

MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA¹

A MODULE FOR MEASURING VARIABLES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

MÓDULO PARA A MEDIÇÃO DE VARIÁVEIS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Flavio Humberto Fernández-Morales

Doctor en Ingeniería Electrónica, Universidad de Barcelona. Especialización en Sistemas Área Administración de Sistemas Informático, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Profesor Titular, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Facultad Seccional Duitama - Colombia
flaviofm1@gmail.com

Julio Enrique Duarte

Doctor en Ciencias Físicas, Universidad de Barcelona. Magister en Física, Universidad Industrial de Santander - UIS - Colombia. Profesor Titular, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Facultad Seccional Duitama - Colombia
julioenriqued1@gmail.com

RESUMEN

Los motores de combustión interna son ampliamente utilizados como fuentes de alimentación en lugares de difícil acceso. Usualmente estos motores, de baja y media potencia, no cuentan con la instrumentación adecuada para que el usuario pueda establecer su correcto funcionamiento en variables como: temperatura, presión de aceite y velocidad de giro. En este trabajo se describe el diseño y puesta a punto de un módulo para la medición de las anteriores variables, que puede ser empleado en motores de combustión interna de funcionamiento estacionario. Se fabricó una tarjeta de adquisición de datos basada en el PIC 16F873, al cual se adaptaron los sensores de estado sólido requeridos para la medición de las variables. Este módulo permite la visualización de las variables a medir y puede ser programado para establecer rangos de operación según el motor con el que se quiera trabajar.

PALABRAS CLAVE

Motor de combustión interna, medición de temperatura, presión de aceite, velocidad de rotación, calibración.

ABSTRACT

Internal combustion engines are widely used as power supply sources in locations of difficult access. These low and mid-power engines are usually not provided with proper devices that allow users to determine the proper operation of variables such as: temperature, oil pressure, and rotation speed. This paper provides a description of the design and tune-up of a module that can be used to measure the above-mentioned variables of internal combustion engines that operate on a stationary basis. A PIC 16F873-based data acquisition card was manufactured, adapting the necessary solid state sensors for measuring the variables. The module makes it possible to visualize the variables to be measured, and it can also be programmed to set operating ranges depending on the type of motor.

KEYWORDS

Internal combustion engine, temperature measurement, oil pressure, rotation speed, calibration.

Fecha de recepción: 15 - 04 - 2013

Fecha de aceptación: 28 - 06 - 2013

RESUMO

Os motores de combustão interna são amplamente usados como fontes de alimentação em lugares de difícil acesso. Usualmente esses motores, de baixa e média potência, não contam com a instrumentação adequada para que o usuário possa estabelecer seu funcionamento correto em variáveis como: temperatura, pressão de óleo e velocidade de rotação. Nesse trabalho se descreve o projeto e desenvolvimento de um módulo para a medição das variáveis anteriores, que pode ser usado em motores de combustão interna de funcionamento estacionário. Foi fabricado um cartão de aquisição de dados baseado no PIC 16F873, ao qual se adaptaram os sensores de estado sólido necessários para a medição das variáveis. Esse módulo permite a visualização das variáveis a serem medidas e pode ser programado para estabelecer intervalos de operação segundo o motor com que se queira trabalhar.

PALAVRAS-CHAVE

Motor de combustão interna, medição de temperatura, pressão de óleo, velocidade de rotação, calibração.

Introducción

Los grupos electrógenos (GE), también llamados plantas eléctricas, son fuentes importantes de suministro de energía utilizadas como una alternativa a la red convencional de suministro de energía eléctrica. Estos grupos electrógenos emplean como fuerza motriz la energía mecánica generada por motores de combustión interna adaptados a un generador eléctrico (Vásquez *et al.*, 2011).

En algunos países los GE se han constituido como una alternativa energética importante para impulsar su desarrollo económico (De Rosas y Fernández, 2012). En Colombia también existe un gran interés en esta tecnología, ya que es una alternativa adecuada para suministrar energía eléctrica en regiones apartadas o de difícil acceso para la red convencional (Pérez *et al.*, 2012).

Igualmente existe un gran interés en optimizar el funcionamiento de los motores de combustión, con el fin de reducir su impacto medioambiental, y para ello se estudia la incorporación de combustibles alternativos como el gas producido a partir de biomasa (Bedoya *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2012).

