



Ensamble e instrumentación de un banco didáctico para pruebas de arranque en motores de combustión interna

Assembly and instrumentation of a didactic bench for testing of starters of internal combustion engines

Carlos Romero-Piedrahita ¹, Andrés Rodríguez-Valencia ², Mauricio Monroy-Jaramillo ³

¹Grupo de Investigación en Tecnología Mecánica, Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Orcid: 0000-0001-5647-1918. Correo electrónico: cromero@utp.edu.co

²Grupo de Investigación, Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. Orcid: 0000-0002-0540-8019. Correo electrónico: afrodriguezv@uao.edu.co

³Grupo de Investigación Procesos de Manufactura y Diseño de Máquinas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correo electrónico: mauriciomonroy@utp.edu.co

Recibido: 30 diciembre, 2019. Aceptado: 20 marzo, 2020. Versión final: 29 abril, 2020.

Resumen

La medición instantánea de velocidad angular en volantes de inercia se ha usado, entre otras aplicaciones, en pruebas experimentales de motores de combustión interna para diagnosticar fallas, particularmente se ha implementado para evaluar las curvas de desempeño de motores de arranque y el estado inicial de las baterías. El presente artículo se enfoca en el desarrollo de un banco de pruebas didáctico basado en volante para realizar el diagnóstico de desempeño de motores de arranque hasta de 3 kW, arrancadores eléctricos de motores de combustión interna de hasta 3 litros de cilindrada, propios de automóviles comerciales. Se describen las características principales del banco diseñado: elementos mecánicos, estructurales y accesorios; captadores de desplazamiento angular, corriente y voltaje de arranque, sistemas de lectura, tratamiento y presentación de información. Se emplea un sensor inductivo para la detección de la posición angular de un volante de inercia dotado de corona dentada; la señal análoga es convertida a digital y procesada digitalmente en un código escrito en Matlab®. Durante el ensayo del motor de arranque de prueba, se determina la variación de la potencia eléctrica entregada por éste y la variación de la velocidad angular del sistema de carga (volante) desde su inicio hasta la estabilización. La información experimental adquirida permite construir y analizar los perfiles de comportamiento de velocidad angular, intensidad de corriente, tensión y potencia eléctrica instantáneas. La contrastación, frente a las formas de características de los motores de arranque comerciales, del comportamiento de las señales de voltaje, corriente y potencia consumida del motor de arranque probado en el banco construido, permiten concluir sobre la idoneidad del banco y de la metodología concebida para realizar pruebas didácticas de caracterización y diagnóstico de motores de arranque en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Palabras clave: motor de arranque; banco de pruebas; características de desempeño; volante de inercia; velocidad; voltaje; corriente; potencias instantáneas.



Abstract

The instantaneous measurement of angular speed in flywheels has been used, among other applications, in experimental tests of internal combustion engines to diagnose their working conditions; particularly it has been implemented to evaluate the performance curves of starter motors and the battery conditions. This article focuses on the development of a flywheel-based didactic test bench to diagnose performance of starters of up to 3 kW power, installed in internal combustion engines of up to 3 liters of displacement, typical of commercial cars. The main features of the designed bench are described: mechanical elements, structural elements and accessories; angular displacement, current and starting voltage sensors and systems for reading, processing and presentation of information. An inductive sensor is used for the detection of the angular position of a flywheel equipped with a toothed crown; the analog signal is converted to digital and digitally processed in a code written in Matlab®. During the test of the testing starter motor, the variation of the electric power delivered by it and the variation of the angular speed of the charging system (flywheel) from its initial state to stabilization are determined. The acquired experimental information is used to construct and analyze the behavior profiles of instantaneous angular speed, current intensity, voltage and electrical power. Confronting the forms of characteristics of commercial starters provided by the starter manufacturers, with those of the voltage, current and consumed power signals of the starter tested in the built bench, allows us to conclude on the suitability of the designed test bench and the conceived methodology to carry out didactic characterization and diagnosis tests of starter motors in the Laboratory of Internal Combustion Engines of the Technological University of Pereira.

Keywords: engine starter; test bench; starter performance characteristics; flywheel; instantaneous speed; voltage; current.

1. Introducción

Un motor de arranque es un motor eléctrico de corriente continua que comúnmente empleado para la puesta en marcha de motores de combustión interna. El motor de arranque actúa como elemento receptor o consumidor de corriente en el circuito eléctrico del automóvil, alimentándose de la corriente eléctrica que le proporciona la batería y transformándola en movimiento mecánico de su eje; movimiento que se aprovecha para la puesta en funcionamiento del motor de combustión interna. Desde el punto de vista académico, los motores de arranque son objeto de diseño, de modelado y simulación, de monitoreo/diagnóstico, también de reparación, siendo abundantes y diversos los trabajos relacionados con estas actividades académico-investigativas. Los autores del presente trabajo se han interesado por la dotación de una instalación en la que se puedan ensayar y registrar las características de desempeño de los motores de arranque que accionan los motores de combustión interna de hasta 3 litros de cilindrada, montados en los automóviles de pasajeros comerciales en el país y que según las especificaciones de fabricantes como Denso [8] y Mahle [9] tienen potencias acotadas hasta de 3 kW.

Tradicionalmente, los motores de arranque automotrices han sido del tipo DC de campo bobinado en serie con el campo magnético del estator generado por bobinados alrededor del material magnético en serie con la armadura. Con los avances en materiales de imanes permanentes que proporcionan un producto de alta

energía, los motores de arranque de imanes permanentes adquieren una mayor relación potencia/peso que los motores de arranque de campo bobinado en serie. Además, el tamaño y el peso de los motores de arranque de imán permanente se pueden reducir aún más diseñando una armadura más pequeña que gire a velocidades más altas e introduciendo un engranaje adicional dentro del motor [1,2,3,4]. El diseño y la composición de los sistemas de arranque clásicos y modernos son abordados en muchas fuentes [5,6,7,8], detallando sus componentes de ensamble principales. Así mismo diferentes referencias y fabricantes [8,9,10,11] incluyen descripciones detalladas de la composición de diferentes tipos de baterías empleadas en los sistemas de arranque y las características constructivas y los tipos de motores de arranque.

