



Gas Pobre: Factibilidad de su uso en los motores ZIL – 130

Poor Gas: Feasibility of use other ZIL - 130

Néstor - Proenza Pérez

Recibido: Septiembre del 2010

Aprobado: Mayo del 2011

Resumen/ Abstract

En este trabajo se hace un estudio de los diferentes tipos de gasificadores existentes, así como el estado actual de la tecnología de gasificación, realizando la selección del gasificador Downdraft Imbert Modificado, desarrollado por investigaciones del grupo de Conversión Térmica de la Biomasa de la Universidad de Camagüey, por las ventajas que el mismo presenta para el accionamiento directo de un Motor de Combustión Interna, las cuales son, baja concentración de alquitrán en el gas pobre ($<10\text{mg}/\text{Nm}^3$) y baja temperatura del gas producto a la salida del gasificador, el motor seleccionado es el ZIL-130, por ser de amplio uso en nuestro país y estar perfectamente adaptado al entorno cubano, se les realizaron diferentes cálculos teóricos con el objetivo de visualizar su comportamiento al sustituirle su combustible original por gas pobre así como una valoración económica de dicha sustitución, también se logro dimensionar el gasificador que alimentará dichos motores.

Palabras clave: gasificación, energía, alquitrán, gasificador downdraft, biomasa

In this work a study of the different types of existent gasifiers is made, as well as the current state of the gasification technology, carrying out the selection of the gasifier Downdraft Modified Imbert, developed by investigations of the group of Thermal Conversion of the Biomass, for the advantages that the same one presents for the direct working of a MCI, which are, low concentration of tar in the poor gas ($<10\text{mg}/\text{Nm}^3$) and low temperature of the gas product to, the selected motor is the ZIL-130, to be of wide use in our country and to be perfectly adapted to the Cuban environment, they were carried out different theoretical calculations with the objective of visualizing its behavior when substituting him its original fuel for poor gas as well as an economic valuation of this substitution, you also achieves dimensionar the gasifier that will feed this motors.

Key words: gasification, energy, tar, gasifier downdraft, biomass

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad a nivel global es el agotamiento de las fuentes de energía fósiles, que de acuerdo a los expertos alcanzará la máxima producción en las dos próximas décadas con una caída posterior sostenida. Por ende se hace necesaria la búsqueda de nuevas fuentes energéticas que sean respetuosas con el medio ambiente. Con el auge de las energías renovables, el potencial de la biomasa moderna (cultivos energéticos para producir un portador de energía) ha ganado atención y realmente tiene mucha importancia. La biomasa es un término que se utiliza para todo el material orgánico que provenga de las plantas, los árboles y las cosechas. La basura orgánica y los residuos agrícolas y de bosque también se consideran como biomasa. El mundo consume cerca del 11% de su energía de la biomasa, esto representa cerca de 44 EJ (sobre todo biomasa tradicional, que se utiliza para cocinar etc.), pero el potencial de la biomasa es considerable, contando con aproximadamente 2900 EJ como bioenergía teóricamente cosechable. Pero más interesantes son los 270 EJ que se podrían considerar técnicos disponibles sobre una base sostenible[1].

GASIFICACIÓN

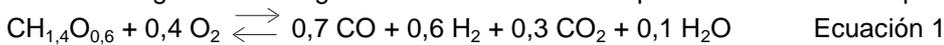
La gasificación de la biomasa es el proceso de conversión química en el cual la materia de base experimenta una descomposición térmica y produce generalmente combustibles gaseosos. La gasificación en la definición hecha por Higman y otros (2003) incluye las tecnologías; pirolisis, oxidación parcial e hidrogenación. La tecnología dominante es la oxidación parcial, que produce un gas con un alto contenido de H₂ y CO en una atmósfera de reducción con la presencia de aire, vapor u oxígeno. Diferentes presiones de trabajo pueden ser aplicadas, y el proceso puede ser de forma directa o indirecta.