En este tipo de estudios es muy importante disponer de la instrumentación conveniente que permita conocer el funcionamiento de los motores de combustión, de modo que se puedan identificar las estrategias de control más adecuadas para adaptar estos motores como fuentes de

energía que garanticen el correcto funcionamiento de los GE (Lapuerta *et al.*, 2006; López *et al.*, 2011; Reyes *et al.*, 2012).

Los motores de funcionamiento estacionario asociados a GE, normalmente de baja y media potencia, tienen un sin número de aplicaciones en lugares de difícil acceso y usualmente no cuentan con la instrumentación requerida para que el usuario pueda establecer su correcto funcionamiento. En algunos GE, la instrumentación asociada a los motores de combustión interna es de tipo análogo y la información se brinda a través de señales luminosas y sonoras. Estos sistemas de señalización no ofrecen un nivel de confianza adecuado y pueden requerir formación previa del usuario para su identificación y correcto manejo.

En este trabajo se describe el diseño y puesta a punto de un módulo para la medición de las siguientes variables: temperatura, presión de aceite y velocidad de giro, las cuales permiten determinar el funcionamiento normal de un motor de combustión interna.

Se fabricó una tarjeta de adquisición de datos basada en el PIC 16F873, al cual se adaptaron los sensores de estado sólido requeridos para la medición de las variables antes mencionadas. Este módulo permite la visualización de los parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna y puede ser programado para establecer rangos de operación, de acuerdo con las características del motor con el que se quiera trabajar.

El documento inicia presentando el diseño propuesto junto con la descripción de las variables que se van a

procesar. Como resultados se presentan las funciones de transferencia y las curvas de calibración correspondientes, encontrándose un bajo error relativo que indica que el módulo propuesto es apropiado.

1. Materiales y métodos

1.1. DISEÑO PROPUESTO

Las variables a monitorear en el motor de combustión interna son: la velocidad de rotación, la presión de aceite y la temperatura. Como se observa en la Figura 1, la tarjeta electrónica propuesta se basa en un microcontrolador PIC16F873 (Angulo *et al.*, 2002) encargado de procesar estas variables.

La información se presenta al usuario en una pantalla de cristal líquido (LCD). Igualmente, se tiene la opción de enviar la información a un módulo externo que puede ser un computador personal u otro dispositivo de

procesamiento de datos que opere con el protocolo I2C usado por Microchip (1999).

Para la velocidad de rotación se establece un valor máximo de 5000 RPM, puesto que este rango cubre las 1800 RPM valor típico de los motores de combustión interna utilizados en los GE. Para la temperatura del motor se fija el límite máximo de 120° C teniendo en cuenta que el valor normal de operación no debe superar los 85° C en el ducto de ventilación. En el caso de la presión de aceite, se toma un valor máximo de 100 PSI rango dentro del cual operan los motores de combustión interna. En las siguientes secciones se hace una breve descripción de las variables a medir, los sensores utilizados y su respectiva función de transferencia.

1.2. VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Los motores de combustión interna están diseñados con un límite máximo de velocidad. Los motores de funcionamiento estacionario (motor del GE) poseen un

