

Conversión de un motor de dos tiempos de gasolina E10 a gas natural domiciliario para su posterior uso con biogás

Converting a two-stroke E10 petrol engine to house natural gas for later use with biogas

Camilo A. Suesca

Gas Natural Fenosa

casuescam@correo.udistrital.edu.co

Germán F. Suárez

Siemens

gfsuarezp@correo.udistrital.edu.co

Germán A. López

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

galopezm@udistrital.edu.co

Este artículo presenta la conversión de un motor de dos tiempos de gasolina E10 a gas natural domiciliario para su posterior uso con biogás. En su desarrollo se encuentra la descripción del referente teórico, base para definir las partes del kit de conversión a utilizar, el re-diseño y adaptación de las partes y su ensamble en un banco de pruebas en el cual fue calculada la potencia eléctrica máxima a generar, potencia mecánica, torque y el análisis de productos de la combustión referentes para la adaptación posterior del motor a biogás.

Palabras clave: Gas natural, motor de dos tiempos, motor de gasolina

This article presents the conversion of two-stroke engine of E10 gasoline to domiciliary natural gas for later use biogas. In its development is the description of the theoretical basis for defining the parties concerning the conversion kit to use, redesign and adaptation of parts and assembly in a test in which was calculated the generate electric power, mechanical power, torque and analysis of combustion products related to retrofitting of the engine to biogas.

Keywords: Natural gas, two-stroke, petrol engine

Introducción

Con respecto a los cambios climáticos que se están observando, en el momento es importante disminuir el efecto invernadero causado por los gases contaminantes resultado de muchos procesos industriales y en mayor parte del parque automotor que circula por las calles a diario

(Bojin, Ghosal, Chuah, y Zhang, 2012). Por esta razón, es importante desarrollar nuevos tipos de combustibles para disminuir dicho impacto ambiental (Dam, 2008; Zieri y Forinton, 2009), el tema de este tipo de energías renovables ha sido desarrollado en la Universidad Distrital por el Grupo de investigación GIEAUD y el semillero de energías alternativas SEA. Se ha trabajado previamente en la parte de refrigeración pasiva, energía eólica y energía solar, pero en la parte de biomasa hasta el momento sólo se encuentran proyectos en curso. Se ha desarrollado también un prototipo de biodigestor para producir biogás.

Según lo anterior, surge el interrogante de si los motores de dos tiempos convertidos a gas natural domiciliario para un uso posterior con biogás contribuyen a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono causante de la contaminación en Bogotá (Castro, Aponte, Sanchez, y Castro, 2006).

De ser afirmativo este planteamiento, resultaría importante empezar a desarrollar los componentes de una planta de generación eléctrica para la investigación,

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 23, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Junio 9, 2014

Camilo A. Suesca, Gas Natural Fenosa; Germán F. Suárez, Siemens; Germán A. López, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Esta investigación fue financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: Camilo Andrey Suesca. Email: caansuma@hotmail.com

en especial sobre el motor de combustión interna, para empezar a investigar y producir este tipo de biocombustible, para así generar conciencia de su importancia, y por ende generar interés en el desarrollo de plantas para la generación eléctrica a base de este tipo de biocombustible.

Para ello, esta investigación propone realizar modificaciones al motor de combustión interna, y más específicamente sobre uno de dos tiempos, con el fin de evaluar los productos de la combustión, y comparar desempeño entre combustibles fósiles como la gasolina E10, el gas natural domiciliario y el biogás. El objetivo final es utilizar el motor con este biocombustible para generar electricidad, siendo esta una opción importante, en primera instancia, en pequeñas comunidades aisladas, ya que se podría aprovechar dicha electricidad para la iluminación de espacios comunitarios y el apoyo de otras necesidades básicas a partir del procesamiento de los residuos orgánicos que generan. Usos a nivel industrial también representan ventajas en costos, ya que se constituiría en una alternativa real de auto-sostenimiento eléctrico. El fin principal es la reducción al máximo de dichos índices de contaminación por dióxido de carbono, al tiempo que se visibiliza una solución energética.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta la metodología de desarrollo, la cual incluye tanto los conceptos teóricos previos, como la estrategia de conversión del motor y la construcción del banco de pruebas. En la Sección 3 se presenta la memoria de cálculos realizados y las pruebas de validación aplicadas. En la Sección 4 se detalla la operación de la planta eléctrica a base de biogás, y finalmente, la Sección 5 concluye el artículo.

Metodología

Marco teórico

Gas natural. Es una mezcla de gases hidrocarburos livianos conformada principalmente por metano. Incluye además gases como etano, propano y otros hidrocarburos más pesados. Algunos gases inertes tales como nitrógeno y dióxido de carbono pueden estar presentes al igual que pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno y oxígeno. Se obtiene mediante la explotación de los depósitos subterráneos (yacimientos), en los cuales se encuentra en forma libre o asociado al petróleo. Una vez extraído se separa del crudo y se somete a un tratamiento para retirarle hidrocarburos (GLP y gasolina natural) e impurezas tales como vapor de agua, sólidos y productos corrosivos.

Kit de conversión a gas natural. Los componentes utilizados en conversiones a gas natural vehicular para motores carburados son los siguientes (YPFB Bolivia, 2012):

- Cilindro: ubicado en el baúl ó chasis.

- Válvula del Cilindro: instalada en el cuerpo del cilindro.
- Válvula de cierre manual: Instalada normalmente con la válvula de cilindro.
- Sistema de venteo: colocado en la válvula del cilindro.
- Tubería de alta presión: conexión entre el cilindro y el mezclador.
- Válvula de llenado: permite el abastecimiento de combustible.
- Manómetro indicador: permite controlar el nivel de combustible, a través.
- Mangueras de baja presión.
- Selector de combustible (conmutador).
- Interfaz para el sistema de información.
- Variador de encendido.
- Regulador de presión.
- Mezclador.
- Electroválvulas de combustible.

