ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA EFECTIVA MEDIDA POR EL MÉTODO DE LA ACELERACIÓN LIBRE AL INDUCIR DIFERENTES MODOS DE FALLOS EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA CON SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA."

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

DANIEL CORREA BERNAL
daniel-correa-bernal@hotmail.com

CRISTIAN FERNANDO LEMA ROMERO
ingauto_fernandolema@hotmail.com

DIRECTOR:
ING. FERNANDO ROBLES MORILLO, M.Sc.
fernandorobles@setamer.com

CO-DIRECTOR:
ING. IVAN ZAMBRANO OREJUELA, M.Sc.
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2017.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el **ING. DANIEL CORREA BERNAL**, y el **ING. CRISTIAN FERNANDO LEMA ROMERO**, bajo nuestra supervisión.

_____

ING. FERNANDO ROBLES MORILLO. MSC.

DIRECTOR DE PROYECTO

_____

ING. IVAN ZAMBRANO. MSC

CO - DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **ING. DANIEL CORREA BERNAL**, **CRISTIAN FERNANDO LEMA ROMERO,** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

_____

ING. DANIEL CORREA BERNAL.

_____

ING. CRISTIAN FERNANDO LEMA ROMERO.

DEDICATORIA (Daniel)

A todos mis colegas ingenieros apasionados por los automotores que han contribuido a la generación de un conocimiento superior en el tema, aportando así al aumento de la competitividad del sector automotor a nivel latinoamericano.

AGRADECIMIENTO (Daniel)

Sin duda alguna mis mayores agradecimientos están dirigidos al pueblo ecuatoriano que me abrió sus puertas de la manera más cálida durante mi estadía en su país; a Dios por haberme brindado las capacidades y las oportunidades necesarias para culminar este proceso de aprendizaje de manera tan exitosa; a mi familia por motivarme a ser cada día mejor; a mi maestro Ing. Fernando Robles por compartir día a día sus conocimientos sin ningún tipo de celo y a mi gran amigo y compañero Cristian Fernando Lema Romero en quien siempre encontré un gran apoyo independientemente de cuan locas pudieran sonar las ideas para desarrollar esta tesis. ¡A todos ellos muchas gracias!

DEDICATORIA (Fernando)

Este trabajo les dedico a todos aquellos que son apasionados por el conocimiento en el área automotriz, en espera de algún día poder aprender mutuamente.

A mis hijos para que tomando como referencia este desarrollo siga un modelo de superación personal y profesional en un futuro no muy lejano.

AGRADECIMIENTO (Fernando)

A Dios sobre todas las cosas, a mis Padres y mi familia por su apoyo permanente en cada paso, a mi esposa Isabel que es inspiración para mi vida, a Fernando Robles por su ejemplo y verdadera amistad, a Daniel Correa porque en la vida más allá de un compañero de clase es un verdadero amigo en quien podre confiar siempre y a la Escuela Politécnica Nacional y todos los miembros que hacen de esta Universidad la mejor del Ecuador.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

Pregunta de investigación 2

Objetivo general 2

Objetivos específicos 2

Hipótesis 2

1. MARCO TEÓRICO. 3

1.1 Curvas características del motor. 3

1.2 Curvas características normalizadas: 6

1.3 Desarrollo teórico del método. 9

2. METODOLOGÍA 13

2.1. Selección de un vehículo de pruebas modelo 13

2.2. Metodología de toma de datos. 14

2.3. Adquisición de datos del sensor de posición de cigüeñal - crankshaft position sensor (CKP). 14

2.4. Procesamiento de datos y desarrollo del software. 19

2.5. Determinación del momento de inercia del motor: adición de una masa con momento de inercia conocido al eje del cigüeñal. 32

2.6. Validación del método. 43

2.7. Desarrollo práctico para reproducir modos de falla en sensores y actuadores. 53

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 55

3.1 Curvas características con los modos de fallo inducidos. 55

3.2 Desactivación sucesiva de cilindros. 64

3.3 Comparativa de motores por medio de curvas características normalizadas. 65

3.4 Análisis del comportamiento de la potencia a diferentes alturas sobre el nivel del mar. 69

3.5 Discusión 75

4. CONCLUSIONES 77

Referencias Bibliográficas 79

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollan las herramientas necesarias para aplicar el método de la aceleración libre encaminado a la determinación de la potencia efectiva de un motor de combustión interna. Para ello se toma la señal del sensor CKP del vehículo de estudio durante un ciclo de aceleración conforme con una metodología planteada en esta tesis y con base en dicha señal, que registra datos sobre la velocidad angular instantánea del motor, se obtienen sus curvas características. En particular fue necesario superar tres inconvenientes: 1) Encontrar una alternativa económica a las tarjetas convencionales de adquisición de datos; 2) Plantear los requerimientos necesarios para desarrollar el software de procesamiento de los datos y 3) Validar el método de la aceleración libre tanto para la determinación del momento de inercia del motor (I) como su potencia efectiva.

Una vez desarrollada la herramienta para la medición de la potencia efectiva se procede a inducirle fallos al motor de tal manera que puedan ser reproducibles posteriormente como: la desconexión de algunos sensores o actuadores del sistema de inyección electrónica, o la simulación de algunas de sus señales. Finalmente se compara la potencia del motor obtenida al inducirle cada uno de los fallos contra la potencia del motor en óptimas condiciones de funcionamiento. Se observó que no necesariamente todos los modos de fallo inducidos afectan sustancialmente la potencia; los más representativos fueron aquellos que literalmente inactivan alguno de los cilindros del motor.

PALABRAS CLAVE: ACELERACIÓN LIBRE, POTENCIA, TORQUE, MOMENTO DE INERCIA DEL MOTOR, CURVAS CARACTERÍSTICAS, INYECCIÓN ELECTRÓNICA.

ABSTRACT

In this paper we develop the necessary tools to apply the method of free acceleration to determine the effective power of an internal combustion engine. For this we take the CKP sensor signal of the studied vehicle for an acceleration cycle in accordance with the methodology proposed in this thesis and based on this signal, which records data of the instantaneous angular velocity of the motor, their characteristic curves are obteined. In particular it was necessary to overcome three major drawbacks: 1) Find an economical alternative to conventional data acquisition cards; 2) Raising the necessary requirements to develop software data processing and 3) To validate the method of free acceleration for both the determination of the motor moment of inertia (I) as its effective power.

Once developed the tool for measuring the effective power it is necessary to induce failures to the engine so that it can later be reproducible as: disconnection of some sensors or actuators from the electronic fuel injection system, or simulating some of their signals. Finally is compared the engine power obtained by inducing each of the falilures against the engine power in optimum operating conditions. It was observed that not necessarily all modes induced substantially affect the power failure; the most representative were those that literally inactivate any of the engine cylinders.

