

Banco de Pruebas Automatizado para Uso en Modelación y Control de un Motor de Combustión Interna

Adalberto Gabriel Díaz Torres

Universidad Eafit, Medellín, Antioquia, Colombia, gdiaz@eafit.edu.co

Mónica Patricia Hernández Lordui

Universidad Eafit, Medellín, Antioquia, Colombia, mherna23@eafit.edu.co

RESUMEN

Se describe la implementación de un banco de pruebas de un motor de combustión interna de inyección, el cual ha requerido el montaje y la caracterización de los sensores del motor, el acondicionamiento de señales y una aplicación de software encargada de la excitación controlada del sistema y procesamiento de los datos de respuesta del motor. Se ha utilizado la plataforma de LabView para el sistema de adquisición de datos (Versión 2009 y la tarjeta NI USB 6212 de la National Instrument). El sistema desarrollado es una herramienta necesaria para la construcción del modelo matemático del motor de combustión interna. Para la construcción de este modelo se parte de ecuaciones algebraicas y diferenciales que rigen el fenómeno físico del proceso de combustión. Para algunos cálculos en la obtención del modelo, se requiere la estimación de parámetros en forma experimental, de ahí la necesidad de registrar el comportamiento en estado estable del sistema a partir de excitaciones de aceleración controlada y perturbaciones de carga para el motor. Adicionalmente, la planta desarrollada servirá como plataforma de pruebas para el desarrollo y evaluación de algoritmos de control de dosado de la mezcla aire/combustible y velocidad.

Palabras claves: motor de combustión interna, sistema de adquisición, Labview, instrumentación.

ABSTRACT

This paper describes the implementation of a test bank for an injection internal combustion engine, which required the assembly and characterization of the sensors of engine, signal conditioning and a software application dedicated to the controlled excitation of the system and the data processing of motor response. It is used the LabView platform for the data acquisition system (Version 2009 and NI USB 6212 card from National Instrument). The developed system is a necessary tool for the construction of mathematical model of the internal combustion engine. The construction of this model parts from a set of algebraic and differential equations governing the physicochemical phenomenon of combustion process. Some model calculations it requires the estimation of parameters experimentally, for this reason there is the need to record steady-state behavior of the system after it was excited by controlled acceleration and load disturbances. Additionally, the implemented system will serve as a test platform for the development and evaluation of speed and mixing air/fuel algorithms control

Keywords: internal combustion engine, acquisition system, Labview, instrumentation.

1. INTRODUCCIÓN

El cómo mejorar el rendimiento de motores de combustión interna a partir de estrategias óptimas de control de dosado (relación aire – combustible) es un problema de continuo interés, en el que se busca ajustar las variables más importantes en el proceso de optimización de la combustión EEE, en el campo Energético, Económico y

Ecológico. Los motores de combustión tienen desempeño en automoción, aeronáutica y en la industria, por tanto, es conveniente aumentar su eficiencia para disminuir el impacto negativo de su uso. Una manera de establecer y caracterizar el buen estado de la máquina o sus condiciones de trabajo es mediante un banco de ensayos que pueda monitorear, almacenar y registrar la información de los sensores y la actividad de los actuadores, de tal manera que se pueda determinar: niveles de eficiencia y rendimientos, potencia disipada, par mecánico, monóxidos de carbono e hidrocarburos generados, etc. Los bancos de pruebas comerciales se limitan a dar un diagnóstico en este sentido. Un gran número de ellos se construye para motores pequeños que están entre 2.2 kW y 650 kW y unos pocos se construyen para caracterizar motores de vehículos con potencias superiores a los 1800 Hp, estos presentan un sistema de frenado (dinamómetros) de alto costo. El grupo de investigación IEXS(Ingeniería, Energía, Exergía y Sostenibilidad), con la línea en control de motores de combustión de la universidad Eafit ha construido un banco de pruebas para un motor de combustión interna con la finalidad de modelarlo y posteriormente desarrollar los controles de los actuadores de regulación del desempeño del motor.