El motor de dos tiempos. En el ciclo de dos tiempos se realiza el ciclo completo en dos carreras de pistón. Son motores mucho más simples que los de cuatro tiempos pues no poseen válvulas ni distribución. En la Fig. 1 se puede ver un corte transversal del motor de dos tiempos para poder ver las partes internas del motor (Sanz, 1981).

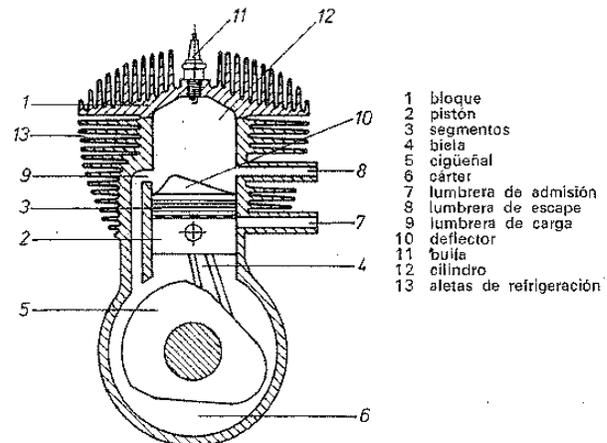


Figura 1. Motor de dos tiempos (Sanz, 1981).

Su funcionamiento es el siguiente:

- Primera media vuelta de cigüeñal: el pistón sube comprimiendo la mezcla fresca y descubriendo una (admisión y compresión) lumbrera (orificio situado en la parte inferior de la pared de cilindro) o abriéndose una válvula por donde entra la mezcla al cárter. Se produce la chispa y comienza a bajar el pistón.
- Segunda media vuelta de cigüeñal: casi al final de la bajada del pistón se descubre la lumbrera de (expansión + escape) escape o se abre la válvula de escape y se expulsan los productos quemados (inicio de expulsión). Poco después entra el combustible que entró al cárter, a través de la lumbrera de transferencia y entra mezcla fresca procedente

del cárter desalojando los productos quemados a través de la lumbrera de escape.

Biogás. El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire (esto es, en un ambiente anaeróbico).

Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación:

- Metano, CH₄ 54 - 70 % volumen
- Bióxido de carbono, CO₂ 27 - 45 %
- Hidrógeno, H₂ 1 - 10 %
- Nitrógeno, N₂ 0.5 - 3 %
- Ácido Sulhídrico, H₂S 0.1 %

El biogás es el resultado de la digestión de la biomasa en condiciones anaerobias, posee un valor calórico de unos 5.500 kcal/m³ (Aczia BioGas, 2012).

Potencia. En ingeniería mecánica, la determinación de la potencia se realiza a través de la medida de dos magnitudes elementales (el par y la velocidad angular) aplicando después la siguiente ecuación 1

$$P = M \times \omega \quad (1)$$

Donde:

- *P* Potencia (kW)
- *M* Par (Nm)
- ω Velocidad angular (rad/s)

La potencia al freno, también conocida como potencia efectiva representa la potencia transmitida al eje de salida del motor. Se conoce como potencia al freno porque se sensa con un dispositivo que acoplado al motor que se opone al torque del mismo. El dispositivo permite conocer el momento de freno, y dada la velocidad angular del eje se conoce la potencia efectiva.

- $T = R \times f = L \times F$ Torque desarrollado en freno

Conversión del motor

A continuación (tabla 1) se muestran los parámetros operativos de fábrica del motor objeto de estudio.

Regulador de presión. Mecanismo que reduce la presión del GNCV que llega del cilindro de almacenamiento a 205 bar (3.000 PSI), para entregarlo al mezclador a valores cercanos a la presión atmosférica.

Las presiones de regulación que maneja el fabricante (Lovato) son:

- De 220 bar a 4,5 +/- 0,5 bar con la primera etapa.
- De 4,5 +/- 0,5 bar a 1,7 bar con la segunda etapa.
- De 1,7 bar a 0,8 bar con la tercera etapa.

Entendiendo que en el proyecto no se maneja el mismo concepto de descompresión de cilindro (220 bar /3000 psi) sino el aprovechar la presión de la red domiciliaria (en

Tabla 1
Parámetros del motor Mitsubishi T-200 (ACCEFYN-UPME, 2003).

Especificaciones Motor	
Cilindrada	42,7 CC
Motor	2 TIEMPOS CON MEZCLA DE NAFTA CON ACEITE 2T
Proporción mezcla:	25:1 NAFTA SUPER 1L Y 40CC DE ACEITE
Potencia máx.	1,45 Kw A 7000 RPM
Tanque	0,9 L
Eje	MACIZO
Sistema de arranque	A CORDEL RETRACTIL
Embrague	CENTRÍFUGO
Vibración	4,9 / 6,3 m/seg.

promedio 19 milibares de entrada), se decide suprimir la primera etapa del regulador quitando la pieza accionadora del balancín ya que con ello se puede trabajar menores presiones con el regulador de presión y obtener un menor caudal a la salida del mismo que sería el factor más importante para evitar el ahogo del motor; con la nueva modificación el regulador reduce de 19 mbar a 9 mbar (Fig. 2 y Fig. 3).

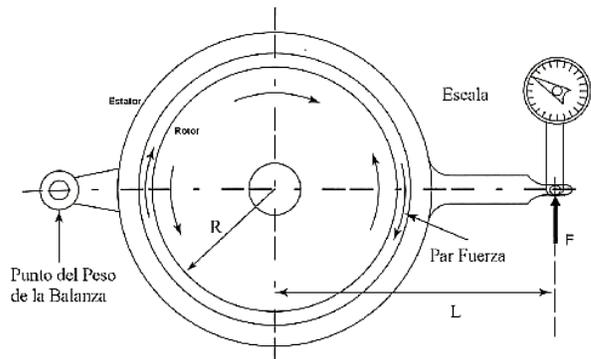


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre para un freno utilizado para hallar la potencia al freno.