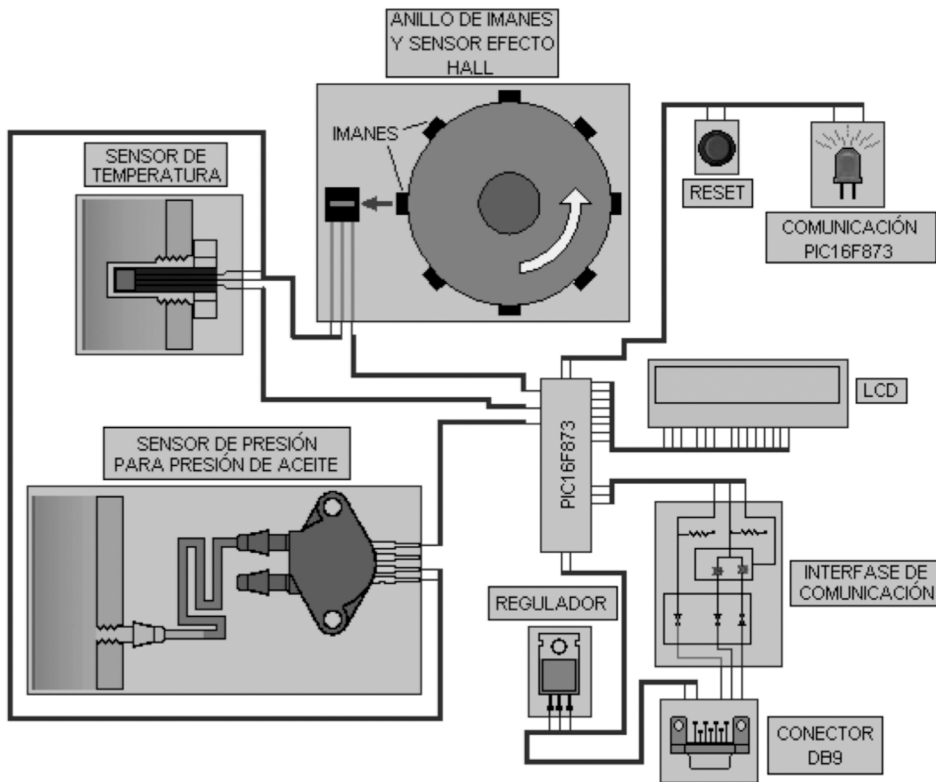


Figura 1. Esquema del módulo sensor propuesto

Fuente: La investigación

sistema mecánico para regulación de velocidad, este regulador controla el paso de ACPM en la bomba de inyección para el caso de un motor diésel, o controlan el carburador para el caso de motores que funcionan en el ciclo Otto. Por ser un sistema mecánico se puede desajustar y el motor puede presentar problemas de alta o baja velocidad.

El diseño propuesto utiliza un sensor de efecto Hall OH090U y un anillo de ocho imanes acoplados al eje del motor. Cada vez que un imán pasa frente al sensor se genera un pulso eléctrico, el cual es registrado por un contador del microcontrolador.

Teniendo en cuenta el amplio rango de velocidades del motor, es necesario establecer dos bases de tiempo para el conteo de los pulsos. Para velocidades menores a 1000 RPM se toma la velocidad cada 0.5 segundos, esto con el fin de tener rápidamente los datos de la velocidad en la operación de arranque. Para velocidades mayores a 1000 RPM se utiliza una base de tiempo de 3 segundos, la cual permite una lectura con bajo error relativo.

Las funciones de transferencia programadas en el microcontrolador se presentan en las ecuaciones 1 y 2, las cuales corresponden a las bases de tiempo de 0,5 y 3 segundos, respectivamente.

Ecuación 1

$$\omega = 15 * X$$

Ecuación 2

$$\omega = 2.5 * X$$

Donde:

ω es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto

X son los pulsos leídos en el intervalo de tiempo respectivo

1.3. PRESIÓN DE ACEITE

Los motores diésel y los motores de ciclo Otto mayores a 20 HP cuentan con una bomba de aceite encargada de succionar el aceite del cárter y hacerlo circular a través de un filtro, y una red de ductos para la lubricación interna del motor.

Es importante tener un control sobre esta presión ya que si el motor funciona con una baja presión de aceite o sin aceite, las piezas se bloquean y se producen roturas, en algunos casos la mejor solución a este problema es sustituir el motor por uno nuevo. La baja presión de aceite puede ser ocasionada por un desgaste en la bomba del aceite, por fugas que pueda tener el motor o por un descuido del operario al no suministrar el aceite en el cárter.

Esta variable se capta por medio de un sensor de presión MPX5700DP. Para su instalación, el motor debe estar en reposo; se conecta un extremo de una manguera a la entrada del sensor y el otro extremo se conecta a una salida de medida de presión; la mayoría de motores cuentan con esta toma en la salida de la bomba de aceite; se debe asegurar que la manguera contenga únicamente aire en su interior ya que la membrana del sensor no puede entrar en contacto con el aceite; la idea es que cuando el motor esté en funcionamiento el aceite comprima este aire hacia el sensor encargado de entregar una señal de tensión DC en su salida, proporcional a la presión del aire comprimido en la manguera. Esta señal se conecta al conversor Analógico/Digital del PIC16F873 para su procesamiento.

La función de transferencia para la presión de aceite, que se programa en el microcontrolador, viene dada por el fabricante del sensor y se expresa en la ecuación 3.

Ecuación 3

$$P = 2.545 * V_{AN} - 4.51$$

Donde:

P es la presión del aceite del motor e igual a la presión del aire comprimido en la manguera.

V_{AN} Es la tensión en el conversor Análogo/Digital e igual a la tensión en la salida del sensor.

1.4. TEMPERATURA DEL MOTOR

Todos los motores de combustión tienen un límite de temperatura para su operación normal, de sobrepasar este nivel se tienen problemas de lubricación por disminuir la viscosidad del aceite, también se pueden

tener problemas de deformación de algunas piezas. Entre las causas que generan una elevada temperatura en un motor de combustión interna refrigerado por agua se tienen: obstrucción de los orificios de circulación de aire en el radiador, falla en la bomba del agua, ruptura de la correa del ventilador del radiador, fugas de agua en el radiador, entre otras.