La gasificación consiste en la conversión de la biomasa sólida en un gas combustible (y una cierta cantidad de calor sensible), mientras en la combustión el poder calorífico del sólido es completamente transformado en calor sensible. La gasificación ofrece algunas ventajas respecto a la combustión directa, un gas presenta mejores propiedades de combustión respecto al sólido, el proceso de combustión es más simple de controlar, necesita de una menor cantidad de aire y no ocurre la emisión de partículas, determinando una menor contaminación del aire y una mejor gestión de la planta.

La composición química de la biomasa puede ser considerada, una vez secada, aproximadamente constante e igual a: CH_{1,4}O_{0,6}.

El proceso de la gasificación es complicado e implica un número de pasos, como se vio anteriormente. La gasificación de la biomasa ocurre a relativamente altas temperaturas las que se extienden a partir de 800°C a 1600°C.

La reacción general de la gasificación de la biomasa puede ser descrita esquemáticamente por la ecuación [2- 3]:



Idealmente debe ocurrir una conversión completa de la biomasa, pero en realidad esta no ocurre.

La biomasa utilizada en este trabajo fue el Marabú ampliamente difundido en nuestro país.

La humedad con que se introdujo la madera en el gasificador fue de alrededor de 9,2%, con esta humedad se determina el coeficiente k (0.908) para llevar la composición de base seca a base trabajo. Al multiplicar cada componente por el coeficiente se llega a la composición en base trabajo de la biomasa que aparece en la tabla 1.

Tabla 1. Composición del marabú en base trabajo.

Composición química del marabú en base trabajo					
C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	Cenizas (%)	Humed. (%)
43.22	5.112	0.59	39.698	1.38	9.2

EL GASIFICADOR

El dispositivo donde tiene lugar la gasificación recibe el nombre de gasificador que no es más que un equipo que convierte la energía química de la biomasa o el carbón mineral en energía química de los gases a través de un proceso de transformación endotérmica.

Los gasificadores de biomasa, en comparación con los sistemas convencionales de energía, son relativamente benignos para el medio ambiente. No producen óxidos de azufre, previniendo la formación de lluvia ácida; tienen bajos niveles de partículas; y, sí los gasificadores consumen biomasa producida de manera sostenible, no provocan un aumento neto en los niveles globales del CO₂.

Algunos otros beneficios:

- Crean fuentes de trabajo en las zonas rurales.
- Pueden usar materia prima que no es adecuada para la combustión directa.

- La reducción potencial de los costos es alta.
- Los gasificadores térmicos de biomasa de pequeña escala son técnicamente confiables y económicamente viables.
- Los subproductos filtrados se reciclan de regreso a los campos agrícolas

Como inconveniente hay que señalar que debido a la presencia del monóxido de carbono (CO), el gas combustible es tóxico. En su forma cruda, el gas tiende a ser extremadamente sucio, conteniendo cantidades importantes de alquitrán, hollín, cenizas y agua.

Existen varios tipos de gasificadores, destacándose por su amplio uso los gasificadores Updraft, Downdraf, Crossdraf, y los de lecho fluidizado, ver figura 1. cada uno de ellos tiene sus propias características, diferenciándose fundamentalmente en la alimentación de la biomasa y la salida del gas así como en los niveles de partículas que generan, desatancándose el gasificador downdraft como el que menos niveles de alquitrán y partículas produce. En la tabla 1 y 2 se pueden observar algunas características de estos gasificadores.