Mezclador. La función del mezclador es dosificar el ingreso de la mezcla aire-combustible a la admisión del motor, en la proporción óptima requerida para una perfecta combustión. Para el funcionamiento del motor con gas natural domiciliario y biogás se realizó el cálculo de las dimensiones del mezclador, el diseño se realizó por el Método Mitzlaff (Mitzlaff, 1988). En Mitzlaff se expone las siguientes consideraciones para un alto flujo volumétrico de aire:

- La velocidad del aire es alta.
- La presión del aire es baja en la sección del venturi.
- La diferencia de presión entre el gas combustible y la corriente de aire es alta.



Figura 3. Modificación a la primera etapa de regulación del regulador de presión.

- Gran parte del gas combustible fluye a través de las aberturas del mezclador junto con la corriente de aire.
 - Para un bajo flujo volumétrico de aire:
 - La velocidad del aire es baja.
 - La presión del aire es alta en la sección del venturi.
 - La diferencia de presión entre el gas combustible y la corriente de aire es baja.
 - Una pequeña parte del gas combustible fluye a través de las aberturas del mezclador junto con la corriente de aire.
- Según la teoría del método se deben calcular los parámetros de operación del motor para el diseño del mezclador, los cuales se referencian en la tabla 2.

Tabla 2
Parámetros de operación del motor.

Parámetro	Valor
Flujo de aire	0,77 Kg/s
Velocidad media del aire	20,88 m/s
Velocidad media del gas natural	73,05 m/s
Velocidad media del biogas	61,17 m/s
Flujo volumétrico del aire	$4,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo volumétrico del gas natural	$4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo volumétrico del biogas	$2,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Con los parámetros anteriormente calculados se obtienen las dimensiones del mezclador tanto para gas natural domiciliario y biogás, los cuales se referencian en la tabla 3.

Tabla 3
Dimensiones del mezclador para gas natural domiciliario y biogás.

Método Mitzlaff	A_i	d_{A_i}	A_T	d_{A_T}	A_d	d_{A_d}
Gas natural	$1,327 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	13mm	$2,79 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	5,97mm	$1,327 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ $\geq 5,47 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	5,05mm $\geq 2,64 \text{ mm}$
Biogás	$1,327 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	13mm	$2,79 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	5,97mm	$1,327 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ $\geq 4,593 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	5,05mm $\geq 2,41 \text{ mm}$

En la Fig. 4 se puede ver el plano para construcción y geometría sugerida para el correcto funcionamiento del mezclador para gas natural domiciliario y biogás en donde se acotan las dimensiones relacionadas en la tabla 3.

Construcción del banco de pruebas

Los pasos preliminares para la construcción del banco fueron los siguientes:

- Verificar las condiciones del motor asegurando óptimas condiciones de funcionamiento.
- Medida de la compresión del motor.

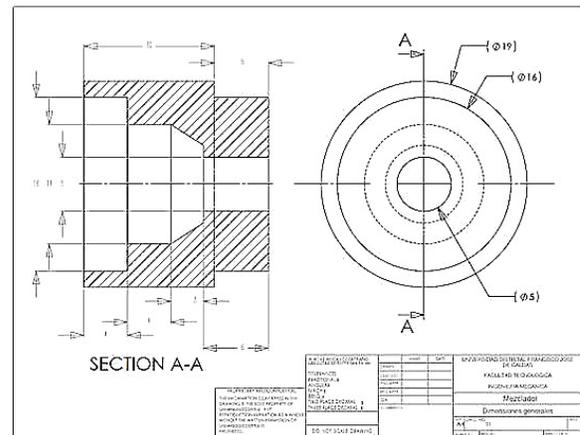


Figura 4. Plano del mezclador para gas natural domiciliario y biogás.

- Verificar el sistema eléctrico y de encendido del motor.
- En la fabricación del banco se realizaron los siguientes procesos:

- Proceso de corte y soldadura.
- Procesos de mecanizado.
- Proceso de ensamble.
- Proceso de pintura.

A continuación se da una descripción de los componentes del banco de pruebas.

Medición de potencia al freno. Los frenos utilizados en la medición de potencia actualmente, presentan mayor tecnología que el freno de Prony, el cual fue el pionero en este campo, sin embargo el principio sigue siendo el mismo, y los diseñadores actualmente buscan mejorarlos cada vez más, a continuación se presenta la selección del tipo de freno que se utilizó en el proyecto.

Freno de Prony. El freno de fricción mecánico por zapata y tambor fue el primero utilizado, llamado *Freno de Prony*. En el Freno de Prony por medio de una palanca se produce una fuerza que actúan sobre un sistema para poder vencer el torque proporcionado por el motor.

Diseño preliminar: Se identificaron los requerimientos para tener en cuenta en el diseño, luego, se utilizó la herramienta “matriz binaria” para identificar los más relevantes a tener en cuenta para su diseño, en dicha matriz se hizo la evaluación de la importancia que tiene un requerimiento sobre otro, para ello se hizo uso de los números 0 y 1, en donde el número 1 implica que un requerimiento tiene más relevancia sobre otro, y el cero que no la tiene; al final se tiene un porcentaje ponderado por cada requerimiento según su puntuación, Según los resultados de la evaluación anterior se identificó que los tres requerimientos con mayor puntuación fueron:

- Facilidad para medir peso (13 %).

- Efectividad en el freno (13 %).
- Costo reducido (12 %).

Ingeniería de detalle: Para determinar la fuerza que debe aplicar la mordaza del freno para detener el motor se tiene que (ecuación 2):

$$B_t = B_f \times r_e \quad (2)$$

Donde:

- B_f Torque de frenado (Torque del motor (N))
- B_t Fuerza de frenado (Nm)
- r_e Radio del disco (0,136 m en este caso)

$$P = \frac{T \times \omega}{1000} \quad (3)$$

- P = es la potencia generada por el motor, medida en kW
- ω = es la velocidad angular del eje, medida en rad/s
- T = es el torque, medido en Nm

Para determinar el torque del motor se debe determinar la velocidad angular con la cual desarrolla la máxima potencia, para lo cual se tiene que (ecuación 4):

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \times n \quad (4)$$

Dónde:

- n = Revoluciones del motor, medidas en rpm.