Para obtener el modelo matemático del motor de combustión se parte identificando los parámetros experimentales de las ecuaciones de los principios físicos. Para ello se requiere registrar el comportamiento dinámico del motor en un banco de pruebas, ante escalones de aceleración controlada y perturbaciones externas generadas por un sistema de frenado controlado (carga) con un sistema instrumentado de sensores mediante un sistema de adquisición y procesamiento de datos, que proporcionan la información del comportamiento del motor y las acciones de control sobre los actuadores de regulación del motor, obteniendo la respuesta dinámica de la máquina en tiempo continuo.

Este sistema se integra a una plataforma física conformada por el motor y un freno de discos ambos simentados en una estructura mecánica como se observa en la Fig.1.



Figura 1.: Banco de pruebas.

Desde el punto de vista de la medición, la adquisición y el procesamiento de las señales un banco de pruebas permite: conocer y analizar el comportamiento y su eficiencia del proceso de combustión, la dinámica del flujo del aire, la presión en la cámara de admisión, entre otros; de tal suerte que es posible determinar mediante el

análisis de datos la dependencia de algunas variables que intervienen en el proceso de la combustión, si este se estudia como un sistema abierto (Romero & Quintero, 2001; Gengel & Boles, 2008).

Construir un modelo matemático de simulación que emule la dinámica del motor como un sistema abierto, utiliza las ventajas de un banco de ensayos con el cual se pueda validar el modelo obtenido. Por otro lado, algunos parámetros en el modelo son de naturaleza experimental debido a que representan características estocásticas específicas de cada motor, como por ejemplo: la geometría de la mariposa, que afecta la función de área de paso del flujo de aire, la eficiencia volumétrica, que es afectada entre otras por el flujo de aire, igualmente otros efectos inherentes al desgaste repercuten en la obtención de un modelo mucho más realista, tales como: desgaste de piezas mecánicas, descalibración natural de los sensores, cilindrada, entre otros.

El objetivo de este artículo es divulgar la implementación de un banco de pruebas que sirve para la caracterización y modelación de un motor de combustión interna. Dicho sistema se encuentra intencionadamente implementado para la evaluación y desarrollo de sistemas de control de la máquina.

2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

2.1. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

El objeto de estudio en el banco de pruebas es un motor de encendido por chispa o de gasolina, de cuatro tiempos C3G (Twingo Renault) que. Presenta una cilindrada de 1.1 cm³., potencia máxima de 58 hp, par máximo de 93 N-m a 2500 rpm y un sistema de inyección multipunto. El motor esta soportado en una estructura metálica modelada en Solid Work®, con un diseño funcional. La estructura fue analizada mediante elementos finitos para la evaluación de esfuerzos y deformaciones debidas a las cargas estáticas y dinámicas del motor, adicionalmente presenta un sistema de anclaje para absorber vibraciones de tipo mecánico. La estructura presenta un panel de indicadores para observar el funcionamiento de algunas variables y un depósito de reserva de combustible. (Mejía & Garcia, 2008)

De manera sistémica, el motor consta de un sistema de suministro de combustible por inyección, un sistema de suministro de aire por admisión debido a presión atmosférica, un recinto donde se realiza la mezcla aire/gasolina y válvula de admisión, cámaras de combustión por encendido con bujía y un sistema mecánico pistón-bielacigüeñal que transforma la energía mecánica de movimiento alternativo en un movimiento de rotación. Adicionalmente, tiene un sistema de control electrónico (ECU: lectronic control united) encargado del manejo de los actuadores de dosificación de combustible aire y el control de encendido de la mezcla de combustible utilizando la información que entregan los sensores instalados para definir este comportamiento

Los subsistemas del motor que se instrumentan con sensores y de los cuales se procesa información son aquellos que interesan en la obtención de su modelo matemático, ver Fig. 2. El modelo que se busca implementar se conoce en la literatura como "Mean Value Engine Models" y fue desarrollado para aplicaciones de control en lazo abierto y de lazo cerrado (Hendricks & Sorenson, 1990; Hendricks, Rajamani, 2006). Las señales de interés al levantamiento del modelo, también lo son para la ECU y son intervenidas mediante una conexión "T" para ser llevadas al equipo host, utilizando cables con apantallamiento y un conector DB 25, el se conecta a una tarjeta que funciona para acondicionar y aislar la señal de los sensores que luego ingresan a la tarjeta del sistema de adquisición de datos (DAQ).