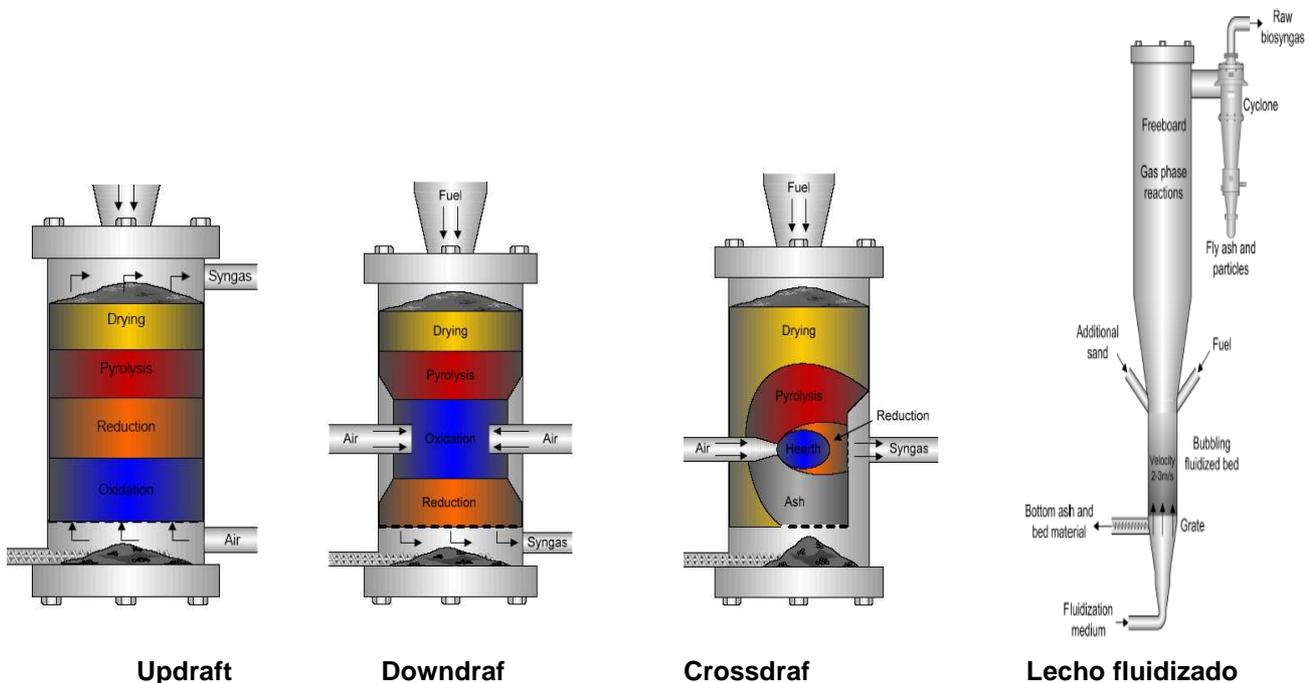


Fig. 1. Diferentes tipos de gasificadotes.

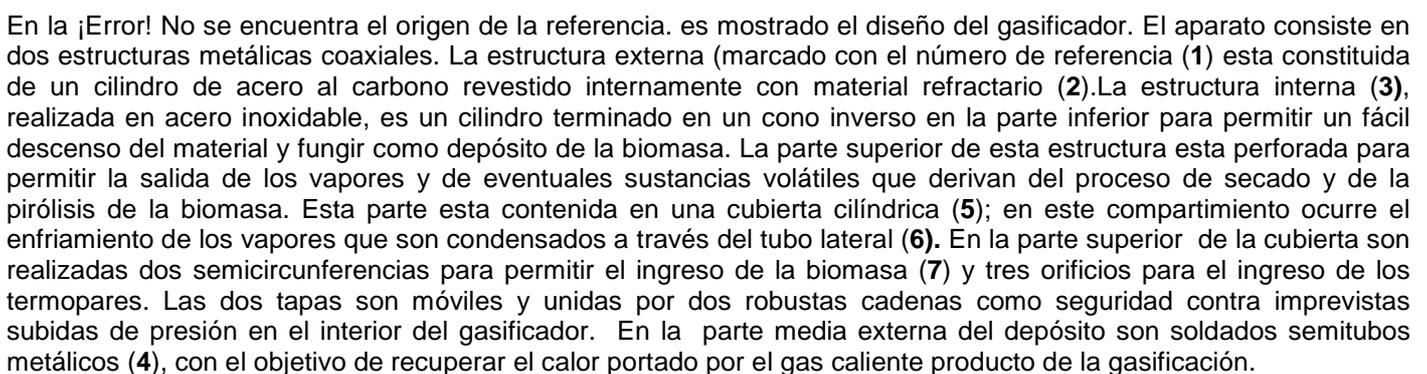
Los gasificadores concurrentes son los reactores que alcanzan el mínimo de concentración de alquitrán en los gases productos entre todos los diseños estudiados. De estos, el prototipo de diseño que se utilizo para este trabajo, es el gasificador Downdraft Imbert Modificado [4]. Según los estudios y experimentos hechos, este diseño puede ser usado en un motor de combustión interna sin la utilización de dispositivos auxiliares para el lavado y tratamiento del gas producto, ya que garantiza bajos niveles de alquitrán en el gas producto, el diseño Imbert es un gasificador que como ya se ha dicho es el que menos concentración de alquitrán deja en el gas producto, pero este valor todavía provoca un mal funcionamiento en el motor, por eso hacen falta dispositivos intermedios. Además el gas producto en estos gasificadores llega con demasiada temperatura y esto provoca también que el motor no opere en óptimas condiciones, ya que esto ocasiona una disminución de la potencia producto a que no entra la cantidad de gas adecuada para que el motor trabaje eficientemente, por lo que hay que poner equipos intermedios para el enfriamiento del gas. A este gasificador se le hicieron varias modificaciones, de todas estas dos fueron esenciales para el funcionamiento con gas pobre en motores de combustión interna sin enfriamiento y lavado previo. Las mismas fueron:

Néstor - Proenza Pérez

1. Se inclinó las boquillas del gasificador para disminuir la concentración de alquitrán. Con esta modificación se logró disminuir la concentración de alquitrán, pero esto trajo otro inconveniente importante, el cuál era que mientras más disminuía la concentración de alquitrán más disminuía por otra parte el valor calórico del gas pobre por lo que se tuvo que calcular el ángulo óptimo (72°) para compensar dichos valores, muy importantes para la eficiencia del motor y el gasificador.
2. El uso de rejillas en la parte superior de la zona reducción, las cuales permitieron un aumento de la zona de reacción, formando adicionalmente un filtro de impurezas arrastradas por el gas producto. Esta modificación trae consigo una disminución apreciable en la temperatura final de los gases productos, posibilitando su empleo en motores de combustión interna sin necesidad de enfriamiento previo.

El contenido de alquitrán máximo, después de estas modificaciones obtenido en el gas producto en el caso del Marabú, el cuál es la biomasa utilizada en este trabajo fue de 10 mg/Nm³, valor que cumple con los requerimientos exigidos por la mayoría de los motores modernos para poder ser empleado como combustible en los mismos. Estos resultados superan sensiblemente los obtenidos por otros autores que emplean la tecnología Imbert sin las modificaciones propuestas. Para que un motor de combustión interna trabaje sin fallas en su funcionamiento, es requisito importante que el equipo se alimente con gas suficientemente libre de polvo, alquitranes y ácidos. Las cantidades tolerables de estas sustancias variarán dependiendo del tipo y del equipo del motor, Tiedema y Van der Weide dan como cantidades medias tolerables, para los motores actualmente disponibles, los valores siguientes [5]:

Tabla 2. Valores medios de impurezas en el gas para aplicaciones en MCI.		
	Referencia	Valor Obtenido
Polvos	Menos de 50 mg/m ³ de gas. Preferentemente 5 mg/m ³ de gas.	7 mg/Nm ³
Alquitranes	Menos de 50 mg/m ³ de gas.	10 mg/Nm ³
Ácidos	Menos de 50 mg/m ³ de gas (medido como ácido acético).	-
Azufre	Menos de 2 mg/m ³	-
Alógenos (Cl+F)	Menos de 100 mg/m ³	-
Silicio	Menos de 20 mg/m ³	-

En la  Error! No se encuentra el origen de la referencia. es mostrado el diseño del gasificador. El aparato consiste en dos estructuras metálicas coaxiales. La estructura externa (marcado con el número de referencia (1) esta constituida de un cilindro de acero al carbono revestido internamente con material refractario (2). La estructura interna (3), realizada en acero inoxidable, es un cilindro terminado en un cono inverso en la parte inferior para permitir un fácil descenso del material y fungir como depósito de la biomasa. La parte superior de esta estructura esta perforada para permitir la salida de los vapores y de eventuales sustancias volátiles que derivan del proceso de secado y de la pirólisis de la biomasa. Esta parte esta contenida en una cubierta cilíndrica (5); en este compartimiento ocurre el enfriamiento de los vapores que son condensados a través del tubo lateral (6). En la parte superior de la cubierta son realizadas dos semicircunferencias para permitir el ingreso de la biomasa (7) y tres orificios para el ingreso de los termopares. Las dos tapas son móviles y unidas por dos robustas cadenas como seguridad contra imprevistas subidas de presión en el interior del gasificador. En la parte media externa del depósito son soldados semitubos metálicos (4), con el objetivo de recuperar el calor portado por el gas caliente producto de la gasificación.