Según datos de catalogo del motor, el valor máximo de revoluciones que se puede llegar a obtener son 7000 rpm, que equivalen a 733,03 rad/s, tal como se detalla a continuación (ecuación 5):

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \times n = \frac{2\pi}{60} \times 7000 = 733,03 \text{ rad/s} \quad (5)$$

El torque teórico realizado por el motor, con una potencia máxima de 1,45 kw según catálogo es (ecuación 6):

$$T = \frac{P \times 1000}{\omega} = \frac{1,45 \text{ kW} \times 1000}{733,03 \text{ rad/s}} = 2 \text{ Nm} \quad (6)$$

De esta manera se puede determinar la fuerza aplicada por la mordaza del freno de la siguiente forma (ecuación 7):

$$B_t = \frac{B_f}{r_e} = \frac{2 \text{ Nm}}{0,136 \text{ m}} = 14,70 \text{ N} \quad (7)$$

De acuerdo con el cálculo se decide adquirir un freno mecánico ya que es el que necesita menos fuerza de frenado (0,51 kN), de esta manera determinamos adquirir un sistema de freno de disco mecánico de bicicleta accionado manualmente ya que la fuerza de frenado calculada es relativamente pequeña y este mecanismo es capaz de brindarla, los frenos de disco de este tipo están diseñados para tener cargas variables aplicadas para diferentes longitudes de tiempo.

Con respecto a los cálculos para seleccionar la celda de carga que censa la fuerza de frenado de la mordaza del

freno de disco, se halló la fuerza ejercida por el torque en la longitud L de la palanca, que se transformó en kilogramos dando como resultado 1,77 kg, con lo cual se decidió adquirir una celda de carga para 150 kg, ya que da un margen de seguridad y un buen nivel de precisión en la medición además porque es el rango mínimo de medición que se encuentra en el mercado.

Acompañado de la celda de carga se adquirió el indicador digital el cual interpreta la señal que le envía la celda de carga marca BBG para poder ver el dato de peso que esta brinda.

Eje transmisión de potencia. Se realizó el diseño y cálculo del eje teniendo en cuenta los componentes que estarían acoplados en él como son las chumaceras, la tensión proporcionada por la polea-correa, el peso del sistema de freno y el peso propio del eje.

Este eje va acoplado directamente al embrague del motor por medio de la campana y a su vez tuviera la longitud necesaria para acoplar los componentes ya mencionados.

El material en el que se desea realizar el eje es acero AISI-SAE 4140 (UNS G41400) el cual tiene una resistencia a la fluencia de 690 Mpa a tensión y a cortante se divide este dato sobre raíz de 3 y nos da que a cortante es de 398,37 Mpa. Inicialmente se asume un factor de seguridad de 2 para determinar el diámetro mínimo del eje.

$$\tau_y = \frac{\tau_{4140}}{F.S.} = \frac{398,37 \text{ Mpa}}{2} = 119,18 \times 10^6 \text{ pa} \quad (8)$$

Despejado de la ecuación 9 a c tenemos el diámetro mínimo para el eje de la siguiente forma:

$$c = \sqrt[3]{\frac{2 \times T}{\pi \times \tau_y}} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 2 \text{ Nm}}{\pi \times 119,18 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}} = 1,85 \text{ mm} \quad (9)$$

Pero como c es el radio, lo que indica que el diámetro mínimo es de 3,71 mm para el eje, se decide fabricar el eje de 5/8- porque la campana ya tiene una perforación por donde se va a acoplar el eje, de esta manera y de acuerdo con los cálculos no hay riesgo de sufrir una falla por torsión.

En la Fig. 5 se puede ver el plano para construcción y geometría sugerida para el correcto funcionamiento del eje para la transmisión de potencia entre el motor y el freno.

Alternador. El principio básico de generación de corriente, es por inducción electromagnética. Cuando las líneas de fuerza producidas por un campo magnético cortan un conductor en movimiento, se obtiene en los extremos de éste una diferencia de potencial o tensión inducida. Si se conectan dichos extremos a un circuito provocaran una circulación de corriente eléctrica a través del mismo.

Rodamientos. Se definió inicialmente que la mejor disposición es ubicar el sistema de freno de disco entre dos rodamientos con soporte de pedestal (chumaceras) autoalineantes con rodamiento rígido de bolas, este tipo

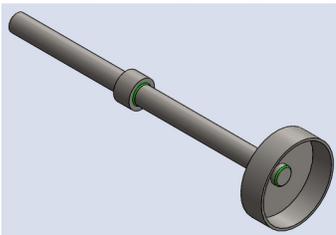
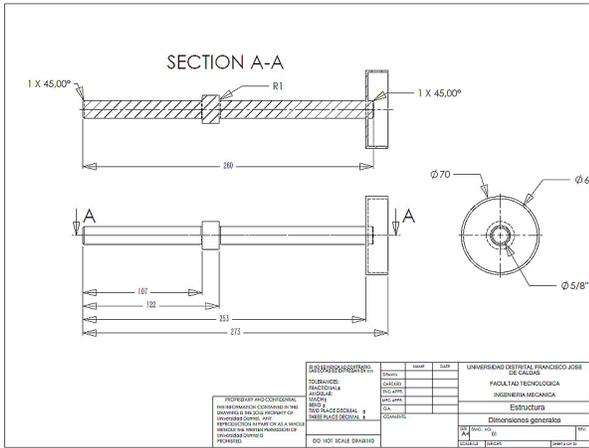


Figura 5. Plano e isométrico del eje en CAD.

de componentes son de fácil instalación y mantenimiento. Se seleccionaron rodamientos SKF con pedestal dada su amplia representación y calidad, de diámetro del eje: 35 mm tolerancia h6.