KEY WORDS: FREE ACCELERATION, POWER, TORQUE, ENGINE'S INERTIA'S MOMENT, ENGINE'S CHARACTERISTIC CURVES, ELECTRONIC FUEL INJECTION

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA EFECTIVA MEDIDA POR EL MÉTODO DE LA ACELERACIÓN LIBRE AL INDUCIR DIFERENTES MODOS DE FALLOS EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA CON SISTEMA DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA.”

INTRODUCCIÓN

Existe la necesidad de tener una metodología que permita la medición de potencia por el método de aceleración libre con una herramienta adecuada para el caso y que se pueda aplicar en cualquier sistema de inyección electrónica.

La metodología que se explica durante el desarrollo del proyecto de tesis y que ha sido probada también por otros autores con el método de aceleración libre como técnica de medición de torque, potencia, y pérdidas mecánicas; representa alcances importantes para el conocimiento y caracterización del comportamiento de dichas curvas características cuando se generan modos de fallo en sensores y actuadores. También se sabe que en la actualidad existe otro trabajo de grado similar en Ecuador, donde se determina la afectación de la potencia conforme se aumenta la altura sobre el nivel del mar.

El estudio que se realiza en esta tesis es importante ya que muestra el comportamiento de la potencia, torque y pérdidas mecánicas al inducir modos de fallo sobre sensores y actuadores del sistema de inyección electrónica obteniendo caracterizaciones del comportamiento típico en un motor específico, para que partiendo de este concepto se lo pueda aplicar a nivel industrial a futuro.

El desarrollo planteado en esta tesis permite realizar estudios con esta metodología sobre cualquier sistema de inyección electrónica para la caracterización y cuantificación de pérdidas de potencia con modos de fallo definidos y específicos, de forma rápida, confiable, económica y repetible con miras a ser ampliada a nivel de industria como la implementación como método de diagnóstico sobre flotas de unidades en motores diésel o gasolina y varias aplicaciones puntuales como trucaje de motores, estudios que detallen comportamiento a diferentes alturas sobre el nivel del mar, etc. Con este desarrollo se contribuye además teóricamente a comprender el método y su estado del arte, y a poseer la herramienta física para cualquier sistema de inyección electrónica que permitan estudios posteriores con la misma metodología planteada.

Pregunta de investigación

La pregunta a responder es: ¿Qué porcentaje del valor de la potencia efectiva generada se ve afectado por el mal funcionamiento de sensores y actuadores del sistema de inyección electrónica?

Objetivo general

Analizar el comportamiento de la potencia efectiva medida por el método de aceleración libre en un motor de combustión interna a gasolina con sistema de inyección electrónica cuando se le inducen modos de fallos típicos.

Objetivos específicos

- Determinar el estado del arte a través de revisiones bibliográficas y otras fuentes de consulta.
- Establecer e implementar un procedimiento para la medición de potencia efectiva en motores de combustión interna a gasolina con sistema de inyección electrónica con el método de aceleración libre.
- Determinar los modos de falla típicos asociados a los sensores y actuadores que controlan el motor y analizar cuáles de ellos son inducibles para repetitividad futura en sistemas similares.
- Analizar comparativamente entre la medición de la potencia efectiva sin fallo con el procedimiento mencionado, frente a las mediciones realizadas cuando se inducen cada uno de los modos de fallo identificados por vez.

Hipótesis

Al final de este estudio se pretende obtener el porcentaje de variación de las curvas características del motor como la potencia, torque y perdidas mecánicas cuando en un motor especifico es inducido algunos modos de fallo típicos reproducibles, analizar brevemente el estado de perdidas mecánicas que el método permite, realizar pruebas adicionales como contribución de cilindros y comportamiento del porcentaje de potencia frente a la variación de altura con respecto al nivel del mar.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1 Curvas características del motor.

Para desarrollar el método de la aceleración libre y para determinar la potencia efectiva de un motor es necesario partir tanto de la primera como de la segunda ley de Newton:

Primera ley de Newton.

"Una partícula originalmente en reposo, o que se mueve en línea recta con velocidad constante, permanecerá en este estado siempre que no esté sometida a una fuerza que no esté balanceada" (Hibbeler, 2004, pág. 5).

Alonso & Finn, (1967) coinciden con que si bien el concepto anterior se refiere únicamente al movimiento rectilíneo, éste se puede extrapolar al movimiento circular, sólo tomando en consideración que en el movimiento circular en vez de hablar de fuerzas se habla de torques.

Por lo tanto un cuerpo que se encuentre girando con respecto a cualquiera de sus ejes, deberá permanecer en dicho estado a menos que un torque externo lo obligue a cambiar su condición de giro.

Segunda ley de Newton.

"Una partícula sobre la que actúa una fuerza desbalanceada F experimenta una aceleración que tiene el mismo sentido que la fuerza y una magnitud que es directamente proporcional a la fuerza" (Hibbeler, 2004, pág. 5).

En otras palabras, la segunda ley de Newton dice que la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración. Por lo tanto, cuanto mayor sea una masa, más fuerza habrá que aplicarle para imprimirle una aceleración determinada o, si se prefiere mirar desde otro punto de vista, si se desea acelerar a una mayor tasa una determinada masa, entonces será necesario aplicar una mayor fuerza.

Movimiento circular.

Si se desea llevar el concepto al movimiento circular, se debe considerar entonces que para cambiar el estado de reposo o de giro uniforme de un cuerpo hay que aplicarle un torque. De acuerdo con Alonso & Finn, (1967), la fuerza es al movimiento rectilíneo como el torque es al movimiento circular. Por lo tanto la definición de torque implica tanto un símil para la aceleración como para la masa. Entonces, de acuerdo con la segunda ley de

Newton, el torque es igual al producto entre la aceleración angular de un cuerpo y su momento de inercia con respecto al eje de giro.

Potencia.

Se hace necesario entonces introducir el concepto de potencia desde un punto de vista mecánico: “La potencia se define como la tasa en el tiempo a la cual se efectúa el trabajo” (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004, pág. 763).

Por otro lado, según Beer, Johnston, Clausen, & Staab, (2004) el trabajo es el producto entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la distancia que separe la posición inicial y la final del recorrido. Así las cosas se puede afirmar que se es más potente en cuanto se pueda realizar un mismo trabajo en una menor cantidad de tiempo. A continuación se presentan las ecuaciones que describen lo escrito anteriormente (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004, pág. 763):

$$\boldsymbol{P} = U/t$$

Ecuación 1.1

Dónde:

$\boldsymbol{P}$: Potencia (W).

