

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Guillermo Lira C., Alfredo Oliveros D., Jhordann Barrera E.,
Instituto de Motores de Combustión Interna, Facultad de Ingeniería Mecánica
E-mails: glira@uni.edu.pe, edevialf@terra.com.pe, jbarrerae@hotmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se propone un sistema de suministro dual de biogás/gasolina para un motor de combustión interna de encendido por chispa de baja potencia. Se presentan aspectos vinculados con el diseño, construcción y pruebas del sistema de alimentación del motor, incluyendo los mecanismos y accesorios de regulación en diferentes regímenes de operación. Para el diseño del carburador-mezclador se ha empleado un modelo matemático para optimizar su geometría, minimizando las pérdidas de presión y manteniendo la relación aire-combustible adecuada. Se incluyen los resultados de los ensayos realizados entre julio de 2000 y junio de 2002 en el Instituto de Motores de Combustión Interna de la UNI en un motor estacionario monocilíndrico de gasolina de 6 kW.

ABSTRACT

A supply system of dual biogas/gasoline is proposed for a low power spark ignition engine. This work shows aspects related to design, manufacturing and tests of the fuel supply system, including devices to keep the engine speed constant at all loads. For the design of the carburetor-mixing device, has been utilized a mathematical model in order to optimise its geometry reducing the pressure losses and keeping adequate by a fuel/air ratio. Moreover, this work shows the experimental results carried out at the Internal Combustion Engines - UNI Institute in a 6 kW one-cylinder stationary engine.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional se aprecia actualmente una tendencia clara y sostenida en el uso creciente de tecnologías limpias y energías renovables, aunque todavía lejos de los niveles deseados. En nuestro país se nota un interés creciente en el tema, pero todavía con pequeños esfuerzos en la investigación y difusión necesaria.

Las razones principales que motivan este interés creciente son la drástica disminución de las reservas probadas de petróleo, con el consiguiente encarecimiento de sus derivados, y el aumento de las concentraciones de gases tóxicos y de efecto invernadero en el aire atmosférico urbano.

Otro grave problema es la enorme cantidad de residuos sólidos y líquidos que se producen en las ciudades y centros de producción de las sociedades

actuales, que no son dispuestos en forma adecuada, y que la naturaleza no puede procesar a la velocidad que se generan.

Cabe mencionar que en nuestro país hay más de un millón de familias que no tiene acceso a la electricidad y a las ventajas que ésta conlleva.

Dentro de este esquema, el empleo de la biomasa para la generación de energía se presenta como una alternativa interesante para cubrir parcialmente este déficit. Como se sabe, la biomasa proveniente principalmente de los desechos orgánicos agropecuarios, domésticos y/o industriales, se puede procesar para obtener importantes productos como el biogás y fertilizantes.

En este artículo se describe la investigación realizada entre julio del 2000 y junio de 2002 en el marco del proyecto multidisciplinario de la UNI

“Biogás para la generación de energía” en el cual se buscaba perfeccionar un “carburador elemental” desarrollado en un anterior proyecto denominado “Uso del biogás en motores” [1,2]. Como resultado de estos proyectos se logró el funcionamiento óptimo de un motor a biogás en diferentes regímenes de funcionamiento.

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, rellenos sanitarios, etc., o en un ambiente controlado, como en los biodigestores.

Los componentes principales del biogás [1, 3, 4] son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), pero

también se encuentran pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico (H_2S), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), argón (Ar), monóxido de carbono (CO) y trazas de amoníaco (NH_3).

El poder calorífico y otras propiedades del biogás dependen de la cantidad de metano en el biogás (éste varía entre 50 y 80% vol.), el cual a su vez depende del proceso de obtención y de la materia prima utilizada. En nuestro caso, el biogás es obtenido en un reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA), de 6 m de profundidad, el cual tiene un tiempo de retención de 7 h y produce en promedio 10 m³ de biogás por día con un contenido de 80% de CH_4 .

Las propiedades físico-químicas del biogás, con diferentes porcentajes de CH_4 , a condiciones estándares (101,3 kPa y 273 K), se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Algunas propiedades del biogás.