Tacómetro digital. Para obtener la medición de las rpm del motor se decidió utilizar un sensor de proximidad con un visualizador digital (medidor de pulsos con cinta reflectiva), este sensor genera un pulso cada vez que la cinta interrumpe la señal del láser, así que ubicando este sensor cerca al eje se obtiene la medición. Se adquirió entonces el tacómetro digital láser marca LIXE COLOMBIA referencia DT2234C.

Tablero de instrumentos. El tablero se diseñó para contener los indicadores principales del motor, el visualizador de la celda de carga, el indicador de las rpm del motor, testigo de la batería, medidor de voltaje, medidor de amperaje, el interruptor de las luces de las exploradoras, las exploradoras, interruptor para paso de corriente a los instrumentos, el caliper del freno de disco, el acelerador de gasolina y la parada de emergencia.

Cable de acero de aceleración para el carburador. El acelerador es de accionamiento manual y está ubicado a mano derecha del tablero de control como se puede observar en la Fig. 6. Por Medio de una palanca similar a la del freno permitiendo el paso de combustible gasolina E10 al carburador, solo funciona cuando el motor está operando en gasolina y una parada de emergencia la cual es independiente en qué tipo de combustible está operando el motor gasolina o gas natural domiciliario.

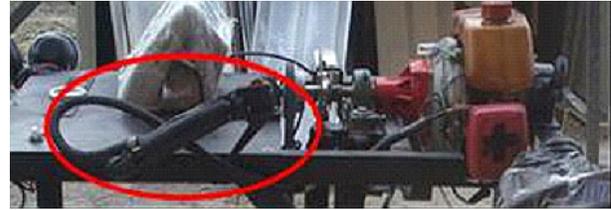


Figura 6. Cable de acero para aceleración del carburador.

A continuación en la Fig. 7 se muestra de manera ilustrativa en CAD una imagen del banco de pruebas terminado con todos sus componentes anteriormente descritos.

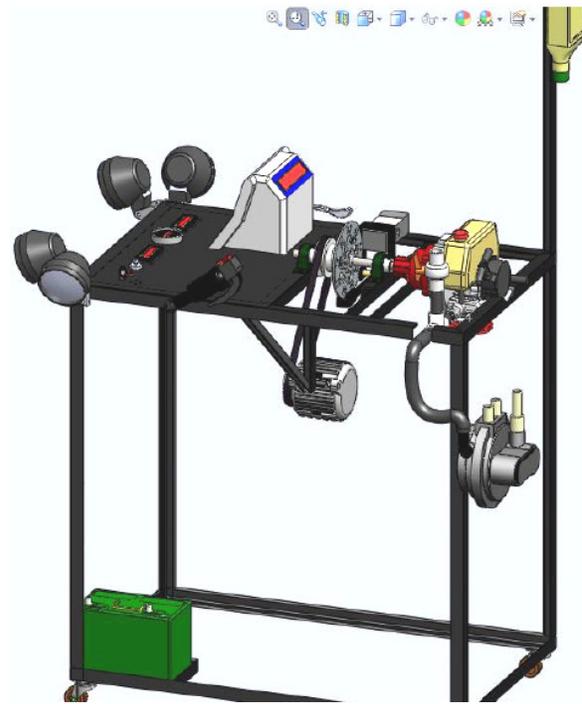


Figura 7. Imagen CAD del banco de pruebas.

Cálculos y pruebas

Verificación de sistema de lubricación

El sistema de lubricación para el motor de dos tiempos Mitsubishi T200 funciona en la mezcla del lubricante con el combustible, los dos en propiedad física líquida, en el proyecto al momento de emplearlo con combustible gaseoso (gas natural) se debe cambiar la forma como se lubrica el motor, por ello, se procedió a introducirlo por goteo en el conducto de admisión de combustible y aire al motor, este, por succión es aspirado para lubricar las partes internas del motor (pistón, biela, cigüeñal y cojinetes).

Una de las mejores formas para garantizar el goteo fue la selección de un venoclisil el cual controla las gotas que

deben bajar a través de una válvula. La cantidad de gotas de lubricante se regularon a través de la prueba de gases en las que se tuvieron en cuenta las revoluciones y las concentraciones en los gases de escape que este expulsaba por causas de la combustión, en la tabla 4 se puede observar la frecuencia de goteo recomendada a determinado rango de revoluciones por minuto empleando como combustible el gas natural.

Tabla 4

Goteo sistema de lubricación a gas natural.

RPM	HC	Gotas/min
5188	280	6
3767	200	5
2100	130	5

Después de encender el motor varias veces funcionando con gas natural luego de su conversión y exactamente después de haberlo apagado funcionando con este, se decide desarmar el motor para inspeccionar sus piezas internas para descartar residuos no deseados, partículas de hollín o excesivo desgaste en las piezas.

Al desarmar el motor la primera impresión que se tiene es que se observa muy pocos residuos de hollín y una fina película de aceite en todas las piezas lo cual nos indica que en la succión y gracias al movimiento del pistón el lubricante está llegando a todas las piezas móviles lo cual evita el desgaste excesivo en las piezas, en la Fig. 8 se puede observar dicho comportamiento.



Figura 8. Estado general de las piezas móviles del motor.

Medición de torque y potencia mecánica del motor

La prueba de torque y potencia se realiza a distintas revoluciones, los elementos del banco utilizados para tal fin son el conjunto de freno prony con su celda de carga e indicador junto con el sensor óptico de revoluciones de rpm.

Con los datos obtenidos de torque en la prueba se obtuvieron las siguientes gráficas (Fig. 9), aclarando que con carga es cuando se tiene una en marcha el circuito eléctrico de las exploradoras.