$\boldsymbol{U}$: Es el trabajo realizado (J).

$\boldsymbol{t}$: Es el tiempo tomado para realizar el trabajo (s).

El trabajo se define como sigue (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004, pág. 757):

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{F}.\boldsymbol{r}$$

Ecuación 1.2

Dónde:

$\boldsymbol{F}$: Es la fuerza que realiza el trabajo (N).

$\boldsymbol{r}$: Es la distancia recorrida (m).

Por lo tanto la potencia se puede expresar de la siguiente manera (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004, pág. 764):

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{F}.\boldsymbol{v}$$

Ecuación 1.3

Dónde:

$\boldsymbol{v}$: Velocidad lineal (m/s).

Extendiendo el concepto de potencia para el movimiento circular, se tiene que:

$$\boldsymbol{P} = T.w$$

Ecuación 1.4

Dónde:

T: Es el torque $(N.m)$.

w: Es la velocidad angular del cuerpo (rad/s).

El torque necesario para acelerar angularmente un determinado cuerpo viene dado por (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004, pág. 1029):

$$\mathbf{T} = \mathbf{I}.\boldsymbol{\alpha}$$

Ecuación 1.5

Dónde:

$\boldsymbol{I}$: Es el momento de inercia del de cuerpo sobre el eje de giro $(kg.m^2)$.

$\boldsymbol{\alpha}$: Es la aceleración angular del cuerpo (rad/s^2).

Entonces, la potencia para el movimiento circular queda definida por la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{I}.\propto.\boldsymbol{w}$$

Ecuación 1.6

Teniendo la posibilidad de encontrar una velocidad y una aceleración para cada instante de tiempo, se puede determinar por tanto la potencia y el par instantáneos. Sin embargo no es de interés determinar cuál es la evolución de la potencia en el tiempo. Resulta entonces mucho más interesante determinar la potencia y el par en función del régimen de giro del motor. Como se obtiene una velocidad angular para cada instante de tiempo, es posible graficarla en el eje horizontal; luego en el eje vertical se puede graficar ya sea la potencia o el par en función de la velocidad angular del motor.

Las gráficas que muestran la evolución del par y de la potencia en función del régimen de giro, son las denominadas curvas características del motor.

Las utilidades de las curvas características van desde mostrar el intervalo de uso de un motor concreto y proporcionar al usuario información sobre el funcionamiento dentro de

dicho rango de operación, hasta permitir la comparación de motores o evaluar la idoneidad de un motor para una determinada aplicación.

En la figura 1.1 y 1.2 se muestran las curvas características de torque y potencia respectivamente de un motor G4ED de Hyundai obtenida con el método de aceleración libre, en donde se puede observar su evolución en función del régimen de giro.

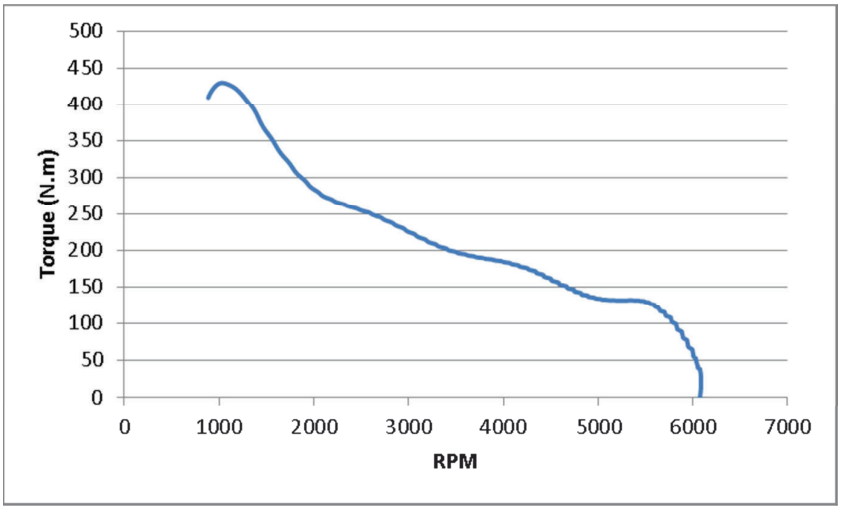

Figura. 1.1. Evolución de torque en función del régimen de giro de un motor G4ED de Hyundai obtenida por el método de la aceleración libre.
(Fuente: Autores).

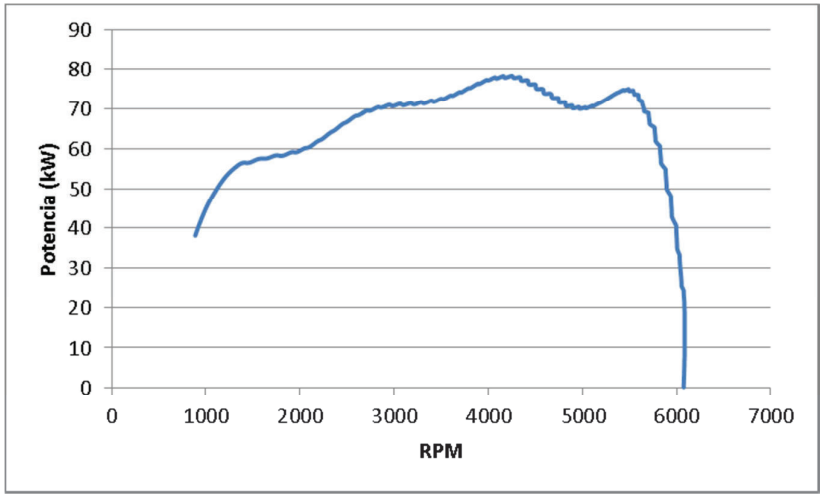

Figura. 1.2. Evolución de potencia en función del régimen de giro de un motor G4ED de Hyundai obtenida por el método de la aceleración libre.
(Fuente: Autores).

1.2 Curvas características normalizadas:

Las gráficas anteriores no son suficientes para comparar dos motores diferentes. Por ejemplo si se pretendiera comparar un motor de competición con el motor de un vehículo

convencional, sería evidente que los regímenes de revoluciones son muy diferentes. Otro ejemplo claro sería la comparación entre dos motores con una diferencia muy grande en su cilindrada: obviamente el motor más grande generará una mayor potencia, pero eso no necesariamente querría decir que, teniendo en cuenta las proporciones, sea más potente que el de menor cilindrada.