Esta variable se capta por medio de un sensor LM35. La toma de temperatura se puede realizar en varias partes del motor y dependiendo del lugar donde se tome se tendrá un valor diferente de temperatura para el nivel de recalentamiento. Para el caso del sistema propuesto, la temperatura se debe tomar en los ductos para la refrigeración, donde la temperatura no debe superar los 85° C en el funcionamiento normal del motor.

El sensor LM35 entrega una señal de tensión DC en su salida, proporcional a la temperatura medida, esta tensión se amplifica al doble para ser conectada al conversor Análogo/Digital del PIC16F873 para su procesamiento.

La función de transferencia con la que se programa el microcontrolador viene dada por la ecuación 4, la cual se origina al tener en cuenta el factor de amplificación en la adaptación de la señal y la función de transferencia del sensor.

Ecuación 4

$$T = 50 * V_{AN}$$

Donde:

T es la presión del aceite del motor e igual a la presión del aire comprimido en la manguera

V_{AN} Es la tensión en el conversor Análogo/Digital

2. Resultados y discusión

2.1. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Para poner a punto la medición de la velocidad de rotación se utilizó un taladro de árbol que cuenta con un mecanismo para tener velocidades entre 150 y 4200

RPM. En el mandril se instaló el anillo de los ocho imanes y el sensor de efecto hall lo más cercano a los imanes. El módulo se programó con las ecuaciones 1 y 2.

En la Figura 2 se presenta la lectura del módulo y del tacómetro, en RPM, para la base de tiempo de 0,5 s.

Estas medidas se patronaron con un tacómetro, mostrando un error relativo máximo de 3.2%. Este error se debe a que para cada 1/8 de vuelta se detecta un pulso y con la base de tiempo de 0,5 segundos se genera un cambio en la lectura del módulo equivalente a 15 RPM. Para disminuir este error se puede aumentar el tiempo de lectura de pulsos o aumentar el número de pulsos (número de imanes) por revolución, por criterio de diseño se optó por mantener el número de imanes, ya que con más imanes el diámetro del anillo tiene que ser mayor y, dependiendo de la máquina, no podría instalarse por el volumen que ocupa.

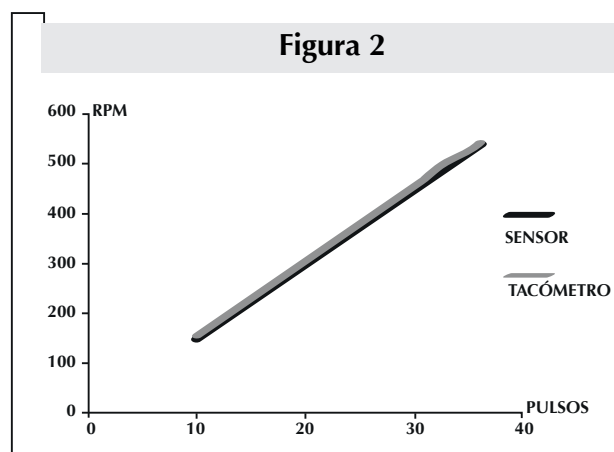


Figura 2. Velocidad de rotación contra número de pulsos, para la base de tiempo de 0,5 s. Fuente: La investigación

En la Figura 3 se presenta la lectura del módulo, en RPM, contra el número de pulsos para la base de tiempo de 3s. Para este rango de medida el error relativo máximo fue de 0.17 %. (Ver Figura 3).

La reducción del error con respecto al rango de bajas velocidades se debe a que se amplía la ventana de observación, lo cual permite detectar un mayor número de pulsos y mejoran la precisión del sistema.