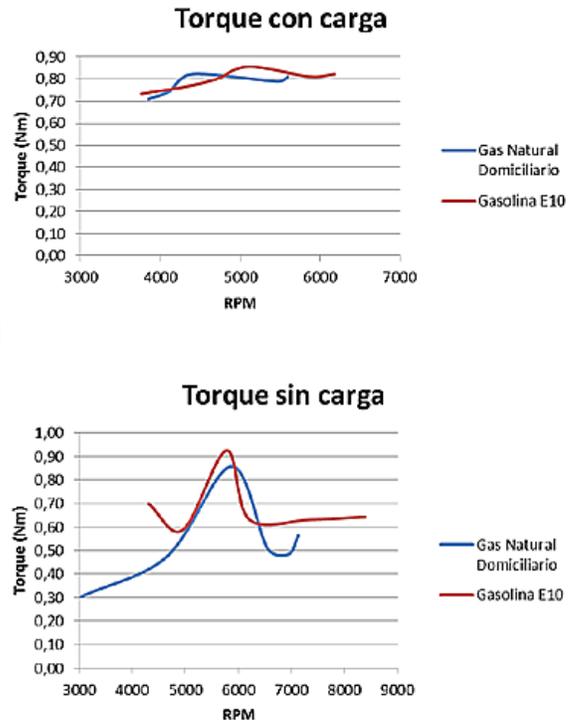


Figura 9. Gráfica Torque vs RPM.

Los valores más altos obtenidos de la Fig. 9 son los siguientes para cada combustible de acuerdo a la siguiente tabla 5.

Tabla 5

Valores torque máximos.

Combustible	Torque con carga	Torque sin carga
Gasolina E10	0,86 N/m	0,92 N/m
Gas natural domiciliario	0,82 N/m	0,86 N/m

En la Fig. 10 se puede ver el valor de Potencia vs RPM del motor con carga y sin carga, la diferencia del comportamiento de la tendencia de los combustibles se debe a que con carga es más difícil observar el pico máximo debido al esfuerzo que generan los componentes mecánicos acoplados, sin carga esta característica física se puede observar mejor, observando un pico máximo y un decrecimiento de ella.

Comparando los valores de la tabla 6 se tiene una reducción del 25,74 % entre la potencia teórica (Alvarez, 2005) y la que nos da el fabricante, una reducción del 38,11 % entre la prueba de potencia del motor en gasolina y la potencia teórica y una reducción del 35,64 % entre la prueba de potencia del motor en gas natural y la potencia teórica.

Dichos porcentajes de reducción son aceptables ya que no difieren mucho del valor ideal o teórico y se pueden

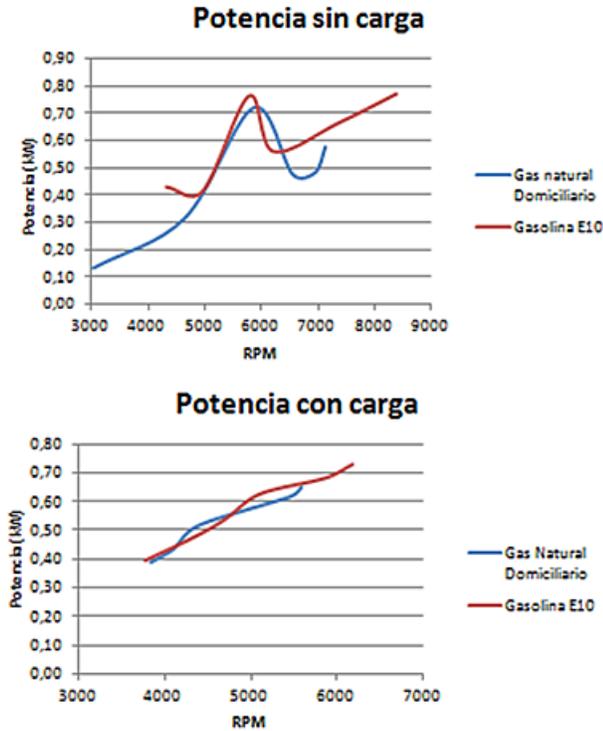


Figura 10. Gráfica de Potencia vs RPM.

Tabla 6

Comparación datos de Potencia vs RPM.

Dato	Gasolina E10		Gas natural domiciliario	
	Con carga	Sin carga	Con carga	Sin carga
Potencia teórica del motor (bruta)	2,02 KW		1,96 KW	
Potencia del motor según el fabricante	1,5 KW		N/A	
Prueba de potencia en el motor (con potencia corregida)	0,73 KW	0,77 KW	0,65 KW	0,72 KW

considerar resultado del estado del motor ya que es de segunda y los componentes del motor ha sufrido desgaste, además se puede ver que el comportamiento del motor con gas natural no difiere mucho del comportamiento de gasolina teniendo esto como referente para decir que la conversión no afecta el funcionamiento del motor, las pérdidas de potencia de la conversión entre gasolina y gas natural son del 10,7 % con carga (correa del alternador acoplada) y del 25,4 % sin carga (correa del alternador no acoplada).

Análisis de los productos de la combustión con gasolina E10

Se realiza el análisis de los gases para gasolina E10 según la resolución 0910 DE 2008 del MINISTRO

DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, los valores de referencian en la tabla 7.

Tabla 7

Máximos niveles de emisión permisibles (motor dos tiempos) según Resolución nacional.

Año modelo	CO (%)	HC (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)
2009 y anterior	4,5	700	10	5
2010 y posterior	5	600	10	5

Los valores obtenidos en la prueba se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Resultados análisis de gases para gasolina.

	CO (%)	HC (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)
Norma	5	600	10	5
5324 RPM	0,57	482	0,5	19,60
2100 RPM	0,43	290	0,5	19,77
Aprueba	Si	Si	Si	Si

Los datos obtenidos se compararon con los datos de la resolución (tabla 7) y, según el análisis realizado con los valores obtenidos consignados en la tabla 8, el motor no es contaminante y pasa la prueba de gases ya que los valores están dentro del rango permitido (ACCEFYN-UPME, 2003).