Los motores de arranque son los encargados de vencer las resistencias pasivas: la compresión de los cilindros, fricción de los segmentos, inercia del volante, viscosidad del lubricante entre otros, resistencias variables que dependen del tipo del motor y temperatura del mismo en el momento de efectuar el arranque. La potencia requerida a los motores de arranque está determinada por las revoluciones mínimas de arranque (n_{ar}), la cilindrada y tipo del motor de combustión (V_1), la temperatura de operación (T_{amb}) y la viscosidad del lubricante (ν). Para motores de encendido provocado, anticipando un factor de servicio k y un rendimiento mecánico del sistema η , la potencia requerida al motor de arranque, N_a , se calcula

por una expresión de la forma $N_a = (54+365 \cdot V_1) \cdot v^{0,53} n_{ar}^{1,35} \cdot \pi \cdot k / \eta$ [1].

Por arranque fiable se entiende la puesta en marcha tras no más de tres intentos del motor equipado con todos sus accesorios y alimentado con el combustible estándar. La duración de cada intento no debe ser mayor a 10 segundos para los motores a gasolina y 15-20 segundos para los motores Diésel. Los intervalos entre los intentos pueden ser de 1 a 1,5 minutos [1]. Se tiene el caso especial de arranque de motores de combustión interna con condiciones de baja temperatura, por lo que en el trabajo de Gupta [15], se tratan problemas generales que involucran bajas condiciones de temperatura, aspectos de diseño del motor y los resultados obtenidos durante las pruebas para estas condiciones de campo.

En cuanto a aplicaciones modernas, se ha integrado el motor de arranque y el alternador en una sola unidad como parte de un vehículo híbrido, este tipo de vehículos han surgido como alternativa a los motores de combustión interna convencionales con la finalidad de reducir emisiones de efecto invernadero. Viorel et al. [16] en su trabajo exploran las variantes constructivas, las ventajas y beneficios del arrancador-generador integrado en vehículos híbridos, así también se discute los tipos de máquinas eléctricas que pueden ser usadas en esta aplicación.

En el trabajo de Vinogradov et al. [2] se describe una propuesta de modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema de arranque. El enfoque se basa en los modelos actualizados de los elementos del sistema de arranque, prestando especial atención al comportamiento dinámico de la batería, las fuerzas de fricción entre pistón y cilindro y el embrague de sobrecarga. A partir de las leyes de Kirchhoff, se obtienen las expresiones (1) y (2) que permiten modelar el comportamiento dinámico del voltaje y la corriente en el sistema batería-motor-de-arranque [2]:

$$E_B - E_A - I_A(R_A + R_L + R_{B2}) - (L_A + L_L) \frac{dI_A}{dt} - U_{RB1} \quad (1)$$

$$- \Delta U_{esc} = 0$$

$$I_A = C \frac{dU_{RB1}}{dt} + \frac{U_{RB1}}{R_{B1}} \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2), se incluyen las variables: R_A , R_L – correspondientes a las resistencias del devanado y del cableado, incluyendo la resistencia del switch; L_A , L_L – son las inductancias correspondientes al devanado y el cableado; E_A – corresponde a la fuerza electromotriz producida en la armadura del motor durante su rotación;

I_A – es la corriente en la armadura. En el circuito equivalente de la batería: R_{B1} and R_{B2} – corresponden a las resistencias internas en la batería; C – es la capacitancia equivalente de la doble capa en la batería; E_B – es la fuerza electromotriz interna de la batería. $\Delta U_{esc} = 0.112 \ln(50.1 \cdot I_A + 1)$ es la caída de voltaje en las escobillas del motor de arranque DC. La fuerza electromotriz en la armadura se define en función de la corriente en la armadura: $E_A = (0.0244 + 4 \cdot 10^{-5} I_A) \omega_M$.

El criterio principal para juzgar sobre la calidad de operación del motor de arranque es la velocidad angular promedio del eje del cigüeñal en estado estable, determinada experimentalmente en bancos de ensayos. Para caracterizar el comportamiento dinámico de los sistemas de arranque, con miras a la elaboración y validación de modelos para simulación, son muy necesarios los bancos de pruebas, en los que se puedan simular fallas de operación con la intención de ganar conocimiento sobre el comportamiento de las variables de operación para la construcción de modelos predictivos y de diagnóstico de operación. Así, Murugesan et al. [3] describen las posibles fallas en los sistemas de arranque, al igual que proponen y explican varios desarrollos para el monitoreo y diagnóstico de las mismas; los autores proponen ajustar el sistema de arranque, basado en la unidad de control electrónico, con algunas de las características de seguridad y el sistema de monitoreo en línea para indicar el estado de carga de la batería. El diagnóstico de fallas basado en modelos, es abordado por Mattias [4], quien emplea los modelos para un sistema de diagnóstico y desarrollar una teoría general, aplicable a de motores eléctricos, turbinas.

Reconociendo la importancia de obtener experimentalmente las características dinámicas de los motores de arranque para vehículos, como requisito para abordar el modelado de los mismos y también considerando la necesidad académica e investigativa de disponer de una instalación para diagnosticar motores de arranque eléctricos, se ha abordado la tarea de diseñar y construir un banco de ensayos para este propósito. Consecuente con esto, el propósito principal del presente artículo es la presentación del banco de pruebas diseñado y construido en el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica, destinado para la realización de ensayos demostrativos de diagnóstico de operación y para caracterización transitoria de las variables de corriente, voltaje y revoluciones de motores de arranque, acoplados y desacoplados a motores de combustión interna. En los siguientes apartes de este trabajo se expone el proceso de ensamble del banco, la instrumentación utilizada y la metodología sugerida para las pruebas. A continuación,

se exponen algunos resultados gráficos obtenidos durante el ensayo de un motor de arranque. Se cierra el artículo con las conclusiones relevantes a nuestro juicio, del trabajo realizado.