En el extremo inferior del cono de la estructura interna esta ubicado el reactor propiamente dicho (9), también este está constituido por acero inoxidable de alta resistencia térmica y forma de cilíndrica, en el interior del cual se han realizado cinco orificios que forman entre ellos un ángulo de 72°. A través de estos orificios es ingresado el aire de oxidación distribuido por un toroide (8) externo al reactor. En la pared es perforada otra abertura para permitir la introducción de una antorcha a gas para el encendido inicial de la biomasa. El reactor está formado en su interior de un diafragma perforado (12) que tiene el objetivo de sostener la biomasa y permitir la salida del gas. Completa la estructura la rejilla metálica cónica (10), la cual tiene la tarea de sostener el carbón ingresado a través de la puerta (11) hecha sobre el cilindro metálico externo. Ubicada por debajo de la rejilla esta una escotilla para la descarga de la ceniza (13). El gas producido fluye hacia lo alto por la cámara formada por las dos estructuras, y es recolectado a través de una entubación puesta a 180° que converge en un único conducto de salida provisto de un dispositivo para la introducción de un termopar y el muestreo del gas. Ver tabla 3.

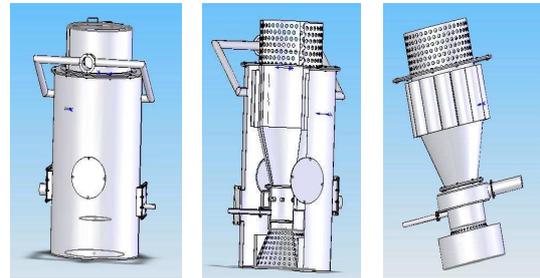
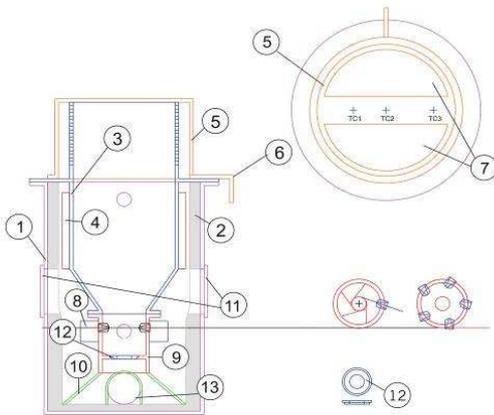


Fig. 2. Esquema del gasificador.

Tabla 3. Composición del gas pobre obtenido de la gasificación del marabú.

CO (%)	H ₂ (%)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
16.29	12.34	56.98	0.88	0.39	11.85

EL MOTOR

El motor seleccionado para ser acoplado a este gasificador fue el ZIL-130, figura 1. debido fundamentalmente a que es de fabricación rusa y entraron a nuestro país hace algunos años. Actualmente se emplean en los más diversos fines, desde su aplicación en carros de combate, hasta en la industria azucarera, estos son motores robustos y su principal desventaja es lo alto consumidores de combustible que son, es por esto que en la búsqueda de la eficiencia energética el país se ha dado a la tarea de cambiarlos por motores diesel más económicos y eficientes. Ver tabla 4.



Fig.3 Motor ZIL-130

Tabla 4. Datos técnicos del motor ZIL-130 original.