Propiedad	Combustible		
	Gasolina	Biogás (60% de CH_4)	Biogás (80% de CH_4)
Poder calorífico inferior, MJ/m ³	44,0*	21,6	28,8
Densidad, kg/m ³	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 ³ /m ³	---	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 $\lambda=1$), MJ/m ³	3,74	3,23	3,36
Número de octano (método research)	66-97	130**	---

* en MJ/kg. ** con 70% de CH_4 .

El ácido sulfhídrico (H_2S), contenido en el biogás (de 0,10 a 0,50%), es altamente corrosivo. Para algunos motores se especifica como límite máximo permitido 1.500 ppm (0,15% en volumen) [4]; por esta razón, es necesario el uso de filtros que disminuyan su concentración.

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL CARBURADOR MEZCLADOR DE BIOGAS

El carburador mezclador de biogás es el componente

más importante del sistema de alimentación y su función es mezclar el biogás con el aire en la proporción adecuada. El mezclador utilizado es del tipo vénturi y ha sido diseñado basándose en un modelo matemático. Este mezclador consta básicamente de dos partes: una carcasa (housing) y una tobera (vénturi), esta última es intercambiable.

El mezclador tiene el mismo principio fluido-dinámico que un carburador convencional, es decir, el flujo de aire ingresa al motor gracias a la succión provocada por la carrera descendente del pistón del motor

durante el proceso de admisión. El flujo de aire comienza a desarrollarse desde su ingreso al mezclador; la mayor velocidad del aire en la garganta del vénturi origina una depresión en los agujeros de biogás lo que causa el flujo de la mezcla al motor. La depresión en la garganta del vénturi del mezclador varía en función de la posición de la válvula de mariposa del carburador de gasolina, el cual se encuentra instalado en serie con el mezclador de biogás.

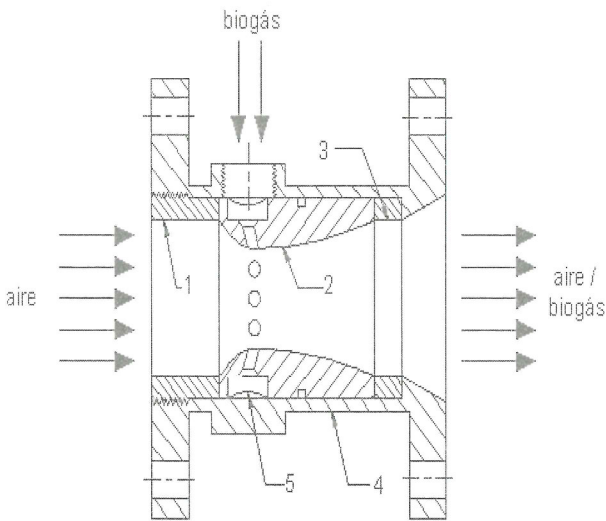


Fig. 1. Esquema del mezclador de biogás. 1. Centrador, 2. Tobera, (vénturi), 3. Separador, 4. Carcasa, 5. Anillo de alimentación de biogás.

La modelación matemática del mezclador permitió obtener la geometría (perfil de la tobera) y las principales medidas de éste. El perfil de la tobera debe ser tal que produzca las menores pérdidas de presión en el flujo. La modelación también permitió determinar el número y diámetro de los agujeros de alimentación de biogás, de manera que se obtenga una mezcla homogénea y con una adecuada relación aire-combustible. También se consideró la inclinación del eje de los agujeros del biogás con respecto al plano perpendicular al eje de la tobera (ver figura 1), de tal manera que aumente el valor del coeficiente de descarga de los mismos.