2. Ensamble del banco de pruebas

El par de salida producido por un motor de arranque es función de la potencia de entrada (voltaje y corriente de la batería), la carga o resistencia a vencer y la eficiencia mecánica del motor de arranque [12]. Estos determinan la velocidad de arranque resultante. Para la valoración de los sistemas de arranque y la obtención experimental de sus características pueden emplearse sistemas de carga basados en motores de combustión, basados en dinamómetros y basados en volantes de inercia. El banco de ensayos considerado para este trabajo es del tipo de volante de inercia. A partir de consideraciones prácticas y constructivas, considerando los criterios de diseño mecánico, esfuerzos y deformaciones, se dimensionaron los elementos que constituyen el banco de pruebas. El proceso de diseño del banco de pruebas, no es abordado en este artículo por consideraciones de espacio, pero sí se da una descripción breve de los elementos que conforman el banco de pruebas:

Batería: la batería o acumulador tiene como función alimentar el motor de arranque; para el banco se dispone de una batería de 12 voltios y una capacidad de 75 Ah.

Motor de arranque: utilizado en automóviles comerciales, se dispone de un motor de arranque convencional, cuyas características técnicas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características del motor de arranque

Aplicación	Motores nafteros de 1,6 litros de cilindrada
Tensión	12 Volts
Potencia	1 KW
Torque de bloqueo	10,5 Nm (1,07 Kgm)
Rotación	Sentido “horario” o “antihorario” según requerimiento de funcionamiento
Temperatura	-20°C a 110°C (-4° F a 230° F)
Peso	3 Kg
Vida útil	Más de 60.000 arranques sin mantenimiento (10 años mínimo de uso)
Montaje	Diseñado para cada aplicación

Fuente: [22].

El motor de arranque utilizado en el banco de pruebas es accionado por un pulsador, el cual hará el puente para permitir desde la batería, el flujo de corriente al motor de arranque eléctrico, a través de la energización del *relé* de tracción, produciendo el engrane del piñón del rotor con

un volante de acople instalada en un extremo del eje del volante de carga. En el banco también se ha previsto el acople por transmisión de correa de este mismo árbol al cigüeñal de un motor mono-cilíndrico diésel con motor de arranque propio, para también caracterizar su comportamiento en arranque compartiendo el mismo sistema de volante. De esta manera, se puede probar el motor de arranque del motor diésel instalado en el banco y también se pueden probar diferentes motores de arranque de manera independiente, desinstalando la correa, siempre y cuando el módulo y la geometría del piñón de engrane del motor a probar sea compatible con las características geométricas del dentado del volante.

Durante el accionamiento, el motor de arranque eléctrico debe tener la capacidad para vencer las resistencias pasivas como la inercia del volante, la fricción, pérdidas mecánicas y compresión de los cilindros (en caso de acoplar un MCI a la transmisión por banda). La figura 1 presenta el motor de arranque empleado en el banco de pruebas, cuyo equivalente de referencia es el motor Bosch 9000141112.



Figura 1. Motor de arranque del banco de pruebas con su representación en Solidworks®. Fuente: elaboración propia.

Estructura del banco de pruebas: la estructura es la encargada de soportar el peso de cada uno de los componentes que son accionados por el motor de combustión interna y el motor de arranque, además de resistir las vibraciones generadas en el momento de la puesta en marcha de cada uno de ellos. La estructura concebida en el diseño se basa en una armadura central con forma de paralelepípedo rectangular. En sus extremos se soldaron dos extensiones que permiten soportar el peso del motor de combustión interna y la batería que está conectada al motor de arranque eléctrico, estas dos estructuras van apoyadas en los extremos de la base central como se muestra en el esquema de la figura 2.

Rotor con volantes de accionamiento y volante de carga: al accionar el motor de arranque, la potencia de entrada se transmite del volante de entrada o de acople, poniendo en movimiento el árbol y, a su vez, el volante

de carga. Debido a la energía acumulada en los volantes, estos siguen girando luego de desenergizado el motor de arranque. La inercia másica de los dos volantes simula la resistencia mecánica (suma de resistencias de fricción e inerciales, entre otras) que debe superar el motor de arranque al poner en operación un motor de combustión interna, por ejemplo. Los dos volantes utilizados tienen insertadas en sus periferias coronas dentadas; en el caso del dentado del volante de carga, este es utilizado para registrar la posición angular del árbol en el tiempo a partir de un sensor inductivo para luego procesar la velocidad de rotación.

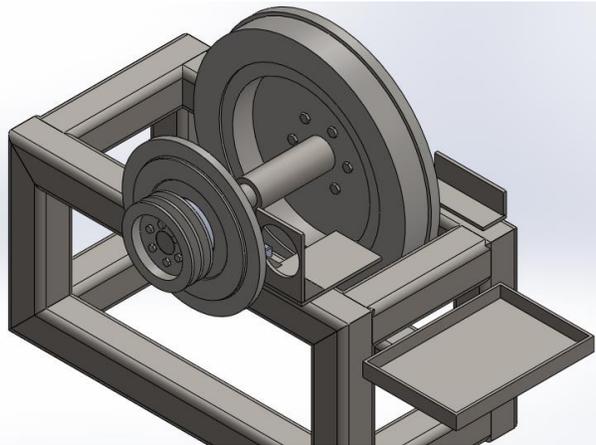


Figura 2. Modelo CAD del ensamble del eje con volantes instalado en la estructura portante del banco.
Fuente: elaboración propia.