Por lo tanto para la comparación de motores diferentes es usual hacerlo por medio de sus parámetros normalizados, que en última instancia son un cambio de escala. Para cada uno de los parámetros más comunes existe un parámetro normalizado.

Régimen de giro.

"Dada la gran diversidad de tipos y tamaños de motores alternativos, el rango de régimen de giro es muy amplio" (Lecuona & Rodríguez, 2011, pág. 50). Por ello para comparar dos motores dispares se lo realiza con la velocidad lineal media del pistón (c_m) entre puntos muertos, la cual indica qué tan rápido se están desplazando los pistones al interior del cilindro en función del régimen de giro y de la carrera del pistón. La velocidad lineal media del pistón viene dada por la siguiente expresión (Lecuona & Rodríguez, 2011, pág. 50):

$$\boldsymbol{c_m = 2.S.n}$$

Ecuación 1.7

Donde:

$\boldsymbol{S}$: La carrera del pistón (m).

$\boldsymbol{n}$: El régimen de giro (RPM).

Se observa que se puede dar el caso de que un motor que a pesar de girar a un régimen de revoluciones reducido pero con una gran carrera del pistón, puede presentar una mayor c_m que otro motor que gire a mayores regímenes, pero con una carrera del pistón más corta.

Torque.

Como idea generalizada se entiende que cuanto mayor sea el cilindraje de un motor mayor será el torque que éste pueda producir. Por lo tanto sería injusto comparar dos motores con una diferencia de cilindrada muy grande por el torque producido, puesto que como el cilindraje es el parámetro con mayor incidencia, el mayor torque lo producirá el motor más grande. Pero cabe entonces hacerse a siguiente pregunta: ¿Si se ignorara el

cilindraje, cuál de los dos motores sería mejor? Para responder a la pregunta anterior lo más indicado es comparar a los motores con un parámetro normalizado asociado al torque: la presión media efectiva (pme), que de acuerdo con Lecuona & Rodríguez, (2011) se puede hacer una analogía con la presión media indicada (pmi), definiéndola como una presión constante que durante la carrera de expansión produce un trabajo igual al trabajo efectivo. Se calcula por medio de la siguiente expresión (Rodríguez & Nogueira, 2011, pág. 961):

$$\boldsymbol{pme = T.2.\pi / V_T.i}$$

Ecuación 1.8

Donde:

$\boldsymbol{T}$: Torque producido por el motor $(N.m)$.

$\boldsymbol{V_T}$: Cilindrada total (m^3).

$\boldsymbol{i}$: Número de ciclos por revolución. Un ciclo completo comprende los cuatros tiempos característicos de un motor de combustión interna. En los motores de 2 tiempos el ciclo completo se realiza en tan sólo una revolución del motor, mientras que en los motores de 4 tiempos el ciclo se completa cada dos revoluciones. Es por tanto que $i = 1$ para los motores 2 tiempos e $i = 1/2$ para los motores 4 tiempos.

Potencia.

Como la potencia y el torque son dos parámetros que están estrechamente ligados, la explicación del por qué comparar dos motores de diferente cilindrada por su potencia no tiene sentido, es la misma que la dada para el torque.

El parámetro normalizado asociado a la potencia es la carga térmica o potencia por unidad de superficie del émbolo (N_{e_esp}). Se calcula por medio de la siguiente expresión (Rodríguez & Nogueira, 2011, pág. 961):

$$\boldsymbol{N_{e_esp} = {}^{4.p}/_{Z.\pi.D^2}}$$

Ecuación 1.9

Donde:

$\boldsymbol{N_{e_esp}}$: Carga térmica o potencia por unidad de superficie del émbolo.

$\mathbf{z}$: Número de cilindros.

$\boldsymbol{P}$: Potencia producida por el motor (W) .

$\boldsymbol{D}$: Diámetro del émbolo (m^2).

En la figura 1.3 y 1.4 se muestran nuevamente las curvas características de un motor G4ED de Hyundai, pero en función de sus parámetros normalizados tales como la presión media efectiva y la carga térmica respectivamente, versus la velocidad media del embolo obtenida por con el método de aceleración libre.

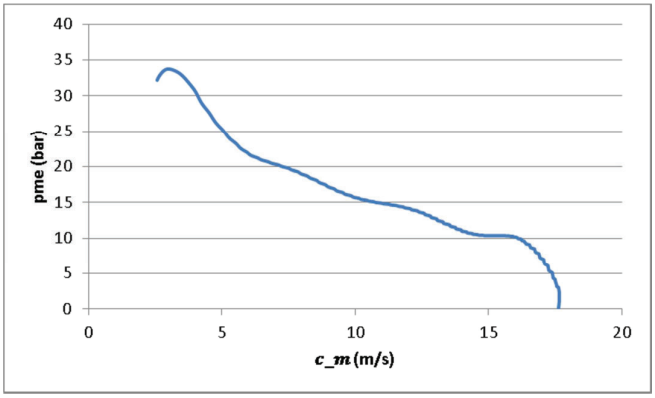

Figura. 1.3. Evolución de la presión media efectiva en función de la velocidad media del embolo de un motor G4ED de hyundai obtenida por el método de la aceleración libre.
(Fuente: Autores).

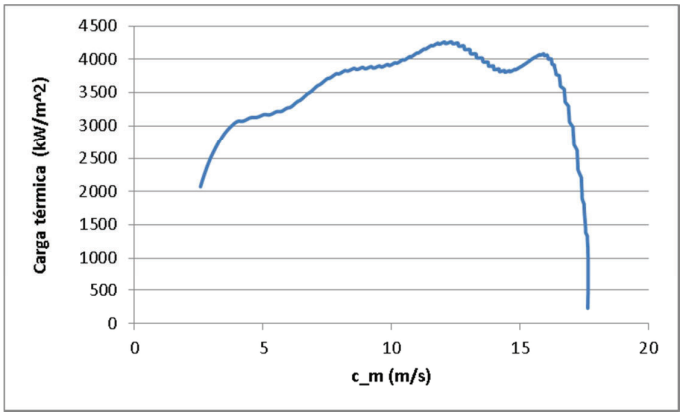

Figura. 1.4. Evolución de la carga térmica en función de la velocidad media del embolo de un motor G4ED de hyundai obtenida por el método de la aceleración libre.
(Fuente: Autores).

1.3 Desarrollo teórico del método.

La potencia efectiva en un motor se puede determinar con el método de aceleración libre a partir de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{P_e = I_m . \propto . w}$$

Ecuación 1.10

Donde:

$\boldsymbol{P_e}$: Potencia Efectiva (kW).