Las dimensiones principales del mezclador de biogás utilizado se muestran en la figura 2

Para obtener el perfil de la tobera del mezclador se

usó dos curvas polinómicas de tercer grado [2], del tipo:

$$y = a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 \quad (1)$$

Los valores numéricos de los coeficientes de los polinomios se obtienen a partir de las condiciones de contorno del perfil, es decir:

$$z=0 \text{ para } y=0 \text{ o } y=L;$$

$$\left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=0} = tg\alpha; \quad \left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=L} = -tg\beta; \quad \left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=L_1} = 0$$

y de las siguientes recomendaciones [3]:

$$h = \frac{D-d}{2}; \quad \frac{L_1}{L} \approx 0,20 - 0,25; \quad \frac{L}{h} \approx 6,5 - 7,5;$$

$$\alpha \approx 40 - 50^\circ; \quad \beta \approx 15 - 25^\circ$$

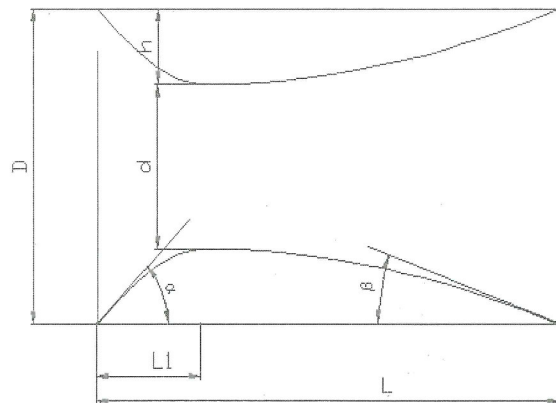
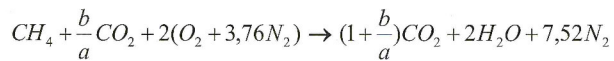


Fig. 2. Dimensiones principales de la tobera utilizada.

Conocido el perfil y las dimensiones de la tobera, se pueden plantear las ecuaciones de conservación de la energía, de continuidad y la de un proceso de compresión adiabática (isoentrópica) para dos puntos cualquiera de la tobera (separados un diferencial dz). Utilizando la ecuación de Darcy (para este mismo diferencial dz) y el diagrama de Moody, finalmente, se puede calcular la presión media (P_m) y las velocidades media y máxima (V_m y V_{zmax} , respectivamente) a lo largo de la tobera, tal como se muestran en la figura 3.

Para calcular el área total de paso de los agujeros de suministro de biogás, se tuvo que calcular previamente la relación estequiométrica aire-combustible (biogás)

a partir de la siguiente ecuación química de la combustión completa del biogás:



Donde, a y b son las fracciones en volumen de CH_4 y CO_2 , respectivamente. En los ensayos, se determinó que $a = 0,8$ y $b = 0,2$, por lo que la relación estequiométrica aire-biogás es aproximadamente 10,2 kg/kg.

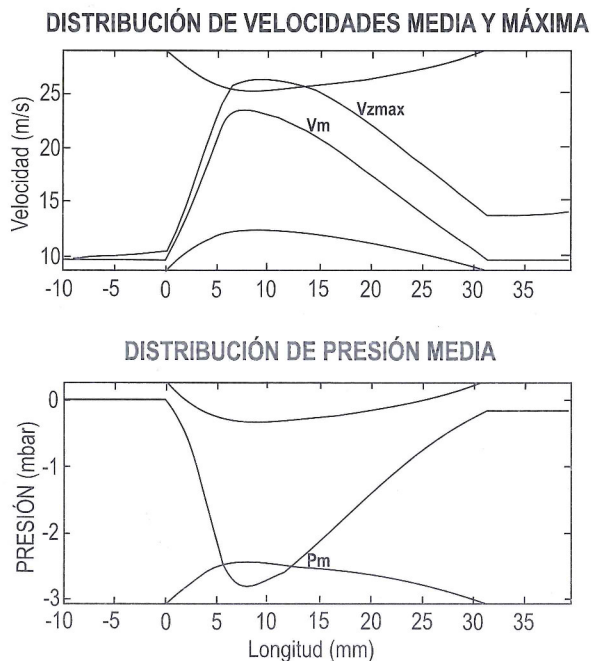


Fig. 3. Variación de velocidad y presión media a lo largo de la tobera del mezclador [2].

Las condiciones de máximo suministro de biogás y de máxima potencia se consiguen cuando la válvula de mariposa está completamente abierta y el coeficiente de exceso de aire es igual a 0,9 (condiciones nominales).