Caja de encendido: para el accionamiento del motor de arranque, en una caja se disponen un pulsador de encendido, una bombilla testigo que indica el encendido del circuito o flujo de corriente y un interruptor on/off que permite el flujo de la corriente entre el solenoide del motor eléctrico y la batería como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Caja para el accionamiento del motor de arranque. Fuente: elaboración propia.

3. Instrumentación del banco de pruebas

La instrumentación del banco de pruebas para motores de arranque, se compone de un sensor de tipo inductivo para la medición de la posición angular, un circuito en serie con el sistema de arranque junto con una resistencia *shunt*, conectada a un circuito de amplificación para las lecturas de la intensidad de corriente y la tensión eléctrica en la batería. El sensor inductivo se compone de un imán permanente rodeado por una bobina captadora. Al giro del volante de carga, los dientes de la corona de ésta se enfrentan al sensor alternadamente, produciendo una variación en la reluctancia del circuito magnético del sensor y, consecuentemente, generando una fuerza electromotriz en los terminales de la bobina del sensor, de frecuencia proporcional al número de dientes y a la velocidad de rotación del volante. Entre mayor sea el número de dientes del volante, mayor será la resolución obtenida en las mediciones. El sensor inductivo utilizado es de salida digital de voltaje, con valores entre cero y el valor de la tensión de alimentación. En la figura 4 se aprecia el sensor de tipo inductivo montado en el banco de pruebas experimental.



Figura 4. Montaje del sensor inductivo en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.

La cadena de registro de la posición angular del volante de carga, para el procesamiento de la velocidad angular en el banco de pruebas experimental, está compuesta por los bloques mostrados en la figura 5. En ésta se distingue el bloque correspondiente al elemento sensor, el cual convierte la señal de posición angular en señal digital con características de 0 a 5 V (DC).

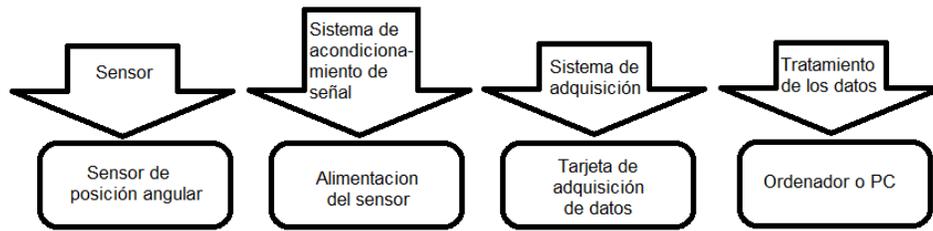


Figura 5. Esquema de la instrumentación para medir posición angular. Fuente: elaboración propia.

La señal enviada por el sensor es tomada por el circuito de acondicionamiento de señal, encargado de la amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento, permitiendo que esta señal sea apropiada para las características de entrada al sistema de adquisición de datos. En el sistema de adquisición de datos (DAQ) se puede distinguir el convertidor analógico-digital que es un chip, el cual proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. El bus de PC sirve como interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC; el código elaborado en el software computacional Matlab® permite realizar el tratamiento de la información y el despliegue y almacenamiento de la información de diagnóstico y caracterización procesada.

La señal del sensor inductivo debe acondicionarse, de manera que se asegure una tensión de 5 V a la entrada de la tarjeta de adquisición; alimentando el sensor desde la batería, se requiere ajustar el voltaje de salida de 12 voltios a los 5 voltios requeridos mediante una resistencia de 10 k Ω .

Tarjeta de adquisición de datos: las variables físicas de interés que se quieren medir en el banco de pruebas experimental son las correspondientes a velocidad angular en el volante de inercia, intensidad de corriente y diferencia de potencial consumidas por el motor de arranque. Con el sistema de adquisición de datos se quieren captar estas señales para luego poderlas procesar mediante una computadora. Por lo general todas las variables físicas que se deseen medir, se deben de convertir en tensiones eléctricas, de tal manera que puedan ser empleadas y/o puedan ser leídas por el PC.

Esto requiere que las señales eléctricas se deben convertir en digitales, de modo que se puedan procesar con un programa computacional como Matlab, Arduino, Labview, etc. El sistema de adquisición en este trabajo consta básicamente de una tarjeta de adquisición de datos DAQ (Data Acquisition) de National Instruments USB 6009 y el software Matlab R2016-a. La tarjeta NI USB 6009 tiene 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s), 2 salidas analógicas estáticas (12 bits), 12 E/S digitales y

un contador de 32 bits. Como se mencionó previamente, para el almacenamiento de los datos adquiridos se hace uso del software Matlab R2016-a. Este software es una herramienta ideal para este tipo de aplicaciones donde se requiera un procesamiento posterior de los datos. Además, es una herramienta para llevar a cabo diferentes actividades de investigación, como por ejemplo para el análisis y procesamiento de las señales, diseño y simulación de procesos y la realización de métodos y prácticas de aprendizaje; es por esta razón que este software combinado con una tarjeta DAQ lo hace una herramienta muy útil.

Adquisición de las señales de tensión eléctrica en la batería e intensidad de corriente: las señales de tensión eléctrica en la batería y de intensidad de corriente requieren acondicionamiento analógico para ser llevadas a la tarjeta de adquisición de datos. En la figura 6 se presenta el diagrama del circuito principal de arranque junto con el circuito de un seguidor de tensión para la medición de la corriente.