$\propto$: Aceleración Angular (rad/seg^2)

$\boldsymbol{w}$: Velocidad angular del motor (rad/seg)

$\boldsymbol{I_m}$: Momento de Inercia del Motor (kg/m^2)

Determinación del momento de inercia del motor $(\boldsymbol{I_m})$.

Este no es un parámetro que sea suministrado comúnmente por los fabricantes. A continuación se detalla una metodología probada que busca dar una medida del momento de inercia del motor en un motor específico.

Bermúdez & Tormos, (2011) definen la siguiente metodología para calcular el momento de inercia de un motor: Al llevar al motor a un determinado régimen de giro y cortarle de golpe el salto de la chispa del encendido, éste va a sufrir una desaceleración angular constante, debida al torque de pérdidas, hasta que se detenga completamente. El torque de pérdidas está definido por la siguiente ecuación:

$$T_{pm} = I_m * \alpha_1$$

Ecuación 1.11

Donde:

$\boldsymbol{T_{pm}}$: Es el torque de pérdidas mecánicas $(N.m)$.

$\boldsymbol{I_m}$: Momento de inercia del motor $(kg.m^2)$.

$\boldsymbol{\alpha_1}$: Tasa de desaceleración en la condición 1(rad/s^2).

Al motor se le puede agregar una masa con momento de inercia conocido (I_c) por medio de la polea en el eje del cigüeñal. Si se repite el mismo ciclo de desaceleración del motor se obtiene que el torque de pérdidas es:

$$\boldsymbol{T_{pm} = (I_m + I_c) * \alpha_2}$$

Ecuación 1.12

Donde:

$\boldsymbol{I_c}$: Momento de inercia conocido ($kg.m^2$).

$\boldsymbol{\alpha_2}$: Tasa de desaceleración en la condición 2 (rad/s^2).

Bermúdez & Tormos, (2011) indican que como el torque de pérdidas es constante, se pueden igualar las dos ecuaciones anteriores:

$$\boldsymbol{I_m * \alpha_1 = (I_m + I_c) * \alpha_2}$$

Ecuación 1.13

En donde tanto α_1 como α_2 son medibles y I_c es conocido. Entonces de la ecuación anterior es posible despejar el momento de inercia del motor (I_m):

$$\boldsymbol{I_m = \frac{I_c * \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}}$$

Ecuación 1.14

Determinación de la velocidad angular del motor $(\boldsymbol{\omega})$.

Con la señal del sensor CKP con que viene equipado el motor del vehículo se puede determinar la frecuencia instantánea a la que gira el motor y por tanto su velocidad angular. En términos generales los tipos de sensores CKP más comunes son los sensores inductivos y los sensores de efecto Hall, cuyo funcionamiento es distinto pero su finalidad es la misma: sensar el paso por el frente suyo de cada uno de los dientes de la rueda fónica montada en el eje del cigüeñal. Entonces si se obtiene una señal eléctrica por el paso de cada diente y si se conoce el número de dientes de la rueda fónica, se puede determinar la frecuencia instantánea de giro del motor. La frecuencia se mide en Hertz, los cuales en última instancia dan cuenta de la cantidad de veces que se repite un fenómeno en un segundo. En la práctica, aplicando el concepto al tema en cuestión, se puede medir la frecuencia en dientes por segundo:

$$F = \frac{n}{seg}$$

Ecuación 1.15

Donde:

$\boldsymbol{F}$: Frecuencia (Hz).

$\boldsymbol{n}$: Número de dientes que pasan frente al sensor.

Para calcular la velocidad angular del motor con base en la frecuencia de giro, se utiliza la siguiente expresión:

$$w = \frac{F}{N}$$

Ecuación 1.16

Donde:

$\boldsymbol{N}$: Número de dientes de la rueda fónica; es decir, número de dientes por revolución. Haciendo una verificación de las unidades se tiene:

$$\frac{\frac{Dientes}{Seg}}{\frac{Dientes}{Rev}} = \frac{Rev}{Seg} * \frac{60\ seg.}{1\ min} = \frac{Rev}{min}$$

Determinación de la aceleración angular del motor(α).

Se puede determinar una frecuencia de giro del motor para cada instante de tiempo mientras dure la prueba. Lo anterior permite tabular los datos de velocidad angular instantánea del motor para cada delta de tiempo. Teniendo en mente que la aceleración está definida como la razón de cambio de la velocidad en el tiempo, o lo que es lo mismo la derivada de la velocidad angular, entonces se puede determinar la aceleración angular instantánea del motor ($\propto_i$) con la siguiente expresión (Sepúlveda, 2016):

$$\propto_i = \frac{\boldsymbol{w_2 - w_1}}{\boldsymbol{t_2 - t_1}}$$

Ecuación 1.17

Donde:

$\propto_i$: Aceleración angular instantánea (rad/s^2).

$\boldsymbol{w_2}$: Velocidad angular en el instante 2 (rad/s^2).

$\boldsymbol{w_1}$: Velocidad angular en el instante 1 (rad/s^2).

$\boldsymbol{t_2}$: Instante 2 (s).

$\boldsymbol{t_1}$: Instante 1 (s).

2. METODOLOGÍA

A continuación se detallan la forma de cómo llevar a la práctica lo descrito en la sección anterior, para lo cual se define un vehículo de pruebas modelo y la forma de cómo implementar el método con desarrollos de hardware y software.

2.1. Selección de un vehículo de pruebas modelo.

Para el estudio y desarrollo del método se hace necesario tener un vehículo con un motor que tenga dispuesto un sistema de inyección electrónica.

Se selecciona un vehículo Hyundai Accent Verna año modelo 2002. Este vehículo contiene un sensor CKP de tipo inductivo, donde a continuación en la figura 2.1 se muestra el diagrama del fabricante con su conexión desde el sensor hasta la ECU y su ubicación en el motor mostrada en (b).