El coeficiente de exceso de aire (λ) se define como:

$$\lambda = \frac{G_a}{(l_0 \cdot G_c)}$$

Donde: G_a y G_c son los flujos másicos de aire y combustible, respectivamente. l_0 es la relación estequiométrica aire-biogás.

Tomando en cuenta la conocida fórmula del flujo a

través de agujeros, obtenemos:

$$\lambda = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{A_d \cdot C_d}{A_c \cdot C_c} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_c}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_d}{\Delta P_d + \Delta P_c}}$$

Donde: A_d y A_c son las áreas de la garganta del difusor y de los agujeros (sumatoria) para el paso del biogás, respectivamente; C_d y C_c son los coeficientes de descarga de las áreas señaladas; ρ_0 y ρ_c son las densidades de aire y combustible. ΔP_d y ΔP_c son la depresión en la garganta del venturi del mezclador y la presión manométrica del biogás, respectivamente (en mbar).

De los resultados de la modelación matemática se obtuvo el valor de la máxima depresión en la garganta de la tobera ($\Delta P_d = 4,5 \text{ mbar}$) para el motor Honda GX-240 en las condiciones nominales de funcionamiento. Conocidos el flujo de aire y el valor del coeficiente de exceso de aire ($\lambda = 0,9$), se puede calcular el flujo de combustible.

Asumiendo que las condiciones de temperatura para el gas y para el aire son iguales (temperatura atmosférica T_0), entonces:

$$\frac{\rho_0}{\rho_c} = \frac{\mu_0 P_0}{\mu_c P_c}$$

y

$$\mu_c = a\mu_{CH_4} + b\mu_{CO_2}$$

Donde: μ_0 y μ_c , P_0 y P_c son las masas moleculares y las presiones absolutas del aire y del combustible, respectivamente.

A partir de estas ecuaciones, se puede obtener el área total de los agujeros para el suministro de biogás al motor:

$$A_c = \frac{1}{\lambda \cdot l_0} \cdot \frac{A_d C_d}{C_c} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{a \cdot \mu_{CH_4} + b \cdot \mu_{CO_2}}} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{P_0 + \Delta P_c}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_d}{\Delta P_d + \Delta P_c}}$$

Las variaciones de λ y del flujo másico relativo de biogás $G_c/G_{c,0}$ en función del flujo másico relativo de aire $G_a/G_{a,0}$ se muestran en la figura 4, donde se ha asumido que los valores de A_c , A_d , ΔP_c , a , b , C_d y C_c se mantienen aproximadamente constantes.

Nótese que la curva del coeficiente de exceso de aire (λ), se puede mover a una posición más alta (o

más baja), es decir, la mezcla se puede empobrecer o enriquecer al disminuir o aumentar el flujo de biogás, lo cual, se puede conseguir por ejemplo, disminuyendo o aumentando el área de los agujeros de paso del biogás (A_c). También se puede apreciar que la mezcla se va empobreciendo a medida que se va abriendo la válvula de mariposa (o, lo que es lo mismo, aumentando la carga), es por esta razón que luego de realizarse algunos ensayos se optó por aumentar en forma gradual (de uno en uno) el diámetro de los agujeros de alimentación de biogás, con el objeto de aumentar el flujo de combustible y, consecuentemente, la potencia del motor.

Es interesante señalar que la tendencia de esta curva, es decir, de ir enriqueciéndose la mezcla a medida que disminuye el flujo de aire al ir cerrándose la válvula de mariposa al disminuir la carga, hace innecesaria la instalación de un sistema especial para los regímenes de ralentí y bajas cargas.

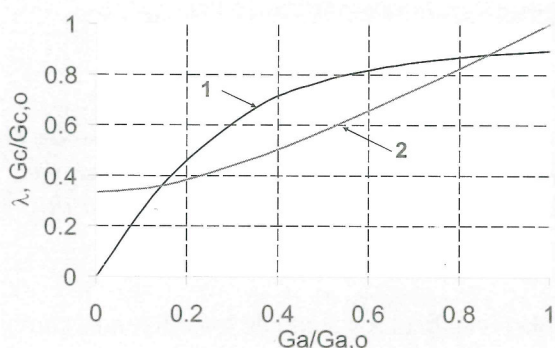


Fig. 4. Variación del coeficiente de exceso de aire λ (1) y del flujo másico relativo de biogás $G_c/G_{c,0}$ (2) en función del flujo másico relativo de aire $G_a/G_{a,0}$

La tobera del mezclador debe ser confeccionada tratando que la superficie interior sea lo más lisa posible. Las bridas de la carcasa del mezclador se fabrican de acuerdo al tamaño de la brida del carburador de gasolina y del filtro de aire, respectivamente.