2.2. MÚLTIPLE DE ADMISIÓN

Es la parte del motor que conforma el sistema de admisión de aire, visto como un sistema de llenado-vaciado por diferencia de presiones (atmosférica y de los cilindros) en el múltiple de admisión como un depósito reservorio de volumen finito en el cual entra aire por la válvula de mariposa y sale a través de la válvula de admisión de cada uno de los cilindros. Las entradas y salidas de este sistema son los flujos máscicos del aire que generan un cambio en la presión del reservorio, la válvula actúa como pérdida de carga variable en el fluido de trabajo. Los sensores

que registran la variación de la presión y el flujo de aire son: el MAP (Presión Absolute Manifold) y el MAF (Flow air Manifold), respectivamente.

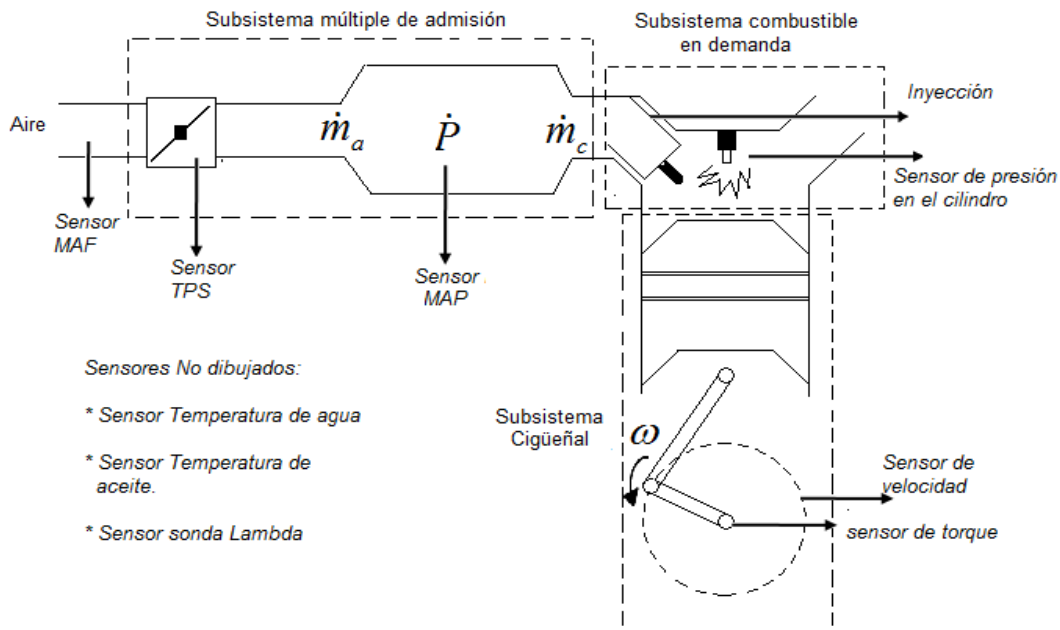


Figura 2: El motor de combustión fraccionado en los subsistemas que se instrumentan.

El rango de presiones para el MAP se ha normalizado en escala absoluta, caracterizando así: 0.372 bares de presión de vacío para un voltaje de 1.2 V en el estado de ralentí o marcha mínima y 0 bares para 3.93 V, el cual resulta cuando la válvula de mariposa se encuentra completamente abierta (se iguala la presión en el reservorio con la atmosférica). El MAF no es lineal, maneja una medida mínima de 15 kg/h para un voltaje de 1.2315V y máxima de 1000 Kg/h para un voltaje de 4.3312V. La señal real se obtiene a partir de la curva de interpolación que da el fabricante. La dinámica del motor, por su actividad continua de bombear aire desde el múltiple hasta los cilindros, se aproxima como una bomba volumétrica (Guzzella & Onder, 2004), de tal manera que hay un flujo volumétrico proporcional al régimen de velocidad. Por esta razón, Las señales de MAP y MAF son un indicativo de las demandas de carga requeridas y son necesarias para validar el submodelo matemático encargado de representar la dinámica del aire.

La válvula mariposa es un elemento de acción manual (set point) para dosificar el flujo de la entrega directa de aire e indirecta de combustible. La apertura de esta válvula se mide mediante el TPS (Throttle Position Sensor), que es un sensor de tipo potenciómetro, para el cual una variación angular del plato de la mariposa modifica linealmente el valor de una resistencia y por consiguiente el voltaje de salida del circuito. El voltaje que entrega realmente el TPS es de 0-4.4 V para una apertura de la válvula de 0°-90°, respectivamente.