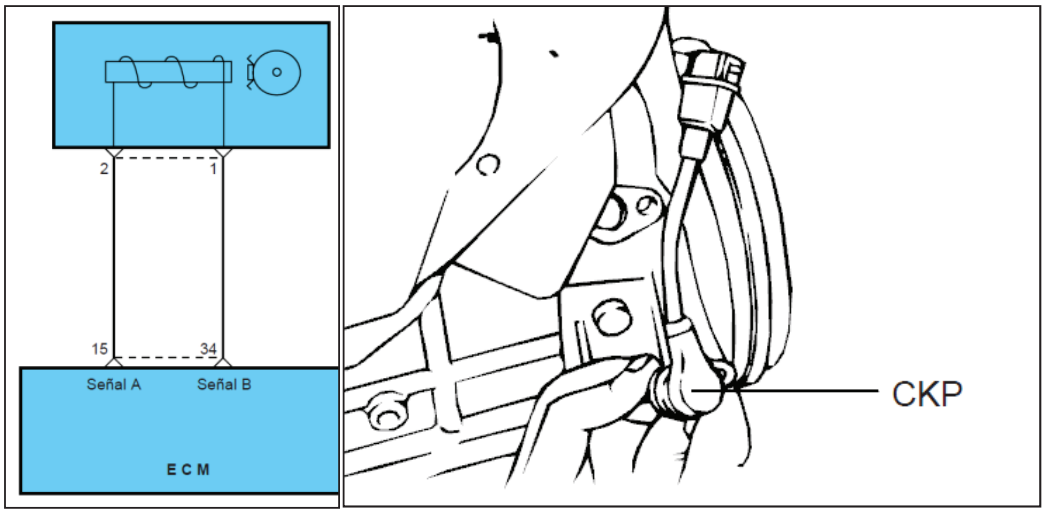

Figura. 2.1. Configuración del sensor CKP del vehículo de pruebas.
(Fuente: Manual de fabricante vehículo Hyundai Accent Verna.)

Los parámetros geométricos del motor necesarios para el desarrollo se detallan a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geométricos del motor G4ED de Hyundai.

Descripción	**Especificación**
Diámetro del pistón	0.0765m
Carrera del pistón	0.087m
Cilindrada total	0.001599m^3

(Fuente: Autores)

2.2. Metodología de toma de datos.

Se explica a continuación la metodología de toma de datos realizada.

1. Tomar registro de la temperatura y la presión del aire atmosférico.
2. Realizar la conexión del sensor de posición del cigüeñal del vehículo en análisis hasta el sistema de adquisición de datos diseñado para el efecto. Una vez enlazado a la señal del sensor de posición del cigüeñal, se ejecuta el software “AUDACITY”, desarrollado por Mazzoni & Dannenberg, (2000) que permite grabar un archivo de audio de esta señal mientras el motor este encendido.
3. Aplicar el protocolo de control de variables al motor en análisis.
4. Dar inicio a la toma de datos y con el motor en velocidad de ralentí abrir de manera súbita la aleta de aceleración por completo y mantenerla hasta que el motor llegue a su máximo régimen de giro. Una vez alcanzadas las máximas RPM posibles apagar el motor y mantener la aleta de aceleración a fondo hasta que se apague totalmente.
5. Con el archivo de audio generado y las pruebas respectivas procesar las curvas características del motor con el software diseñado para el efecto.
6. Se muestra en la figura 2.2 la toma de datos sobre el vehículo de pruebas seleccionado.

Figura. 2.2. Toma de datos sobre el vehículo de pruebas modelo.

2.3. Adquisición de datos del sensor de posición de cigüeñal - crankshaft position sensor (CKP).

Como se conoce, el sensor CKP mide la posición instantánea del giro del cigüeñal en sus distintos regímenes de funcionamiento de acuerdo al número de dientes que la rueda fónica disponga, pero se debe tener claro que no todas las marcas de vehículos utilizan un mismo método medición por lo que existen dos tipos de sensores ya sea de tipo inductivo o de efecto hall que son utilizados para la captación de giro del motor.

Ambos necesitan de una rueda dentada o rueda fónica para enviar la señal de posición a la unidad de control electrónico de motor ECU, y necesitan además uno o varios dientes

diferentes para marcar una vuelta de cigüeñal o la posición del pistón número 1 en el punto muerto superior según lo determine el fabricante.

Cualquiera que sea el caso, en ambos tipos de sensores ya sea inductivo o de efecto hall, estos tienen una variación de la frecuencia en la señal que entregan desde el sensor CKP hacia la ECU del motor cuando varíen las revoluciones del mismo, entonces como principio se toma la señal directamente desde el sensor sin afectar el normal funcionamiento del sistema de inyección electrónica aplicando la técnica de adquisición de datos con la tarjeta de sonido de un computador para obtener en esta etapa un archivo de audio .WAV, y en la siguiente etapa aplicar un posterior análisis con este archivo.

El motor en estudio cuenta con un sensor CKP de tipo inductivo, el cual genera un voltaje alterno; esta señal que se muestra en la figura 2.3., se toma con un osciloscopio de marca Hantek serie DSO3064 propiedad de los autores.

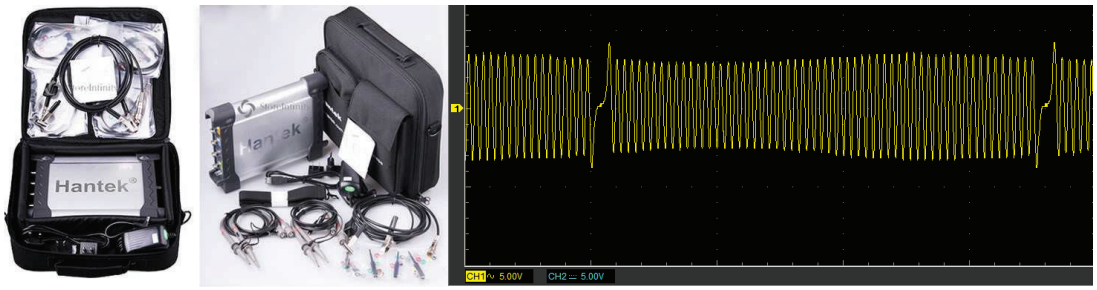

Figura. 2.3. Señal del Sensor CKP obtenida del vehículo de pruebas modelo.
(Fuente: Autores).

Se utiliza un circuito desarrollado en el software creado por Labcenter Electronics (Ltd, 1988), Proteus, el cual permite grabar la señal del sensor CKP en un archivo de audio de extensión .WAV con el puerto de micrófono de una computadora portátil.

El software Proteus permite realizar una simulación de lo que se va a realizar, para ello se ha colocado en el software un generador de voltaje alterno que simula la señal del sensor CKP, esto será de 10VAC a 1Khz y se conecta a la entrada del transformador, mientras que a la salida de este transformador se coloca un foco para cerrar el circuito el cual simula el ingreso al puerto de micrófono de la Computadora.

Adicional se coloca un osciloscopio virtual que medirá la señal de ingreso al transformador en el canal A y la señal de salida del transformador al canal B según se muestra en la figura 2.4.