Motor ZIL-130	
No. de cilindro y posición.	8 V
Potencia nominal (kW)	123
Torque máximo (kgf*m)	41
rpm para la potencia nominal	3600
rpm para el torque máximo	1800
Relación de compresión	6.5:1
Diámetro del cilindro (mm)	100
Carrera del pistón (mm)	95
Consumo específico g/kWh	327.2

Se realizaron los cálculos correspondientes para el motor cuando consume gas pobre, se calculó la potencia, el consumo específico de combustible y el torque, para un rango de revoluciones por minutos del motor de 1000 a 2500 rpm, así como el consumo de madera, producción de gas del gasificador y el consumo del motor para una hora de trabajo, al igual que con el MCI trabajando con gasolina, con el gas producto de la gasificación, se hicieron las curvas

de consumo de madera, potencia mecánica del motor y la potencia eléctrica del generador eléctrico contra las revoluciones por minutos del motor. Para los cálculos con gas pobre se realizaron varias modificaciones al motor para que su funcionamiento con el nuevo combustible fuera eficiente, estas modificaciones fueron:

- Disminuir el índice de compresión del ZIL-130, que era de 6.5:1 y se disminuyó hasta 2:1, esto se hace debido a que los motores alimentados con gasolina el índice posible de compresión está limitado por el número de octanos del combustible, que es una medida del índice de compresión en que tiene lugar la detonación o golpeteo (que puede ocasionar serios daños al motor). Las mezclas de gas pobre y aire presentan unos números de octanos inferiores a los de las mezclas de gasolina y aire. Por este motivo, pueden emplearse unos índices de compresión inferiores (hasta 3:1) con el gas pobre, lo que se traduce en una mejor eficiencia térmica del motor y en un aumento relativo de la potencia de salida en el eje del motor.
- Disminuir las revoluciones por minutos del motor por debajo de las 2500 rpm, debido a que la velocidad máxima de los motores alimentados con gas pobre viene limitada por la velocidad de combustión de la mezcla combustible de gas pobre y aire. Como esta velocidad es baja, en comparación con las mezclas combustibles de gasolina y aire, la eficiencia del motor puede caer muchísimo si la velocidad de combustión de la mezcla y la velocidad media del pistón se hacen del mismo orden de magnitud. En los tipos de motores que se producen actualmente en serie, cabe esperar que este fenómeno se produzca a velocidades del motor de alrededor de 2500 rpm, por lo que los motores alimentados con gas pobre deben por tanto funcionar generalmente por debajo de esta velocidad.

Luego de estas aclaraciones el motor estuvo en condiciones de ser evaluado teóricamente para ver su comportamiento funcionando con gas pobre. Utilizando una serie de expresiones de cálculo característico de máquinas automotrices se logró determinar los parámetros fundamentales que rigen el funcionamiento del mismo. Ver gráfico 1.

Para determinar los parámetros de flujo de aire/gas, flujo de gas teórico y real, la potencia mecánica y eléctrica a la salida del árbol del MCI se siguió una metodología encontrada en sitio oficial de la FAO[5]. Según literatura especializada[6- 7] la caída de potencia que debe de registrarse al cambiar el combustible original de un MCI a gas pobre oscila entre un 25 – 35%, en este caso se observa que la caída de potencia es mayor del orden del 45% esto es debido a dos causas fundamentales, una es la anteriormente enunciada, o sea, que por tener el gas pobre un poder calórico bajo mucho menor que el de la gasolina va a generar menor potencia mecánica en el eje, esta reducción está en el orden de 25 – 35% aproximadamente como ya se dijo anteriormente, ahora esto es si el MCI gira a las rpm nominales o sea para este caso sería de 3600 rpm, pero como para el gas pobre el MCI nunca alcanzara estas 3600 rpm (sólo hasta 2500), por eso, es que para el caso de motores de gasolina la pérdida de potencia es mayor aún porque además de la pérdida normal hay que agregarle la pérdida que se produce al disminuir las rpm del motor. Para el caso de los MCI que trabajan con diesel esto no es así, ya que estos trabajan generalmente alrededor de las 2500 rpm.