Con el propósito de medir la corriente se emplea un resistor (*shunt*), con un valor muy bajo de resistencia eléctrica, 0,001 ohm, $1 \frac{mV}{A}$. El flujo de la corriente I_{load} a través del *shunt* genera una caída de potencial proporcional al valor de la resistencia. Esta caída de potencial es medida por el sistema de adquisición de datos (antes de ser adquirida la señal se utiliza un seguidor de tensión para proteger la tarjeta de adquisición, dado que los amplificadores tienen resistencias muy elevadas). De esta manera, la corriente demandada se determina como:

$$I_{load} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (3)$$

La función de transferencia para un seguidor de tensión, considerando las condiciones ideales de impedancia: $Z_{out} = 0$, $Z_{cm} \rightarrow \infty$, $Z_{in} \rightarrow \infty$, se tiene que: $i(+)=i(-)=0$, y aplicando la Ley de Corrientes de Kirchhoff se obtiene la relación entre el voltaje de entrada V_{in} y el de salida V_{out} del amplificador:

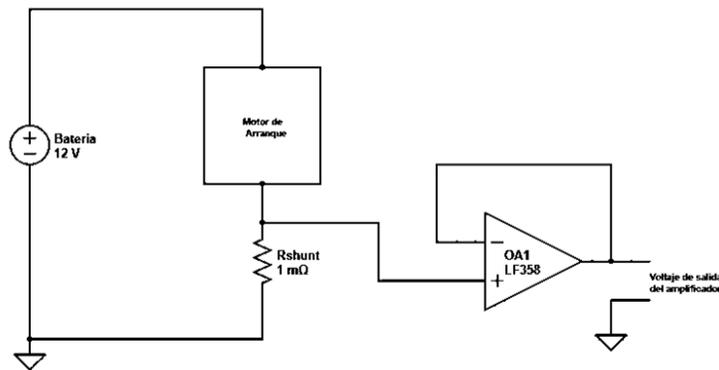


Figura 6. Esquema del circuito de arranque junto con el seguidor de tensión. Fuente: elaboración propia.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_{in} \quad (4)$$

En la figura 7 se representa el esquema de un amplificador inversor para ser conectado a los bornes de la batería; para el diagrama esquemático, V_1 está asociado con la tensión de la batería y V_{out} es la tensión de salida del amplificador.

La función de transferencia para un amplificador inversor, considerando las condiciones ideales de impedancia: $Z_{out} = 0$, $Z_{cm} \rightarrow \infty$, $Z_{in} \rightarrow \infty$, se tiene que: $i(+)=i(-)=0$, y aplicando la Ley de Corrientes de Kirchhoff, se obtiene la relación entre el voltaje de entrada V_1 y el de salida V_{out} del amplificador:

$$V_{out} = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right) V_1 \quad (5)$$

Para el circuito implementado $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ y $R_f = 10 \text{ k}\Omega$. Con esto se logra reducir la tensión en la batería a la mitad y adquirir la señal por medio de la tarjeta de adquisición de datos.

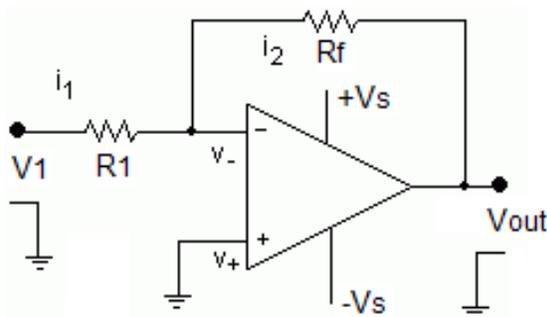


Figura 7. Diagrama esquemático de un amplificador inversor. Fuente: elaboración propia.

4. Metodología de las pruebas experimentales

Para efectos de presentación de la operación del banco, se efectuaron pruebas experimentales accionando el motor de arranque, bajo una disposición como la observada en la figura 8. Se realizaron 10 pruebas de arranque registrando mediciones durante períodos de 10 segundos. En cada prueba se pulsa manualmente el botón de arranque de la caja de encendido y el comando Run en el programa Matlab para iniciar la adquisición de las señales de tensión eléctrica, intensidad de corriente y velocidad angular.

Es de aclarar que, en un motor de combustión de encendido provocado, el tiempo demandado para el arranque normalmente es de 2-3 segundos. Sin embargo, las pruebas se extendieron a 10 segundos para realizar exploraciones adicionales y porque la inercia del volante de carga, seleccionada a propósito, es grande (propia de un motor de vehículo de carga), mayor que la correspondiente al motor de arranque utilizado para ensayos actualmente en el banco.



Figura 8. Banco de pruebas experimental instrumentado. Fuente: elaboración propia.

5. Resultados y discusión

En la figura 9 se presentan las señales procesadas de velocidad angular en función del tiempo durante el accionamiento inicial del conjunto de volantes con el motor de arranque.

Se puede ver en la figura 9 la consistencia en el comportamiento de la velocidad angular en el tiempo de cada una de las pruebas; desde el inicio de la prueba, la velocidad del volante aumenta progresivamente hasta alcanzar su velocidad máxima aproximada de 500 min^{-1} . Los valores del número de revoluciones se pueden comparar con respecto a la intensidad absorbida o consumo de corriente a distintos regímenes de revoluciones. A medida que se supera la inercia del volante, la velocidad angular crece y la corriente eléctrica demandada para superar la resistencia (carga mecánica) decrece, como se verifique en los ensayos y simulaciones realizadas por otros autores [6,7,12,13,17,18]. La curva promedio de velocidad angular y la desviación estándar en el tiempo se pueden apreciar en la figura 10.

La desviación estándar de las revoluciones varía entre 1 y 6 min^{-1} (rpm), manteniéndose el error relativo de la medición en torno a un 1%.

Las señales procesadas obtenidas de intensidad de corriente en función del tiempo se pueden apreciar en la figura 11.

Los valores pico de corriente se observan durante el primer segundo, con valores cercanos a los 300 A, cuando se empieza a superar toda la resistencia del conjunto de volantes. Luego se tiene un comportamiento decreciente de la intensidad (es menor el par demandado) hasta llegar al valor de sostenimiento correspondiente a la carga de las pérdidas mecánicas y aerodinámicas, un valor cercano a los 30 A, en el conjunto de volantes y los rodamientos, esencialmente. Es, de hecho, un resultado indirecto de las pruebas, la posibilidad de estimar la corriente (y el par) demandados por las pérdidas en el conjunto mecánico.