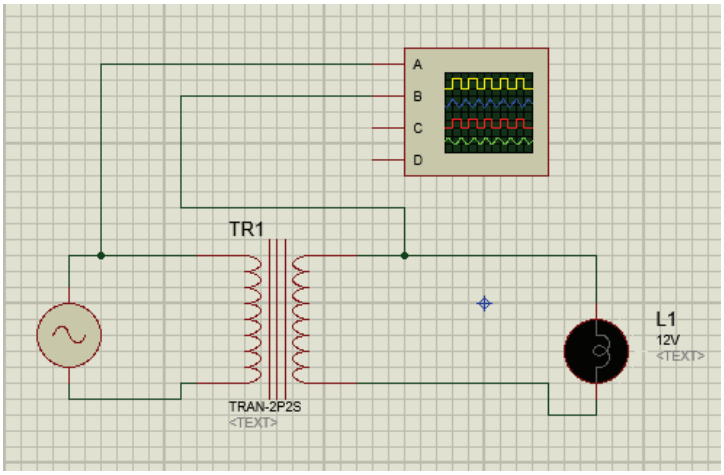

Figura. 2.4. Circuito desarrollado para captar la señal del sensor CKP.
(Fuente: Autores en software Proteus).

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.5 en el osciloscopio virtual. El canal A y B están configurados con un voltaje de 1VAC por división y un tiempo de 1ms. Se muestra de amarillo la señal del canal A correspondiente a la simulación del sensor CKP que genera 10VAC y de Azul la señal obtenida la cual registra una transformación en el voltaje a 1VAC y que este ingresará al puerto del micrófono de la PC.

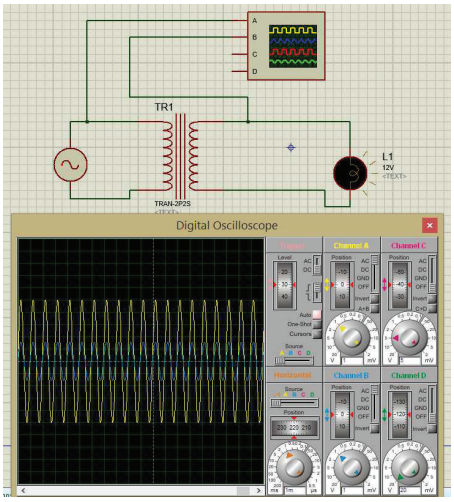

Figura. 2.5. Circuito simulado de forma virtual.
(Fuente: Autores en software Proteus).

Una vez construido el circuito, se hace necesario un conector de audio mono para el puerto de entrada de micrófono que se conectara a la computadora, un conector estéreo, y dos lagartos para la conexión al sensor, como se muestra en la figura 2.6.

Figura. 2.6. Conectores necesarios para la adquisición de datos.
(Fuente: Autores).

Lo que se obtiene con el osciloscopio al conectar la señal del sensor al transformador con el motor en ralentí es que el voltaje pico pico (Vpp) del sensor puede alcanzar los 10VAC mientras que al otro lado del transformador se tendría un Vpp de alrededor de 1VAC lo cual se ingresa como señal al puerto de la tarjeta de audio de la computadora, esto demuestra que lo simulado corresponde con los datos reales obtenidos.

En la figura 2.7 se ve que el canal 1 y 2 del osciloscopio se encuentran configurados en Voltaje Alterno (VAC) para su adquisición en un voltaje por división de 5VAC para ambos canales. El tiempo de adquisición calibrado es de 10ms por división. De azul se muestra la señal de entrada al transformador y de amarillo se muestra la señal de salida que será la que se va a grabar por el puerto del micrófono.

Con esta adecuación a la señal del sensor inductivo del vehículo de pruebas seleccionado podría ser conectado directamente a través del puerto de micrófono para poder grabar dicha señal y aplicar la metodología sin causar ningún problema eléctrico que pueda dañar la tarjeta de sonido del computador.

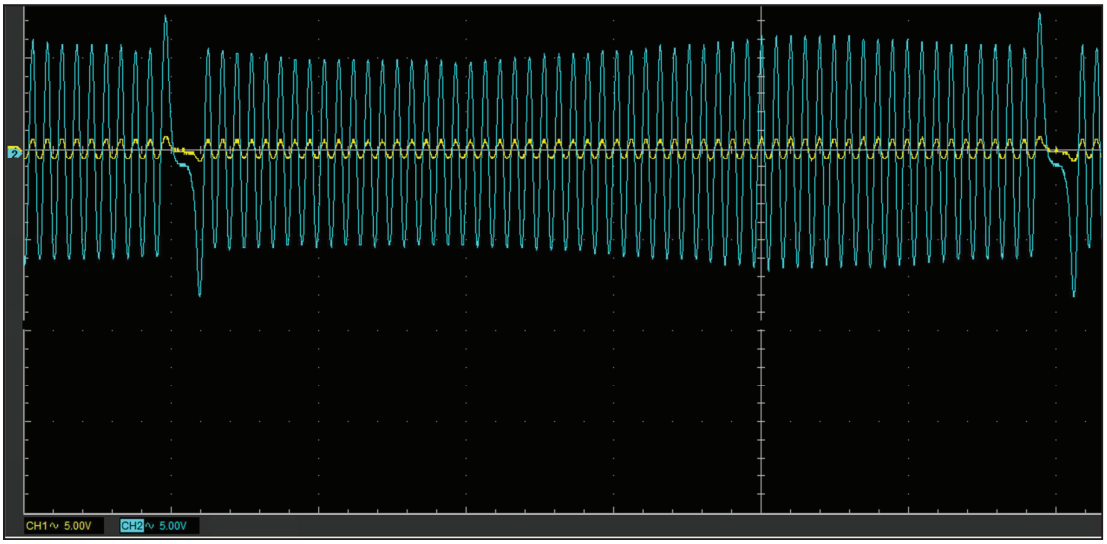

Figura. 2.7. Forma de onda obtenida del sensor inductivo y transformador.
(Fuente: Autores).

Para la adquisición de datos, se procede a conectar el dispositivo de adquisición de datos al sensor CKP, según como se ilustra en la figura 2.8, y su configuración a la computadora utilizada para el procesamiento de datos mostrada en la figura 2.9.