Análisis de los productos de la combustión con gas natural

Se realiza ahora el análisis de la combustión con gas natural determinando el exceso de aire utilizado para la combustión de metano, de acuerdo al análisis que nos da el analizador de gases, según la tabla 9 se realiza el balance estequiométrico teniendo en cuenta los porcentajes del análisis Orsat.

Tabla 9

Resultados análisis de gases para gas natural.

	CO (%)	HC (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)
5188 RPM	0,18	280	0,2	20,13
1500 RPM	0,02	130	0,5	20,02

Por lo tanto según los cálculos para determinar el exceso de aire se obtiene un porcentaje de 19,21 % en máxima revolución y 26,67 % en mínima revolución, con este resultado se está presentando una combustión completa lo que indica que se están quemando todos los productos

de la combustión sin generar residuos de la combustión y con ello la operación no se está realizando con un motor contaminante.

Comparación resultados análisis de gases entre gas natural y gasolina E10

Según la tabla 8 y el análisis del numeral anterior, se obtuvo una considerable disminución en el porcentaje de CO (Monóxido de carbono), HC (Hidrocarburos) y, un aumento en el porcentaje de oxígeno. Lo anterior indica que el motor de dos tiempos funcionando con gas natural domiciliario tiene un mejor trato al medio ambiente ya que disminuye la emisión de los gases contaminantes tan importantes como el CO, el cual, es un gas tóxico, resultado de una combustión incompleta que con el gas natural es menos notoria siendo característica de los motores de dos tiempos por la ineficiencia de su ciclo de funcionamiento y de hidrocarburos (emitidos en una forma de quemado incompleta) visible en los resultados de los análisis de los productos de la combustión, de lo anterior se puede decir que se logra el objetivo de ayudar al medio ambiente con la adecuación del motor a gas natural.

Planta eléctrica a base de biogás

Según el método de Mitzlaff se calcularon los parámetros de funcionamiento del motor (tabla 10) los cuales se garantizan con las medidas del mezclador de la tabla 11.

Tabla 10

Parámetros de operación del motor.

Parámetro	Valor
Flujo de aire	0,77 Kg/s
Velocidad media del aire	20,88 m/s
Velocidad media del biogás	61,17 m/s
Flujo volumétrico del aire	$4,20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo volumétrico del biogás	$2,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 11

Parámetros constructivos del mezclador calculados por el método Mitzlaff.

Método Mitzlaff	A_t	d_{ut}	A_r	d_{ar}	A_e	d_{ae}
Biogás	$1,327 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	13 mm	$2,79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	5,97 mm	$1,327 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \geq 4,593 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$5,05 \text{ mm} \geq 2,41 \text{ mm}$

Biodigestor

La capacidad de almacenamiento de gas debe tener en cuenta la tasa de producción, así como la velocidad y el período de consumo de gas [6]. Con los datos calculados de los parámetros de operación del motor se sabe que el flujo volumétrico del biogás (f_c) es de $1,01 \text{ m}^3/\text{h}$ durante un

período de funcionamiento de dos horas (t), frecuencia de tiempo recomendada para la operación del motor según el fabricante. El volumen de gas consumido por período es de (ecuación 10):

$$1,01 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 2\text{h} = 2,02 \text{ m}^3 \quad (10)$$

Ya que se necesita saber la producción de biogás (V_{bg}) y partiendo de la medición de combustible obtenida de la línea de presión domiciliaria en gas natural, se estima que es de $0,82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, lo cual se traduce en un volumen producido de (ecuación 11):

$$0,82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 2\text{h} = 1,65 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Durante el período de funcionamiento. El volumen de almacenamiento de gas (V_s) sólo tiene que atender a la diferencia entre el volumen consumido y producido durante el período de funcionamiento de (en h , ecuación 12):

$$V_s = (f_c \times t) - (V_{bg} \times t) = t(f_c - V_{bg}) \quad (12)$$

En este caso concreto, el volumen de almacenamiento es (ecuación 13):

$$V_s = 2\text{h} \left(1,01 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 0,82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 0,38 \text{ m}^3 \quad (13)$$

La tasa de producción de planta por día y hora es (ecuación 14):

$$V_{bg} = 2 \times 1,01 \times 0,77 = 1,55 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (14)$$

Con los datos anteriores volumen del digestor sería de (ecuación 15):

$$V_d = 2,02 \times \left(\frac{1}{0,8} \right) = 2,525 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Generador de potencia

Partiendo de los datos obtenidos de la figura 13 en la que se presenta el resumen de la comparación de la potencia del fabricante, teórica y de prueba, las potencias máximas obtenidas en la prueba de potencia mecánica fueron de 0,77 KW con gasolina y 0,72 KW en gas natural.

Con estos datos se recomienda un generador eléctrico que pueda operar bajo las condiciones del motor Mitsubishi T200, como mínimo 1300 RPM a 1,45 HP, y siguiendo todo esto que este pueda producir 0,7 KW.

El generador que se tiene acoplado es un alternador de carro Mazda 323 el cual es el que distribuye la energía para todo el circuito eléctrico del carro y este es capaz de generar como máximo 0,72 KW y opera como mínimo desde las 800 RPM.

Para la segunda fase del proyecto se recomienda diseñar un generador que aproveche las revoluciones del motor (7000 rpm máximo) a 1 Hp ya que comercialmente no se consigue debido a que los generadores de AC se consiguen a partir de 2 HP.

Conclusiones

La conversión del motor de gasolina E-10 de dos tiempos a gas natural domiciliario fue un éxito, el motor es operativo y se comprobó que puede trabajar a bajas presiones a diferencia del gas natural vehicular teniendo en cuenta la presión del gas natural domiciliario es 19 milibares. Se concluye que el buen estado del motor obtenido al realizar el diagnóstico del mismo es un factor muy importante para el éxito de la conversión a gas natural.

