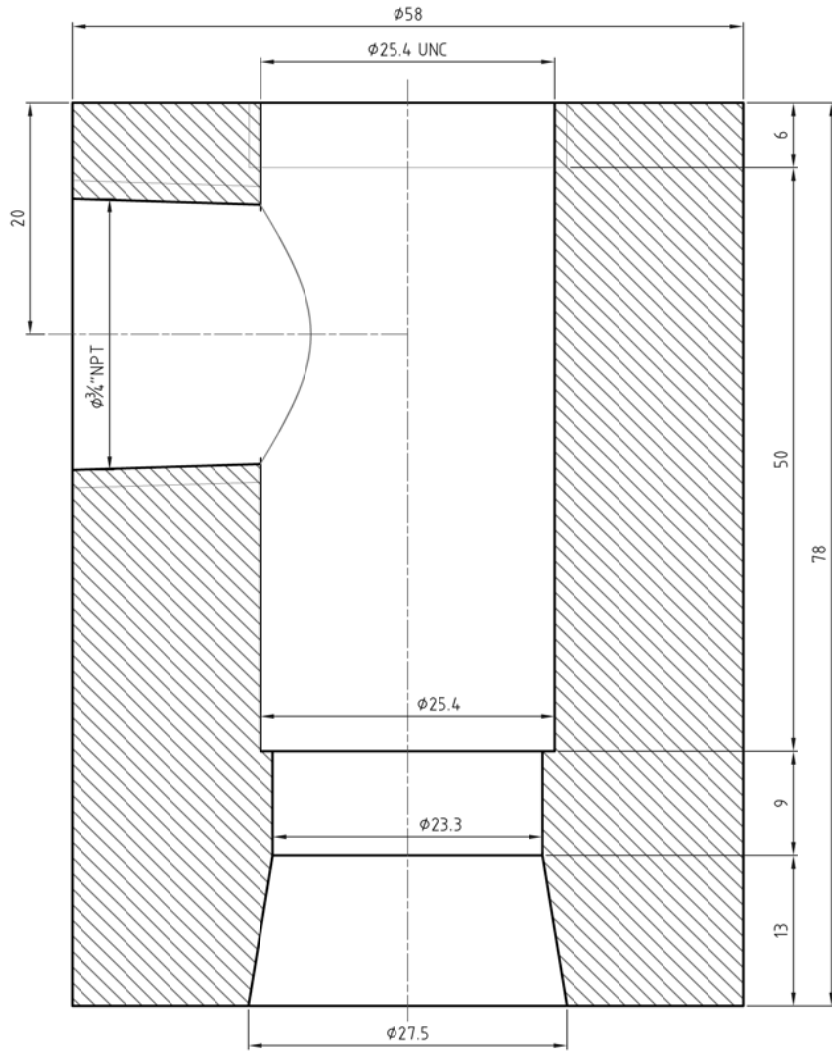
A-06



<p>Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones</p>		<p>Fecha</p> <p>Nombre</p>	<p><b>UNI-FIM</b> Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica</p>	
<p><b>Notas</b></p>	<p>Diseñado</p> <p>Dibujado</p> <p>Revisado</p> <p>Aprobado</p>	<p>08.03.15</p> <p>08.03.15</p> <p>08.03.15</p> <p>08.03.15</p>		<p>L.A.C.</p> <p>G.L.C.</p> <p>G.L.C.</p> <p>G.L.C.</p>
	<p>Referencia:</p> <p>Balancín y resortes</p>			<p>Plano N°: RDB-05</p>
	<p>Esc. 1:1</p>			<p>Rev: 01</p>

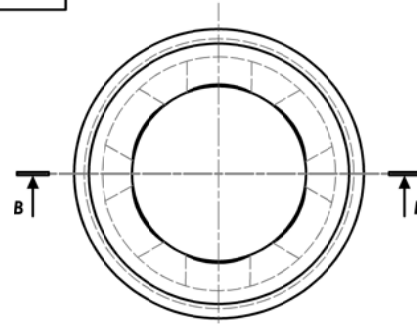


B-01

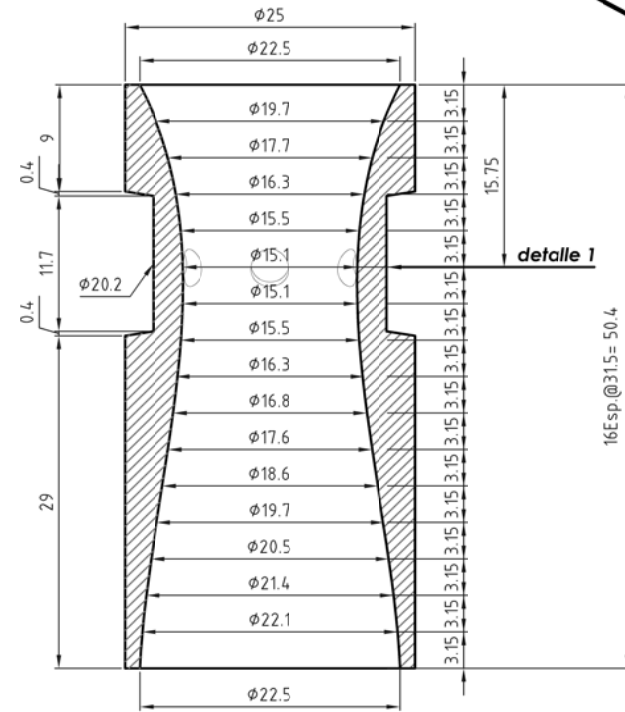


Vista de Corte

B-02

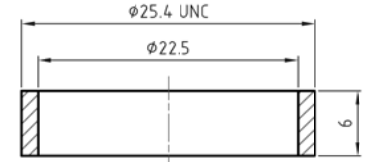


Vista Superior

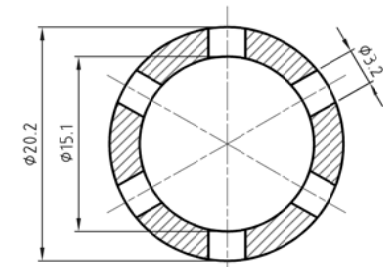


Corte B-B

B-03



Vista de Corte



detalle 1

	Todas las medidas se encuentran en milímetros salvo indicaciones		<b>UNI-FIM</b> Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Mecánica
	Fecha	Nombre	
	Diseñado	Ktperú	
	Dibujado	08.03.15 L.A.C.	
Revisado	08.03.15 G.L.C.	Referencia: <b>Mezclador de Biogas</b>	Plano N°: RDB-06
Aprobado	08.03.15 G.L.C.		
Esc. 1:1			Rev: 01