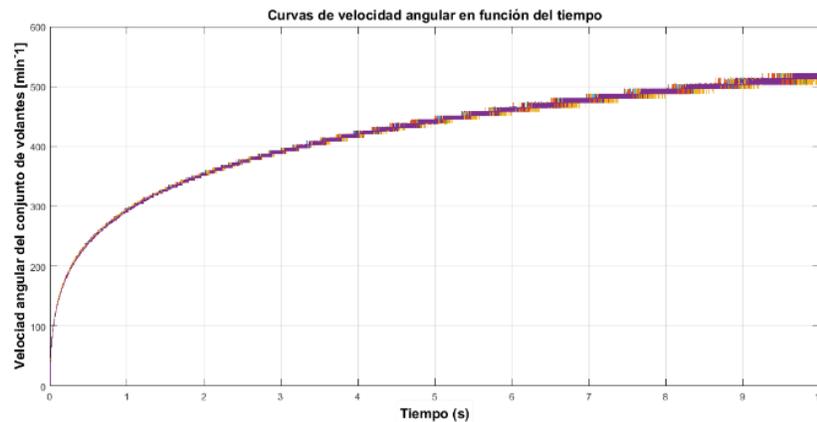


Figura 9. Señales de velocidad angular en el tiempo del conjunto de volantes. Fuente: elaboración propia.

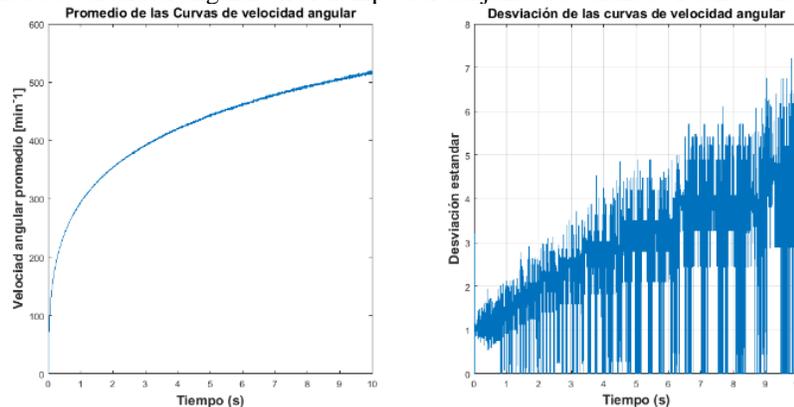


Figura 10. Curva promedio de velocidad angular y desviación estándar. Fuente: elaboración propia.

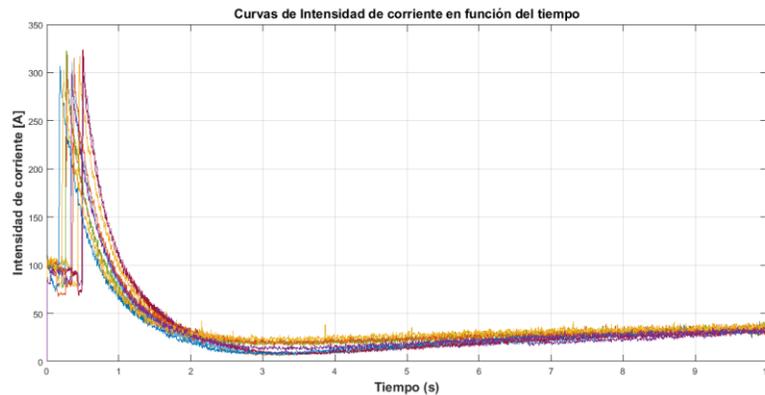


Figura 11. Señales de intensidad de corriente en el tiempo durante el arranque. Fuente: elaboración propia.

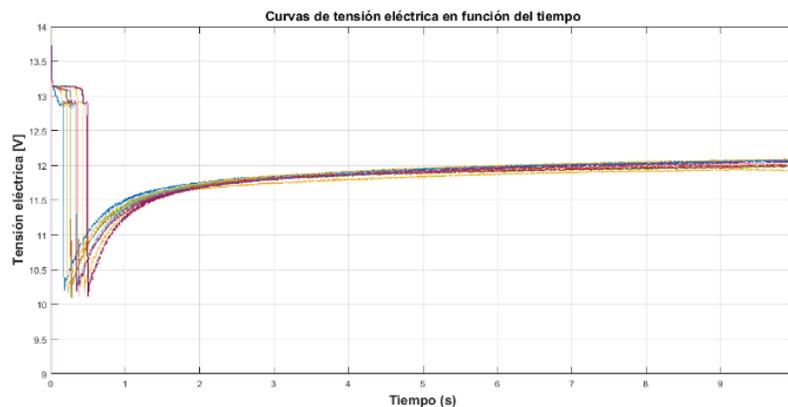


Figura 12. Señales de tensión eléctrica de la batería en función del tiempo durante el arranque para el conjunto de volantes. Fuente: elaboración propia.

Las señales procesadas obtenidas de tensión de la batería en función del tiempo se pueden apreciar en la figura 12.

En el caso del comportamiento de las curvas de tensión eléctrica de la batería en función del tiempo, en el momento de inicio del giro del motor de arranque, la tensión proporcionada por la batería cae de forma abrupta desde 13,1 V hasta un valor de 10,2 V aproximadamente durante el primer segundo, a partir de allí comienza nuevamente a incrementarse el valor de la tensión a medida que se vence la inercia del conjunto de volantes hasta llegar a un valor de estado estable de 12 V. Los valores de intensidad de corriente y tensión eléctrica DC permiten estimar la potencia eléctrica promedio consumida por el motor de arranque para el accionamiento del conjunto de volantes. De la literatura relacionada con el modelado y la experimentación de motores de arranque [2,6,7,13,14], puede verse que el comportamiento de la corriente y el voltaje son consistentes, siendo las magnitudes dependientes de la carga o inercia a acelerar. Debe recordarse que el motor de arranque no pone en funcionamiento un motor de

combustión interna. El comportamiento de las curvas de potencia eléctrica instantánea se puede apreciar en la figura 13.