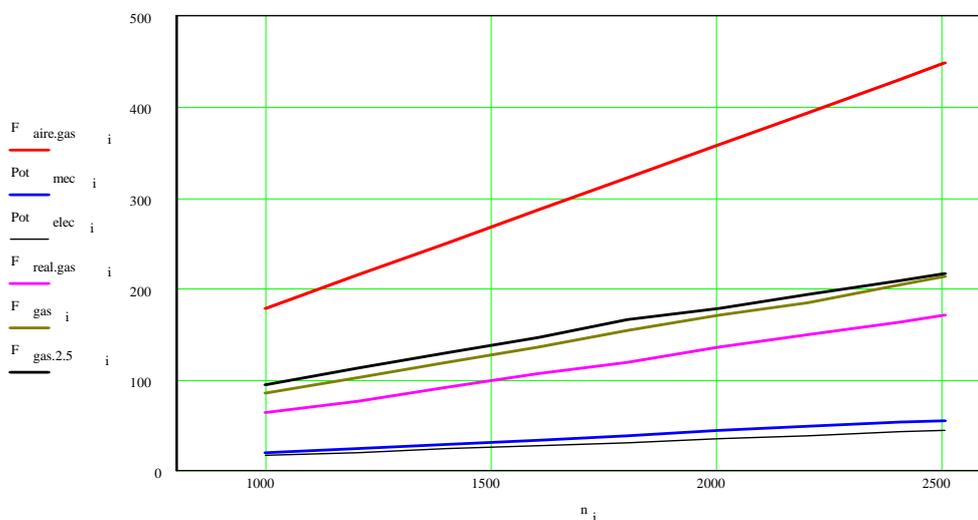


Gráfico 1. Representación de los datos calculados para el ZIL-130 con gas pobre.

Leyenda.

- $F_{gas.2.5}$ - Flujo de gas teórico. (m^3/h)
- Pot_{mec} - potencia mecánica del motor trabajando con gas pobre. (kW)
- Pot_{elec} - potencia eléctrica a la salida del generador eléctrico. (kW)
- $F_{real\ gas}$ - flujo real de gas dentro del motor. (m^3/h)
- $F_{aire.gas}$ - flujo de aire gas teórico que entra al motor. (m^3/h)
- F_{gas} - volumen de gas teórico dentro del motor. (m^3/h)
- n - rpm del motor con gas pobre, 1000 – 2500.

El cálculo económico propuesto se realizó para tiempo de amortización de 10 años, por lo que se decidió graficar el comportamiento del costo de la electricidad para cada variante propuesta para un tiempo de amortización que varia de 2 – 10 años de trabajo de los equipos con todos los accesorios propuestos anteriormente. Ver gráfico 2.