La acción de la válvula de mariposa regula por estrangulamiento el flujo de aire produciendo acelera el motor y por consiguiente el aumento de potencia, permitiendo aplicar diferentes niveles del estímulo de paso de aire controlado (acelerador), necesarios para la identificación parámetros experimentales del modelo matemático, con un comportamiento dinámico de las variables en función del ángulo de mariposa. En un vehículo el accionamiento de la válvula se hace normalmente con el pedal de aceleración, en el banco motor se automatizó el accionar con un servomotor de torque suficiente para vencer las constantes de resortes que cierran la válvula, controlado desde el programa principal parametrizado mientras se desarrolla la adquisición de los datos en el host. El servomotor utiliza una alimentación de 6 V para generar el torque máximo de 15 kg-cm a una velocidad de 0.13seg /60 grados.

2.3. COMBUSTIBLE EN DEMANDA

El combustible en demanda es un proceso que se modela a partir de la demanda y evolución del combustible en el colector y del modelo del actuador. Existen modelos teóricos para representar matemáticamente la dinámica del combustible en los cilindros (Aquino, 1981), el flujo de combustible está modelado por los tiempos de apertura de los inyectores (electroválvulas todo-nada), suministrando en el momento justo la cantidad de combustible necesaria según las condiciones de regulación y de funcionamiento del motor. La demanda es medida por la depresión que se presenta el sistema de aire cuando se abren las válvulas de admisión, o también por la demanda de flujo de aire o también por la posición del sensor TPS. El sistema de inyectores consta básicamente de un riel donde se conectan todos los inyectores y están controlados por una señal de inyección pulsatoria.

2.4. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Aquí se desarrolla la transformación y generación de energía durante el proceso de combustión, el cual se inicia cuando las porciones de aire combustible presentes en la cámara se encienden por una chispa en la bujía del cilindro. Este proceso genera presión sobre el pistón y calor. La construcción de este modelo esta ajustado a variables externas aleatorias que dependen de la pureza o impurezas de la porción de aire, o la calidad del combustible. Dada esta aleatoriedad de la mezcla aire-combustible, el modelo de combustión se elabora a partir de datos experimentales, el cual requiere la toma de datos en el proceso de combustión tanto de presión y temperatura y finalmente el nivel de quema de estos combustibles (análisis de gases).

Se construye un dispositivo que registre datos de presión y temperatura durante la combustión, con un sensor de presión Tiene un rango de 0-3000 psi para una salida de voltaje de 0.5-5 V. y una termocupla tipo K. Un *Sensor EGO (Exhaust Gas Oxigen) o sonda lambda*, mide el porcentaje de oxígeno presente en los gases de escape es un indicativo de la eficiencia de la combustión, su rango de salida es de 100 mV a 900 mV. Valores mayores a 600 mV denotan una mezcla rica y por debajo de 400mv indican una mezcla pobre o una combustión deficiente.

2.5. MODELO DE POTENCIA

Considerando que el objetivo primario de un motor es producir una potencia mecánica en su eje de salida; en el cigüeñal se modela la dinámica rotacional del motor que corresponde a los procesos de torque generado y velocidad. En un vehículo real, la potencia mecánica generada se utiliza para vencer las resistencias pasivas del motor y del vehículo. Como el motor se encuentra montado sobre un sistema de rodillos la potencia puede ser compensado a voluntad por el freno de discos diseñado. El torque está siendo medido entre el eje de salida del motor y el eje de transmisión de los discos. Se utiliza un torquímetro de medición de par dinámico. La velocidad de giro se mide con un sensor de reluctancia variable ubicado en la volante del motor, el cual entrega una señal en frecuencia según la velocidad de giro del cigüeñal. Esta señal se traduce mediante un convertidor de frecuencia a voltaje. Los rangos de operación son: 1 V para 1000 rpm (velocidad ralentí) y 5V para un máximo de 5000 rpm.