El ingreso del biogás al mezclador es a través de una válvula de paso, la cual regula el flujo de combustible.

Otras Consideraciones

Las consideraciones complementarias para el diseño del sistema de alimentación de biogás para el motor

fueron:

Filtro de biogás.- Con el fin de eliminar o disminuir el porcentaje de H_2S comúnmente se emplean filtros con sustancias como cal viva o pagada, limaduras de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites, las cuales son ricas en sustancias ferrosas, que al reaccionar con el H_2S se forma sulfuro de hierro.

El filtro utilizado se instaló en la línea de conducción de biogás al motor, aproximadamente a 4 m de la entrada de este último. Como filtro se utilizó un tubo de PVC de 30 cm de diámetro y 1 m de altura, el cual se rellenó con limaduras de hierro en tres compartimentos.

Al sistema de ralentí.- Cabe mencionar que el sistema no cuenta con un dispositivo especial para el funcionamiento del motor con bajas de carga o vacío, ya que el mezclador de biogás permite por si mismo un funcionamiento estable del motor en estos regímenes.

Motor.- En vista que el biogás tiene un octanaje mayor que cualquier gasolina comercial, el motor puede trabajar con una mayor relación de compresión, por lo cual se rectificó la base de la culata, aumentando la relación de compresión de 8/1 a 10,5/1, obteniéndose mejores resultados, principalmente en lo referente al consumo específico de biogás.

Cabe mencionar que esta modificación sólo se hizo para el estudio experimental, la cual no es conveniente realizar en otros casos, ya que siendo ésta una modificación permanente, impediría el buen funcionamiento del motor con gasolina (podría presentarse detonación) ante una eventual escasez del biogás.

Sistema de arranque.- Se mantuvo el sistema de arranque original del motor, ya que debido al bajo poder calorífico por unidad de volumen de mezcla del biogás con el aire (ver tabla 1) comparado con el de la gasolina (de 10 a 20% menor), el motor se siguió arrancando con esta última.

Regulador de velocidad.- No hubo necesidad de realizar modificaciones ni cambiar el regulador original del motor. Cabe indicar que la presencia del regulador es imprescindible para mantener constantes el voltaje