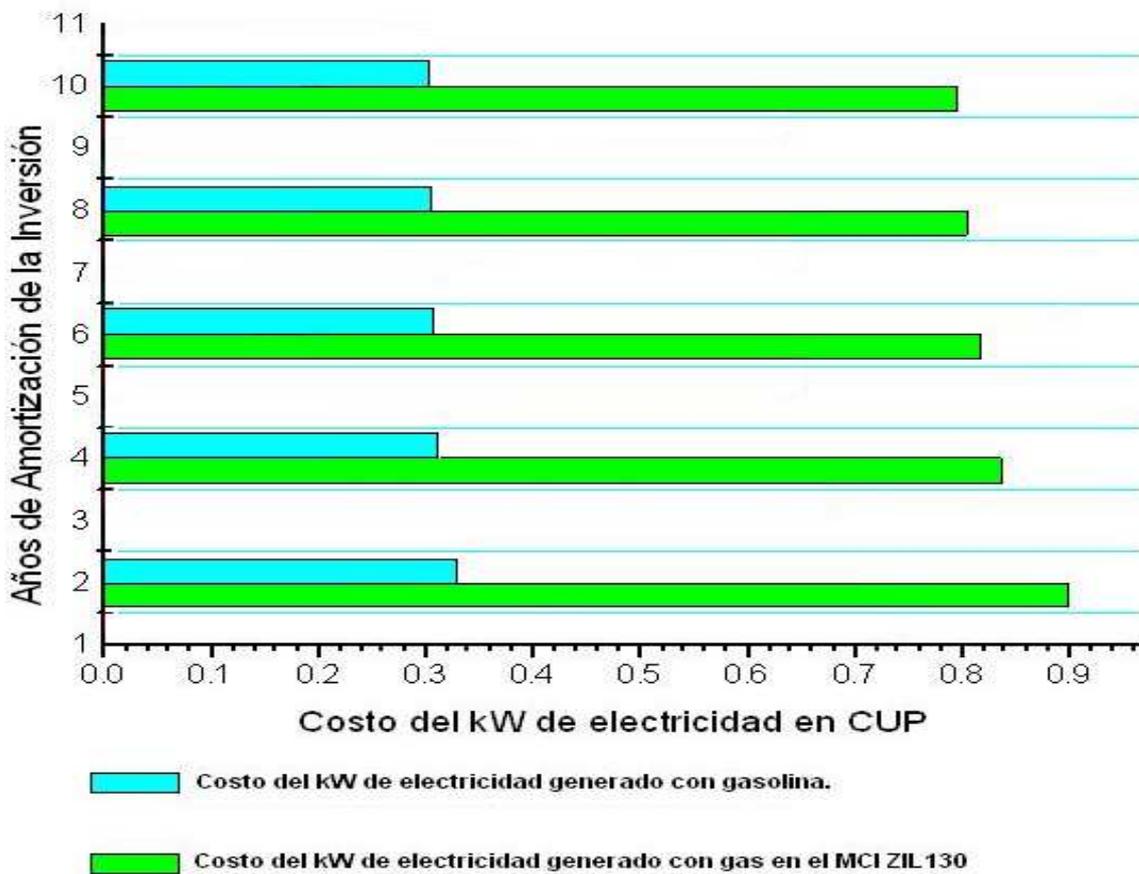


Gráfico 2. Costo del kW de corriente eléctrica en un periodo de 2 – 10 años.

CONCLUSIONES

1. Se puede transformar la energía mecánica del motor ZIL-130, trabajando con gas producto de la gasificación del marabú, en energía eléctrica, con una pérdida de potencia del 47 %, con respecto a la potencia del motor con gasolina. Esto es debido a dos causas fundamentales, una es, que por tener el gas pobre un poder calórico bajo mucho menor que el de la gasolina va a generar menor potencia mecánica en el eje, esta reducción está en el orden de 25 – 35% aproximadamente, ahora esto es si el MCI gira a las rpm nominales o sea para este caso sería de 3600 rpm, pero como para el gas pobre el MCI nunca alcanzará estas 3600 rpm (sólo hasta 2500), es por esto, que para el caso de motores de gasolina la pérdida de potencia es mayor aún porque además de la pérdida normal hay que agregarle la pérdida que se produce al disminuir las rpm del motor.
2. A pesar de que el costo de la electricidad con el motor ZIL-130 asciende a 0.794 CUP/kWh con un período de 10 años para recuperar la inversión es una solución atractiva para zonas donde no se presta este servicio, teniendo en cuenta que lo primordial es el bienestar del hombre además de ser una fuente renovable de obtención de energía.

REFERENCIAS

- [1] OPDAL., O. A. y *Production of synthetic biodiesel via Fischer – Trosch* Disponible en: [en línea] http://www.senternovem.nl/mmfiles/28277_tcm24-124223.pdf.
- [2] ALTAFINI CR, M. A. y *Chemical equilibrium model of the coal gasification process based on the minimisation of the Gibbs free energy*. Disponible en: Disponible en: <http://www.renet.at/gfx/download/biomasse/3.pdf>.
- [3] CONTI L., S. G. *Pyrolysis oils, bio-olis upgrading*. Disponible en: <http://www.ecn.nl/en/bkm/rd-programme/biofuels-and-refineryprocesses.pdf>.
- [4] TRAVIESO PEDROSO, D. *Gasificación de madera, para producir gas combustible con bajo contenido de alquitrán (<50 mg/Nm³) en un reactor concurrente modificado tipo Imbert. Santiago de Cuba 124h*. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Ministerio de Educación Superior. . 2009.
- [5] El gas de madera como combustible para motores1993. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0512s/t0512s00.htm#Contents>.
- [6] CURBELO, A. *Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en Cuba* Disponible en: [en línea] http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/T2363S/t2363s0i.htm.
- [7] COSTA, L. *Generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de biomasa forestal* Disponible en: http://www.cne.cl/seminario/pdf/costa_luis.pdf.

AUTOR

Néstor Proenza Pérez

Ingeniero Mecánico, Profesor de la Universidad de Camaguey, Cuba

e-mail: nestor.proenza@reduc.edu.cu