Observando las curvas de potencia eléctrica de la figura 13, durante el lapso del primer segundo, se demanda la máxima potencia cercana a los 3000 W. Luego, entre el primer segundo y los 4 segundos se presenta un decrecimiento en la demanda de potencia eléctrica (tiempo durante el cual se está venciendo la resistencia del conjunto de volantes) y a partir de los 4 segundos en adelante, la demanda de potencia crece levemente en proporción al crecimiento de las revoluciones (las pérdidas de fricción en rodamientos, se pueden modelar como el par de fricción en función de la velocidad angular, viscosidad dinámica y algunas constantes que dependen del tipo de carga y las pérdidas aerodinámicas, que son función de la fuerza de arrastre que actúa de manera tangencial al volante), hasta llegar aproximadamente a 500 W, cuando las revoluciones son cercanas a las 500 min^{-1} .

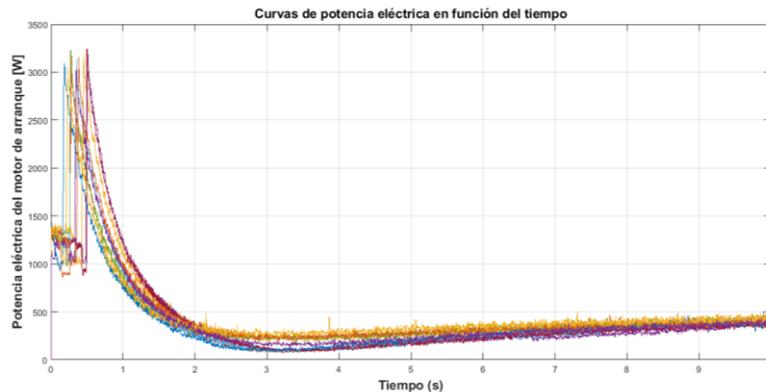


Figura 13. Potencia eléctrica instantánea demandada en el motor de arranque para el accionamiento del conjunto de volantes. Fuente: elaboración propia.

En la figura 14 se presentan las curvas de velocidad angular, intensidad de corriente, tensión eléctrica y potencia eléctrica integradas en un mismo gráfico para la condición de carga de solo el conjunto de volantes. La gráfica representa, entonces, las curvas de operación normalizadas del motor de arranque bajo carga, mediante las cuales se evaluaría la condición de operación del motor bajo prueba.

6. Conclusiones

Se ha presentado el diseño, construcción, ensamble e instrumentación de un banco de pruebas para motores de arranque, con el fin de realizar ensayos de laboratorio, en primera instancia didácticos, para propósitos académicos. El banco desarrollado puede ser usado para diagnosticar la condición de los motores de arranque a partir del análisis del comportamiento de la velocidad

angular, la corriente y la tensión en el sistema motor-de-arranque-batería.

El banco desarrollado prevé su utilización, no solo para probar motores de arranque independientes, sino también para probar motores completos con su propio motor de arranque, lo que extiende el campo de aplicación del banco y el espectro de pruebas a realizar, incluyendo el diagnóstico de pérdidas mecánicas en el sistema, elementos que serán objeto de estudio en futuros trabajos.

Se han presentado los resultados gráficos del comportamiento de la velocidad angular, corriente y tensión eléctrica obtenidos en el banco de pruebas durante el estudio experimental de un motor de arranque, pretendiendo ilustrar su utilización y presentación de resultados.

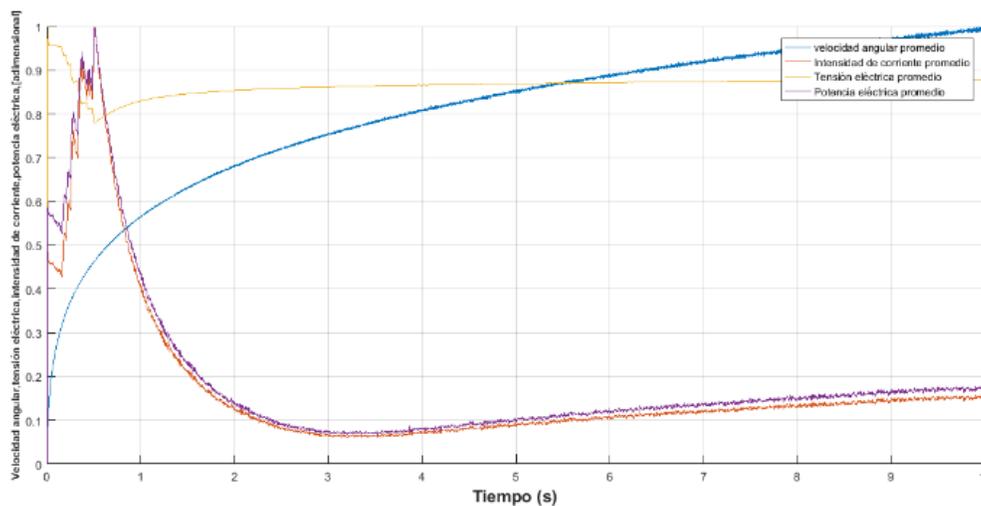


Figura 14. Curvas de operación normalizadas de corriente, voltaje y revoluciones del motor de arranque bajo carga. Fuente: elaboración propia.