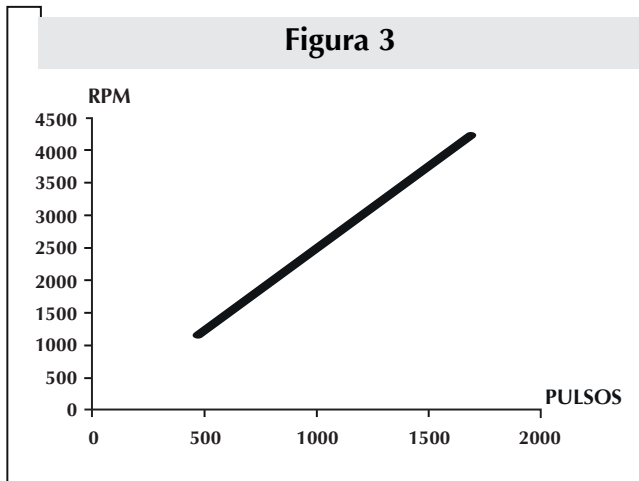


Figura 3. Velocidad de rotación contra número de pulsos, para la base de tiempo de 3 s. Fuente: La investigación

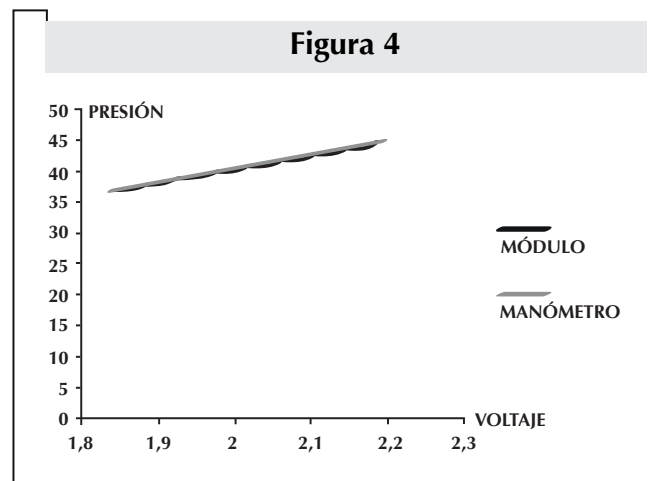


Figura 4. Variación de presión del módulo y del manómetro contra voltaje en el conversor Fuente: La investigación

2.2. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE ACEITE

Para la prueba de monitoreo de presión de aceite se utilizó un manómetro con escala de 5 a 100 PSI y un motor de 24 HP diésel que cuenta con la salida para la toma de medida de presión. Las lecturas del manómetro se comparan con las medidas de presión de aceite del módulo, previamente programado con la función de transferencia para esta variable (ecuación 3). En el proceso de prueba se acopla una te en la salida de medida de presión de aceite, una derivación de la te se conecta al manómetro y la otra al módulo. Se enciende el motor y controlando la velocidad de rotación se obtienen varias lecturas. Para el motor entre el mínimo y el máximo de velocidad de rotación posible, 822 y 1918 RPM, se obtuvo una variación de presión entre 37 y 45 PSI, respectivamente. De acuerdo con las características de otros motores se pueden obtener diferentes lecturas, que por lo general no superan las 90 PSI.

En la Figura 4 se muestra la variación de presión del módulo y del manómetro contra el voltaje en el conversor, en la cual el error relativo máximo fue de 1,3% para las condiciones de medida. (Ver Figura 4).

2.3 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

En la prueba de monitoreo de la temperatura se utilizó un termómetro con escala de 0 a 100° C. Las lecturas

del termómetro se comparan con las medidas de temperatura del módulo, previamente programado con la función de transferencia dada por la ecuación 4. En el proceso de prueba se transfiere calor a un recipiente con agua donde se encuentran sumergidos el bulbo del termómetro y el sensor encapsulado, se tomaron lecturas entre 13 y 90° C.

En la Figura 5 se observa la variación de la de la temperatura para el termómetro y el módulo, en la cual se obtuvo un error relativo máximo de 2,3%.

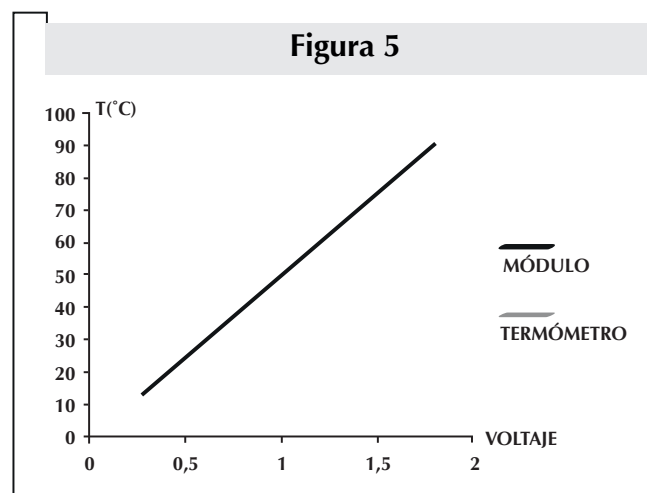


Figura 5. Variación de temperatura del módulo y del termómetro contra voltaje en el conversor Fuente: La investigación

3. Conclusiones

Se diseñó y se puso a punto un módulo para la medición de velocidad de rotación, presión de aceite y temperatura, que puede ser empleado en motores de combustión interna de funcionamiento estacionario como los utilizados en los grupos electrógenos. Se fabricó una tarjeta de adquisición de datos basada en el PIC 16F873, al cual se adaptaron los sensores de estado sólido requeridos para la medición de las variables. Este módulo permite la visualización de las variables a medir en una pantalla de cristal líquido y puede ser programado para establecer rangos de operación según el motor con el que se quiera trabajar.