2.6. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y SISTEMA DE LUBRICACIÓN

El sistema de refrigeración y lubricación del motor de combustión interna está diseñado para mantener la temperatura del motor en el rango necesario para aprovechar su máxima vida útil. En condiciones normales el motor opera eficientemente mientras se mantenga la temperatura interna entre 82°-100° C, en realidad cada marca maneja un punto óptimo pero todas están dentro de este rango. Esta variable no interviene en el modelo matemático, se monitorea y registra por razones de seguridad en las pruebas en las que puede haber calentamiento y, adicionalmente para preservar la vida del motor. Un calentamiento excesivo puede entre otros aspectos: corromper las propiedades del lubricante ocasionando aumento en la fricción de piezas móviles y por tanto su deterioro. Adicionalmente, operar el motor por debajo de la temperatura indicada aumenta el consumo de combustible.

La temperatura del sistema de refrigeración se mide con una termocupla tipo K que suministra un valor en milivoltios proporcional al cambio en la temperatura, esta señal se hace pasar por el amplificador de

instrumentación AD620AN que normaliza la salida de 0 a 5 V para un rango de temperatura entre 0°-200°. Este valor se adoptó como el máximo permitido por razones de seguridad.

2.7. INTERFAZ GRÁFICA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de los datos del motor se realiza con una aplicación en Labview® 2009. Se utiliza una tarjeta de adquisición NI USB 6212. La interfaz gráfica permite aplicar estímulos (valores de set-point) al sistema en cualquier momento de la captura de datos. Para ello, se envía desde el host una señal digital de ancho modulado para el servomotor, este ancho se fija de acuerdo a la apertura deseada para la válvula mariposa; el programa registra y grafica la actividad de los sensores y se guardan. El programa permite modificar el período de muestreo, de acuerdo a las limitaciones de la tarjeta de adquisición. En la Fig. 3 se muestra el aspecto de la interfaz gráfica.

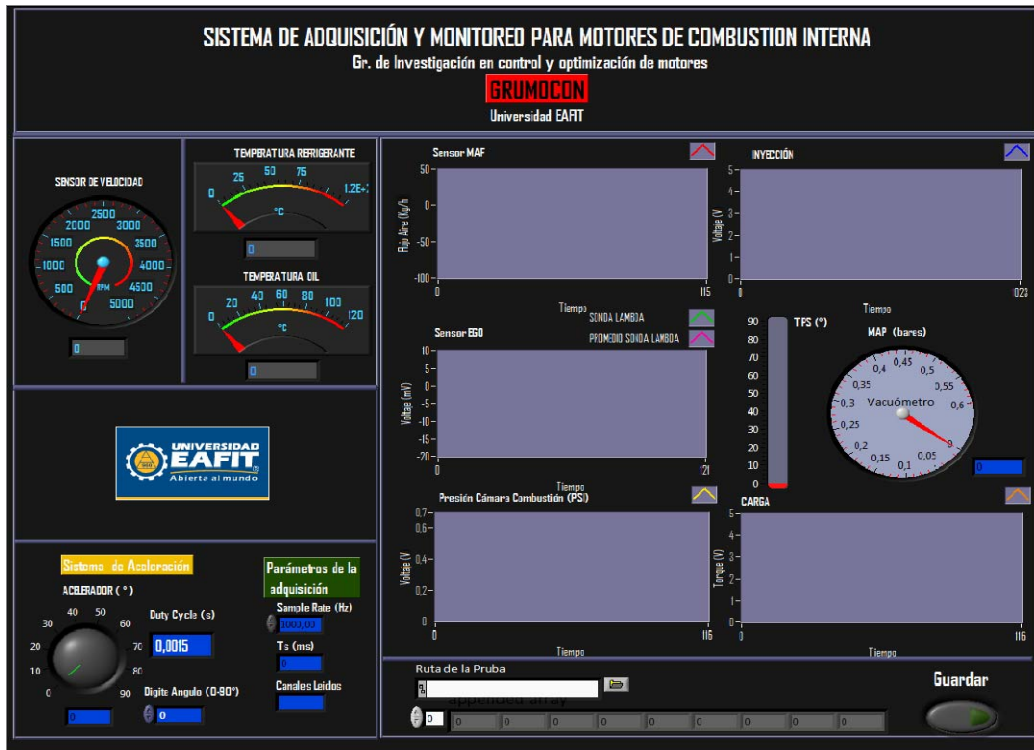


Figura 3: Interfaz Gráfica para Monitoreo y Control del Servomotor.