Los resultados son consistentes a la luz de las formas de las gráficas correspondientes encontradas en los trabajos de Enache [6], Bayir [7], Amato [13], Miao [14] y Sultan [18], teniendo en cuenta que en los trabajos relacionados las características se obtienen para el sistema integral *motor-de-arranque-motor-de-combustión*, mientras que las que se han obtenido en este trabajo corresponden a un sistema *motor-de-arranque-volante-de-inercia*. Se demuestra la importancia y la utilidad del banco de pruebas como herramienta didáctica y también como herramienta para la caracterización y diagnóstico de componentes de los sistemas de arranque, incluyendo la calidad de las baterías o acumuladores. Una aplicación muy importante del banco construido es el diagnóstico del desempeño, operación y rendimiento de motores de arranque reparados. Efectivamente, es corriente que se reparen los motores de arranque y se pase a instalarlos en los motores sin haberlos sometidos a una caracterización bajo carga.

Para mejorar la capacidad de diagnóstico fenomenológico de los motores de arranque del banco, en una etapa siguiente, se proyecta la adaptación de un sensor óptico (decodificador angular) de mayor resolución y también explorar la utilización del banco para la medición de las pérdidas mecánicas en motores de combustión interna de cilindradas hasta de dos litros, durante el régimen de arranque (actualmente se adelantan trabajos en esta dirección).

El banco construido, además de servir para propósitos de enseñanza e investigación en las prácticas de pregrado y posgrado en Ingeniería Mecánica, continuará perfeccionándose y caracterizándose en sus incertidumbres relacionadas con las resistencias mecánicas correspondientes a los rodamientos y la resistencia aerodinámica, de manera que se pueda precisar de manera más cercana los resultados de las variables instantáneas.

Referencias

- [1] C. A. Romero, “Motores de combustión interna: Fundamentos de construcción y cálculo,” trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2005.
- [2] M. Averbukh, B. Rivin, J. Vinogradov, “On Board Battery Condition Diagnostics Based on Mathematical Modeling of an Engine Starting System,” *SAE Technical Paper*, vol. 116, no.17, pp. 406-413, 2007.
- [3] V. M. Murugesan *et al.*, “An overview of automobile starting system faults and fault diagnosis methods,” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, no. 7. pp. 812–819, 2012.
- [4] N. Mattias, “Model based fault diagnosis, methods, theory, and automotive engine applications,” tesis de doctorado, Linköping University, Suecia, 1999.
- [5] T. Denton, *Automobile Electrical and Electronic Systems*. Burlington, NJ, USA: Arnold, 3rd Edition, 2004.
- [6] B. A. Enache, L. M. Constantinescu, E. Lefter, “Modeling aspects of an electric starter system for an internal combustion engine,” *Proceedings of the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2014, pp. 39–42, doi: 10.1109/ECAI.2014.7090177
- [7] R. Bayir, “Condition monitoring and fault diagnosis of serial wound starter motor with learning vector quantization network,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 18, pp. 3148-3156, 2008.
- [8] “Europa - Denso.” [Online]. Available: <https://www.denso-am.eu/>. [Accessed: 16-Apr-2020].
- [9] Mahle, “Wide range of starter motors for diesel and petrol engines. Applications Starter motors for petrol engines from 1.4 to 3 liter of capacity for passenger cars and light commercial vehicles,” [Online]. Available: <https://www.mahle.com/>
- [10] A. W. Judge, *Modern Electrical Equipment of Automobiles*. London: Chapman & Hall, 2004.
- [11] R. Bosch, *Bosch Automotive Handbook 8th edition*. Cambridge, MA, USA: Bosch Bentley Publishers, 2004.
- [12] T. P. Gardner, N. A. Henein, “Diesel Starting: A Mathematical Model,” *SAE Technical Paper*, vol. 97, no. 6, pp. 728-740, 1998.
- [13] F. Amato, G. Celentano, R. Iervolino, D. Freni, “Modelling and Experimental Validation of a Car Starting System,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 34, no. 1, pp. 325–330, 2001, doi: 10.1016/S1474-6670(17)34418-X
- [14] H.-C. Miao, L. O. Hewko, D. A. Fulton, “Dynamic Modeling and Simulation of an Automotive Engine Cranking System,” *SAE international 920292*, 1992, doi: 10.4271/920292.
- [15] R. B. Gupta, “Cold Starting of IC Engines,” *Def. Sci. J.*, vol. 38, no. 1, pp. 77–85, 1988, doi: 10.14429/dsj.38.4827

[16] I. Viorel, L. Szabó, L. Löwenstein, C. Stet, “Integrated starter generators for automotive applications,” *Technical University of Cluj-Romania, Department of Electrical Machines*, vol. 45, No. 3, 2004.

[17] A. B. Patil, N. S. Ranade, “Simulation of an I.C. Engine During Cranking by a Starter Motor,” *SAE Technical*, vol. 102, no. 3, pp. 911-917, 1993.

[18] M. Sultan, L. Tang, M. Chang, “An Engine and Starting System Computer Simulation,” *SAE Technical*, vol. 99, no.3, pp. 1615-1623, 1990.

[19] B. V Zhuravsky, A. V Zanin, I. N. Kvasov, “Simulation of the electric starter system of the internal combustion engine start-up to study the impact on its operation of the pre-start battery discharge,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1441, p. 12030, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012030

[20] T. Furukawa, “Capacitors for Internal Combustion Engine Starting with Green Technology DLCAP,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 233-237, 2009.

[21] A. C. Michelotti, J. C. Silva, “Design innovation in dynamic coupling of starting system for internal combustion engines,” *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 38, pp. 177–188, 2016.

[22] F. D. Cruz, O. A. Londoño, “Ensamble e instrumentación de un banco de pruebas para motores de arranque”, trabajo de grado de pregrado, Univ. Tec. Pereira, Colombia, 2015.

[23] G. F. García, J. L. Chacón, y A. Chaves, “Modelado de la combustión en motores Diésel: revisión del estado del arte,” *Rev. Ion*, vol. 26 no. 1, pp. 41-54, 2013.