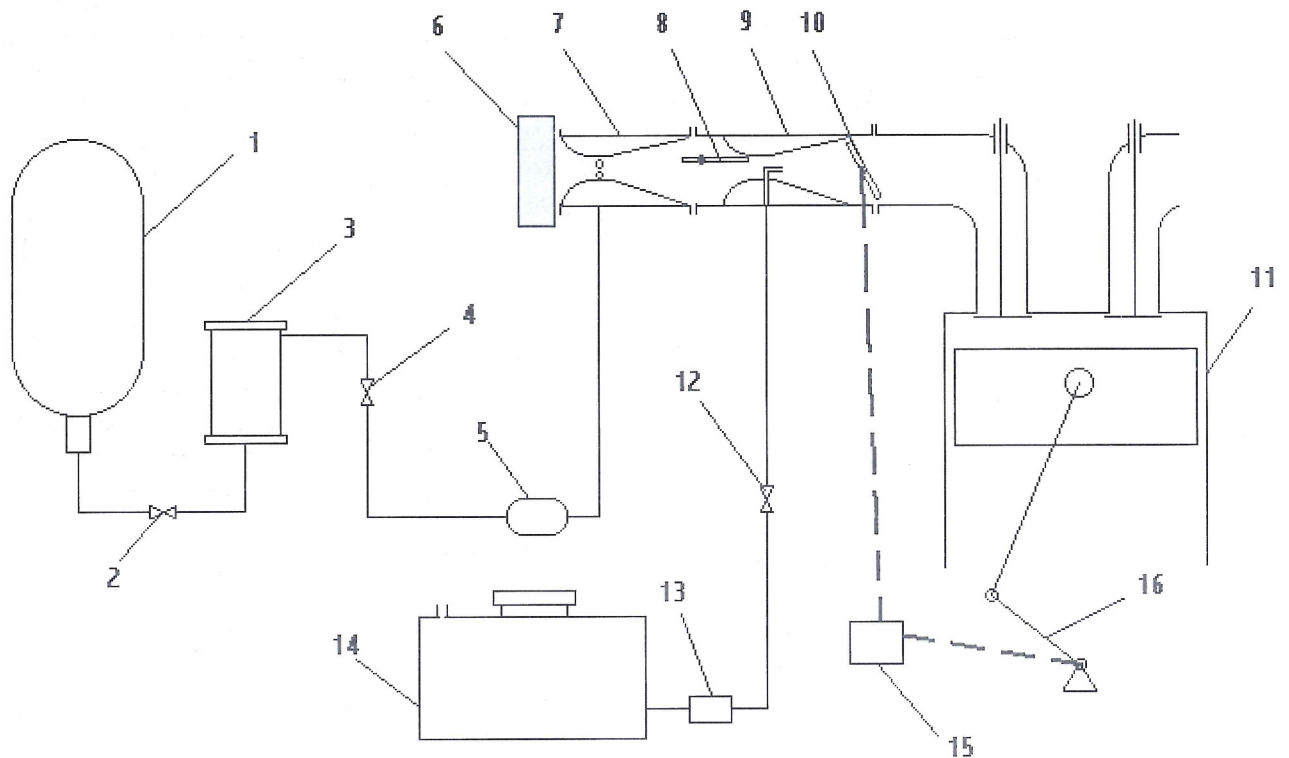


Fig. 5. Esquema del motor a biogás: 1-Almacenamiento de biogás, 2-Válvula de cierre, 3-Filtro de H_2S , 4-Válvula de paso, 5-Válvula de regulación, 6-Filtro, 7-Mezclador, 8-Estrangulador (choke), 9-Carburador de gasolina, 10-Válvula de mariposa, 11-Motor, 12-Válvula de cierre, 13-Filtro, 14-Tanque de gasolina, 15-Regulador de velocidad, 16- Cigüeñal del motor.

y la frecuencia de la corriente del grupo.

Los componentes del sistema de alimentación y de regulación de la velocidad del motor a biogás se presentan en la figura 5.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Para demostrar la funcionalidad y confiabilidad del sistema de alimentación de biogás, así como para obtener las características de carga de un motor con este nuevo combustible se realizaron ensayos en un banco de pruebas, especialmente diseñado y construido para este fin (ver figura 6).

También se construyó una caseta próxima al RAFA, en la cual se instaló el banco de pruebas. En el techo de la caseta se ubicó el sistema de almacenamiento de biogás.

Se realizaron una serie de pruebas con el motor para

ir observando el resultado de los diferentes cambios introducidos en la máquina original. La carga se simuló con un panel de 40 focos de filamento, de 100 W cada uno, que se prendían de 5 en 5.

Los cambios estuvieron orientados a lograr la sustitución de gasolina por biogás pero tratando de usar al máximo las bondades del motor original, primero para el encendido y luego para su operación.

Una vez introducido el carburador-mezclador de biogás y rescatado las características de regulación de la velocidad de rotación de la máquina original se procedió a medir los parámetros de operación del motor y verificar su rendimiento.

Las especificaciones técnicas del motor utilizado durante las pruebas son:

- Marca: Honda, modelo GX-240
- Tipo de motor: E.CH., de carburador, 4

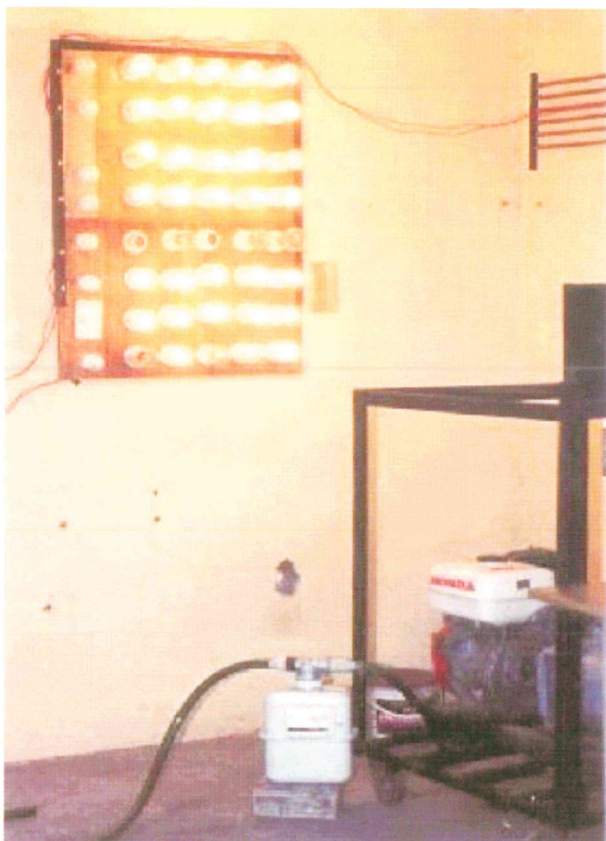


Fig. 6. Vista de la instalación experimental desde el interior de la caseta durante los ensayos con el motor a biogás.

- tiempos, válvula en cabeza, monocilíndrico
- Relación de compresión: 8/1
- Cilindrada: 242 cm³
- Diámetro x carrera: 73x58mm
- Potencia máxima: 5,97 kW @ 3600 rpm.

RESULTADOS

Para las condiciones experimentales de funcionamiento del motor (3600 rpm y carga variable) se comprobó que el voltaje en función de la potencia, trabajando con biogás, varía ligeramente, desde 235 V (6,8% mayor que el voltaje nominal) para el trabajo en vacío del motor, hasta un valor de 225 V (2,3% mayor que el nominal) para el motor funcionando con la mariposa completamente abierta, lo cual indica un trabajo confiable del motor en cualquier régimen de carga. Cabe mencionar que para obtener energía eléctrica de calidad se admite como máximo una variación de hasta $\pm 5\%$ de la tensión nominal (220V) [5]. En cuanto a la frecuencia de la corriente, ésta sufre fluctuaciones menores al 2%.

En la figura 7 se puede apreciar la variación del consumo específico de combustible en función de la potencia generada para dos de los ensayos realizados. Ambas curvas tienen tendencias coincidentes. El menor valor del consumo específico del motor es de 0,65-0,70 m³/(kW.h) para una potencia de 4,25 kW. Este valor del consumo específico se encuentra en el rango que indica Mitzlaff [4] (0,65 – 1,0 m³/(kW.h)) para motores E.CH. modificados, aunque cabe mencionar que este rango es para biogás con una composición de 60% de CH₄, mientras que en nuestro caso la composición del biogás alcanza un valor de 80%. También se observa que la tendencia de las curvas es aún decreciente, lo cual indica que es posible que el motor desarrolle aun más potencia.

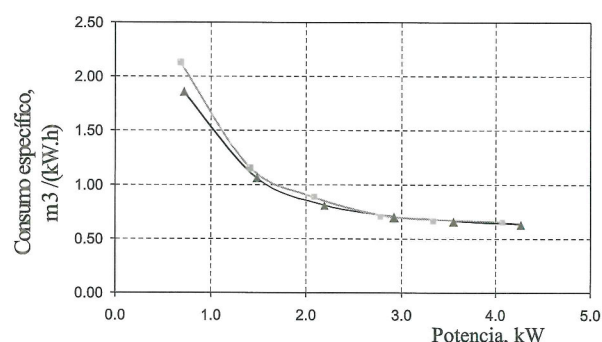


Fig. 7. Variación del consumo específico de biogás (en m³/(kW.h)) en función de la potencia generada (kW). Ambos ensayos con 2 agujeros de $\phi 2,2$ mm y 8 de $\phi 2$ mm.