2.8. GRÁFICOS ADQUIRIDOS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En la Fig. 4 se observa las variables de los sensores MAF, torquímetro y TPS, que miden el flujo másico (Kg/h), la carga generada al motor (V) y la aceleración (grados). Se puede observar que a medida que se abre la válvula de mariposa o se acelera el motor, aumenta el flujo de aire. Esta es una prueba simple para mostrar las prestaciones del sistema.

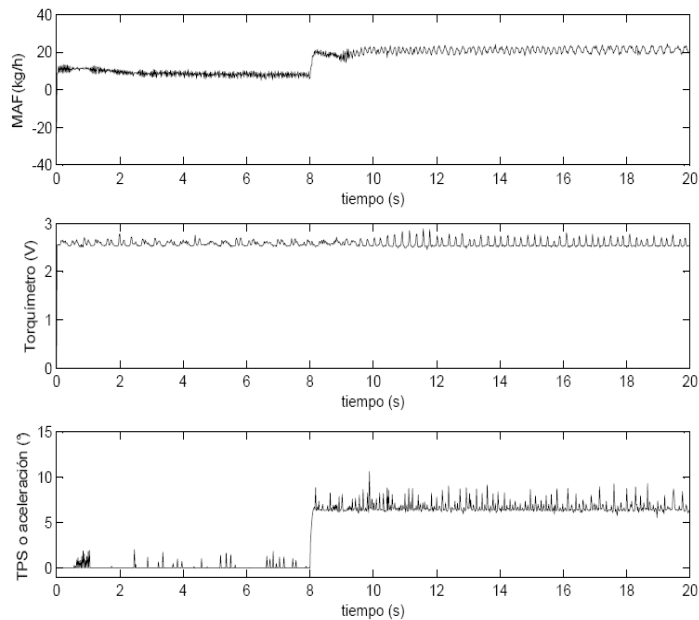


Figura 4: Variables Flujo Másico del Aire, Torque y Aceleración (TPS) Tomadas Contra el Tiempo en una Prueba.

3. CONCLUSIÓN

La implementación de un banco de pruebas del motor de combustión interna a gasolina ha permitido avanzar hacia la obtención del modelo matemático de la máquina, porque se cuenta con una plataforma donde se pueden simular condiciones de operación que incluyen aceleración y perturbaciones de carga controlada; adicionalmente estas acciones producen una respuesta dinámica en el motor, la cual puede ser registrada y almacenada para posteriormente usarse en el cálculo de parámetros experimentales, diagnóstico, entre otros. El trabajo futuro consistirá en el análisis de esta información

REFERENCIAS

- Aquino, C.F. (1981). Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine, SAE Technical Paper No 810494.
- Gengel, Y. & Boles, M. (2008) Termodinámica. Mc Graw Hill,. ISBN 978-970-10-7286-8
- Guzzella, L. & Onder C.H. (2004). Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Germany: Springer, ISBN 3-540-22274-x.
- Hendricks, E. (1997). Engine Modelling for Control Applications: A Critical Survey. In: *Kluwer Academic Publisher*, Meccanica 32, pp 387-396.
- Hendricks, E. & Sorenson, S. (1990). Mean Value Modelling of Spark Ignition Engines. SAE Technical Paper No.900616.
- Mejía, N. & Garcia, S. (2008). Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para un Motor de Combustión Interna de Renault Twingo. Tesis de pregrado. Universidad Eafit.
- National Semiconductor, www.national.com
- Rajamani, R. Vehicle Dynamics and control. USA:Springer, 2006. ISBN 0-387-26396-9.

Romero, C. & Quintero, H. (2001). Modelado de los Motores de Combustion Interna. In: *Scientia et Technica*, Vol 07 N° 15, pp 67-74.

Sensor de torque, www.ncte.de/PDF/Design&Dimension_eng-V7.pdf, febrero 2005.

Sensor de Presión en la camara de combustión, www.optrand.com. Optrand Inc, 2009.

Sensor MAF (part number:PBT-GF30), www.4starelectronics.com/part_detail/PBTGF30K

Using LabView Version 2009, National Instrument Inc, 2010

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.