En el proceso de puesta a punto se verificó el correcto funcionamiento del módulo para una velocidad de giro entre 150 y 4200 RPM, una presión de aceite entre 37 y 45 PSI y una temperatura de 10 a 90° C. Las gráficas obtenidas para cada una de las variables corresponden con las funciones de transferencia establecidas.

Con el diseño de este sistema se superan las limitaciones de algunos controles para motores de combustión interna asociados a grupos electrógenos, ya que se permite la captura y visualización digital de la información del estado de las variables más representativas. Una opción interesante es que la información se puede enviar a un dispositivo externo que puede ser un computador personal u otro equipo procesador de datos que opere con el protocolo I2C. Lo anterior permite que el módulo pueda ser utilizado en la automatización de otros procesos. ☰

NOTAS

1. El presente artículo es resultado del proyecto de investigación titulado: Desarrollo de un Sistema Automático para la medición de los Parámetros de Operación en un motor diésel Asociado a un Grupo Eléctrico, código SGL-1104, financiado por la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANGULO USATEGUI, José M. y ROMERO YESA, Susana, Microcontroladores PIC, Diseño Práctico de Aplicaciones, Segunda Parte: PIC 16F87X.
2. BEDOYA CARO, Iván D.; ARRIETA, Andrés A.; CADAVID, Francisco J. y PAREJA, Jhon A. Efecto del grado de carga y la cantidad del combustible piloto en el comportamiento mecánico ambiental de un motor dual diesel-biogás para generación de electricidad. *Rev. fac.ing.univ. Antioquia* [online]. No. 42 (2007) [citado 2013-03-19]; p. 79-93. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012062302007000400006&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0120-6230.
3. DALES, Davis N. y THIESSEN, Frank J, Manual de Electrónica Automotriz y Rendimiento del motor. Segunda Edición. PRENTICE HALL S.A., 2002.
4. DE ROZAS, Miriam L. Filgueiras Sainz; FERNÁNDEZ, Miguel Castro. La capacidad de absorción para la innovación: estudio de caso en la Generación Distribuida Cubana; The absorptive capacity for innovation: study case on Cuban's distributed generation system. *En: Ingeniería Energética*. Vol. 33, No. 3(2012); p. 217-228.
5. LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio; AGUDELO, John R y AGUDELO, Andrés F. Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 2: Motores Diesel. *Inf. tecnol.* [online]. Vol.17, No.5 2006, [citado 2013-03-20]; p. 31-41. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071807642006000500006&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-0764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000500006>.
6. LÓPEZ, José D., ESPINOSA, Jairo J., AGUDELO, John. Decoupled control for internal combustion engines research test beds. *En: Rev.fac.Ing.Univ. Antioquia* n.59 (jun. 2011);p. 23-31.
7. MICROCHIP TECHNOLOGY. MPASM USER'S GUIDE with MPLINK and MPLIB. 1999.
8. PÉREZ, Juan F., LENIS, Yuhan, ROJAS, Sandra, LEON, Carlos. Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: un análisis técnico - económico e implicaciones por reducción de emisiones de CO₂. *En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* N.º 62 (mar. 2012); p. 157-169.
9. REYES, Javier; VELLASCO, Marley and TANSCHKEIT, Ricardo. Monitoramento e diagnóstico de múltiplos sensores por redes neurais auto-associativas. *Sba Controle & Automação* [online]. 2012, vol.23, n.2 [cited 2013-03-20]; p. 121-137. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010317592012000200001&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0103-1759. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-17592012000200001>.
10. VÁSQUEZ, Carmen *et al.* 2do taller Eficiencia Energética para la Seguridad y la Sostenibilidad de Iberoamérica (EFESOS). *uct* [online]. Vol.15, n.58 (2011) [citado 2013-03-19]; p. 11-18. Disponible en:<http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131648212011000100003&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1316-4821