El consumo horario de biogás es de 2,6 m³/h para 4,25 kW de potencia (carga máxima). La determinación del consumo horario de biogás es importante para el dimensionamiento de las plantas de biogás, del mezclador y de otros accesorios.

La eficiencia térmica efectiva del motor es de 18,7% para una potencia de 3,1 kW. Este valor relativamente bajo de la eficiencia térmica, a pesar de la baja eficiencia asumida del generador eléctrico (80%), es debido, principalmente, al pequeño tamaño del motor.

El coeficiente de exceso de aire, en todo el rango de variación de la carga, fue menor que 1, es decir, el motor siempre trabajó con mezclas ricas, obteniéndose valores que van desde 0,72 para el trabajo sin carga hasta 0,9 para la máxima carga del motor. El haber trabajado con mezclas ricas en todo el rango de cargas impidió obtener mayores eficiencias térmicas.

En la figura 8 se muestran los niveles de CO (%) en función del coeficiente de exceso de aire, tanto para los ensayos realizados con gasolina como con biogás.

Como en el caso de otros combustibles gaseosos, con el biogás se verifica que hay una disminución significativa de las emisiones tóxicas con respecto al trabajo del motor con gasolina. El CO se reduce aproximadamente en 90% en ralentí, mientras que los hidrocarburos se reducen hasta en 65% en este mismo régimen.

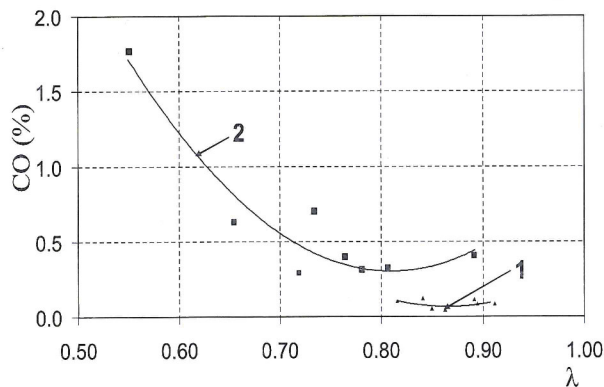


Fig.8. Porcentaje de CO en los gases de escape en función del coeficiente de exceso de aire (λ) 1- con biogás, 2- con gasolina.

CONCLUSIONES

Se implementó un sistema que permite un fácil arranque del motor y una alimentación confiable y segura de biogás, utilizando una tecnología sencilla y de bajo costo, con un combustible no especificado por el fabricante, esto es muy importante ya que con esto se vislumbra la posibilidad de electrificación de muchas comunidades rurales y urbano marginales.

La implementación del sistema de alimentación de biogás no requiere de ninguna modificación en el

sistema de alimentación de gasolina ni en el regulador de velocidad del motor utilizado.

La potencia máxima desarrollada por el motor con biogás es 4,25 kW, la cual es aproximadamente 29% menor que la potencia nominal del motor (5,97 kW) trabajando con gasolina.

Los resultados de las pruebas con biogás arrojaron un consumo específico de aproximadamente 0,65–0,70 m³/(kW.h) a plena carga.

El motor trabajó de manera estable en ralentí, pese a no contar con un subsistema de alimentación de biogás para bajas cargas.

Las emisiones tóxicas de los gases de escape son notoriamente menores utilizando biogás.

REFERENCIAS

1. **Lira Cacho, J.G., Oliveros Donohue, A., Figueroa Reynoso, R.**, "Generación Eléctrica a partir de biogás", Revista TECNIA Universidad Nacional de Ingeniería. Lima 2000.
2. **Trelles Salvador, J. P.** Tesis de Competencia Profesional: "Modelamiento y optimización del diseño de un carburador para biogás". Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima 2001.
3. **Constant, M., Naveau, H., Febrero, G.L. y Nyns, E.J.**, "Biogas— end use in the European Community, Commission of the European Communities". 1996.
4. **Mitzlaff, K. Von**, "Engines for biogas". GATE. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien. Germany 1988.
5. **PAE**, Ministerio de Energía y Minas, "Eficiencia Energética". Lima 1999.
6. **Heywood, J.B.**, "Internal Combustion Engine Fundamentals". McGraw Hill Inc. USA 1988.