Teniendo como referente el kit de conversión de un motor de cuatro tiempos, se identificaron los componentes a tener en cuenta y modificar para poder realizar la conversión de un motor de dos tiempos, dichos componentes fueron el mezclador y el regulador de presión. Luego de realizar y certificar que la conversión fue satisfactoria se procedió a garantizar la correcta lubricación del motor de dos tiempos al desarmar el motor y ver en qué condiciones se encontraba el pistón la cámara de combustión, posterior al haber sido puesto en funcionamiento solamente a gas natural el resultado fue optimo pues estas partes estaba muy bien lubricadas a través del sistema de goteo empleado por medio de un venoclisis.

Se realizaron los análisis de los productos de la combustión con gasolina E-10 y gas natural domiciliario y, según los datos arrojados por el analizador de gases OPA100 se demuestra que el motor trabajando con gas natural es más amigable al medio ambiente ya que se reducen los gases contaminantes (hidrocarburos, monóxido de carbono) y se aumenta el contenido de oxígeno. Al análisis de productos de la combustión del gas natural se le realizó el cálculo de la cantidad de exceso de aire a través de estequiometría de la reacción, la cantidad de exceso de aire en la combustión, si es mayor a cero quiere indicar que se están quemando todos los productos de forma satisfactoria para las dos marchas en ralentí y la máxima o crucero, en el caso del motor Mitsubishi fue mayor así que se tiene la seguridad de la quema.

Se diseñó el banco de pruebas logrando uno de los objetivos que era medir el torque y se logró adaptar un medidor de potencia para determinarla aplicando la Norma NTC 1930 con el fin de medir el torque teniendo en cuenta el factor de corrección atmosférico, así como lo sugiere la norma de acuerdo a las condiciones donde se esté realizando la prueba. La diferencia de la máxima potencia observada en la prueba en comparación con la teórica y la que menciona la ficha técnica, donde una de las posibles causas pudiese ser la altura, donde aproximadamente se pierde un 10 % de esta por cada 1000 metros de altura y la difícil obtención de unos

factores atmosféricos estables pues para obtener una potencia similar se debe realizar en un ambiente controlado y equipos de mayor precisión y resolución.

Se realizaron los cálculos preliminares para una futura construcción de una planta eléctrica a base de biogás comprendiendo los parámetros de funcionamiento del motor con el kit de conversión, el biodigestor y la generación eléctrica. Se obtuvo el dato de potencia eléctrica máxima generar (0,77 KW) con el banco de pruebas partiendo del dato de la potencia mecánica. Se calculó la cantidad de biogás necesaria para la combustión en el motor de dos tiempos a través del diseño del mezclador para la conversión, pues en este, se tuvieron en cuenta los dos combustibles tanto el gas natural como el biogás ya que en este elemento se hace la mezcla de aire combustible. Se elaboraron todos los planos del diseño del banco y sus respectivos procesos de fabricación logrando un correcto ensamble de los componentes.

Se elaboraron de manera satisfactoria los manuales de usuario, ficha técnica, guías para el mantenimiento del banco y un manual de calibración para el uso correcto por parte de los estudiantes. El desarrollo de bancos de pruebas es de gran utilidad para el estudio de diferentes fenómenos, máquinas y dispositivos en la práctica, en la cual se comprende de mejor manera los conceptos de ciencias térmicas.

Según los datos obtenidos del marco teórico sobre el gas natural según Lovato uno de los fabricantes de componentes para conversión de vehículos a gas natural vehicular (4 tiempos) el motor pierde aproximadamente un 14 % de potencia con respecto a la gasolina E10, en los cálculos realizados la pérdida de potencia del motor estudiado se encuentra en un rango del 10 al 25 % confirmando la teoría. Se determinó realizar mediciones de las revoluciones del motor a la salida del eje pues el tacómetro del motor es muy inestable y realizaba cambios en las revoluciones con forme se aceleraba el motor por esto se realiza la medición de rpm con un tacómetro láser a la salida del eje.

Referencias

- ACCEFYN-UPME. (2003, Julio). *Factores de emisión de los combustibles colombianos. informe final* (Inf. Téc.). Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales.
- Aczia BioGas. (2012, Octubre). *Gestión integral de inversión en plantas de biogás*. On line. Retrieved from www.energrecol.com/ficheros_pdf/Plata%20de%20Biogas%20Dossier%20inversores.pdf
- Alvarez, J. (2005). *Máquinas térmicas motoras*. Alfaomega.
- Bojin, L., Ghosal, D., Chuah, C., y Zhang, H. (2012). Reducing greenhouse effects via fuel consumption-aware variable speed limit (FC-VSL).

- IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(1), 111-122.
- Castro, J., Aponte, G., Sanchez, V., y Castro, M. (2006). Colombian experience on insulation pollution level measurement applying the ESDD methodology. En *Tdc 06. ieeepes transmission & distribution conference and exposition: Latin america* (p. 1-5).
- Dam, Q. (2008). The MPG survey: Questioning the biased perception of automobile fuel economy. En *Ieee energy 2030 conference* (p. 1-5).
- Mitzlaff, K. (1988). *Engines for biogas: theory, modification, economy, operation*. ViewegTeubner Verlag.
- Sanz, A. (1981). *Motor alternativo de dos tiempos. tecnología automoción* (4.^a ed.). Edebé.
- YPFB Bolivia. (2012, Octubre). *Especificaciones técnicas kits de conversión para gnv. adquisicion de kits de conversión y cilindros para gnv*. On line. Retrieved from http://www.yppfb.gob.bo/documentos/contrataciones/gnrgd/CDA041/ANEXO_2.doc
- Zieri, W., y Forinton, J. (2009). From waste to efficient fuel utilisation. En *2009 ieee cement industry technical conference record* (p. 1-15).