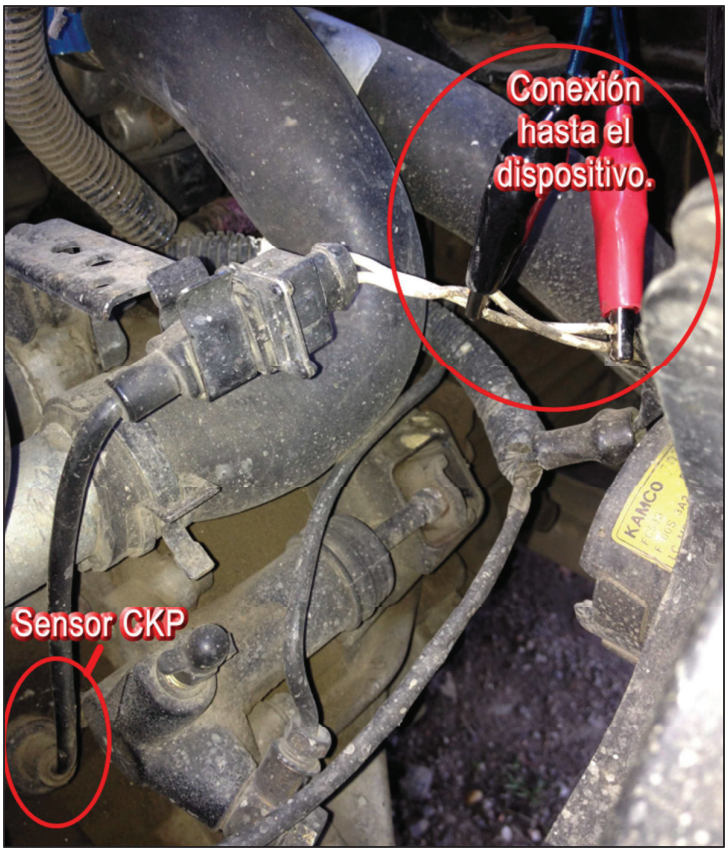

Figura. 2.8. Conexión al vehículo del dispositivo de adquisición de datos.
(Fuente: Autores).

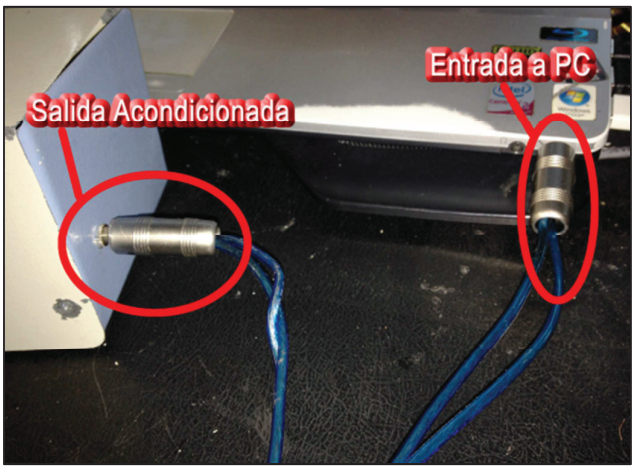

Figura. 2.9. Conexión al vehículo del dispositivo de adquisición de datos.
(Fuente: Autores).

Una vez desarrollado este circuito para este tipo de sensor, la adquisición de la señal se la realiza por el puerto de micrófono de la computadora, y utilizando un software de grabación de audio se realiza la adquisición de la señal. En este caso se utilizó una versión gratuita del software Audacity de Mazzoni & Dannenberg, (2000), la cual permite calibrar la frecuencia de adquisición de la señal y demás graduaciones como el nivel de volumen y tipo de archivo de grabación; con este software una vez realizada la adquisición, permite generar un archivo de extensión .WAV de la prueba realizada para su posterior análisis en la siguiente etapa.

A continuación se muestra en la figura 2.10 el software mencionado con una prueba de grabación.

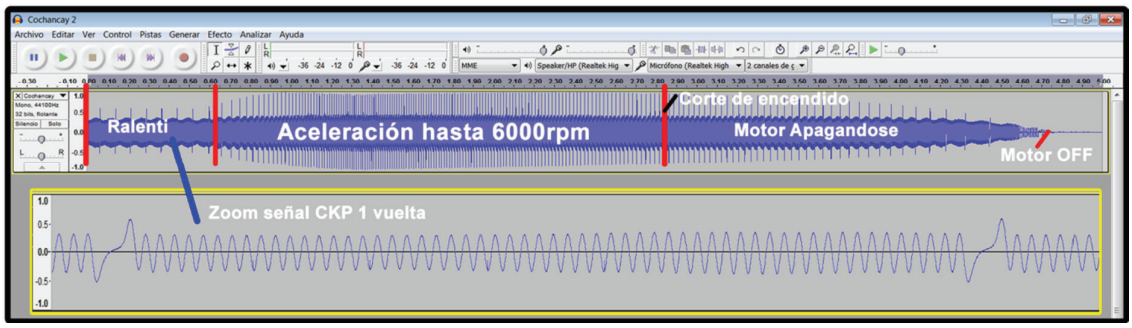

Figura. 2.10. Software utilizado para la grabación de las pruebas.
(Fuente: Autores en software Audacity).

2.4. Procesamiento de datos y desarrollo del software.

En esta etapa, la señal obtenida del sensor CKP a través de audio pasará a formar parte de una serie de adecuaciones hasta llegar a convertirse en los datos instantáneos de

velocidad angular y aceleración angular del motor. Para ello se desarrolló un software utilizando como base labview de National Instruments, (1986) y matlab de Moler, (1984), el cual permite aplicar los cambios sobre el archivo de audio de extensión .WAV grabado en la etapa anterior. A continuación se muestra los pasos a seguir para el procesamiento de los datos, junto con el desarrollo del software.

Procesamiento de datos para la obtención de velocidad angular y aceleración angular.

Para obtener las curvas características del motor mediante el software, se siguió paso a paso el procedimiento siguiente.

1. Cargar archivo de audio de la Señal del CKP.
2. Determinar el tiempo de cada ciclo de la señal del sensor CKP.
3. Obtener la frecuencia de cada ciclo de la señal del sensor CKP.
4. Obtener la velocidad de giro del motor en RPM y posteriormente en rad/seg.
5. Obtener la aceleración angular aplicando la derivada a la velocidad angular.
6. Cálculo del torque del motor.
7. Cálculo de la potencia del motor.
8. Cálculo de la velocidad media del pistón.
9. Cálculo de la presión media efectiva.
10. Cálculo de la carga térmica del motor.

Cargar archivo de audio de la Señal del CKP.

El software desarrollado cuenta con una interface, que permite cargar uno o dos archivos de audio generados. En la figura 2.11 se muestra el entorno para cargar dos archivos simultáneamente que permiten hacer comparativas: se ha cargado una prueba realizada cerca del nivel del mar (110m.s.n.m.) y otra prueba realizada a 3635 m.s.n.m., donde además se deberá ingresar los demás parámetros mostrados para obtener las curvas características.

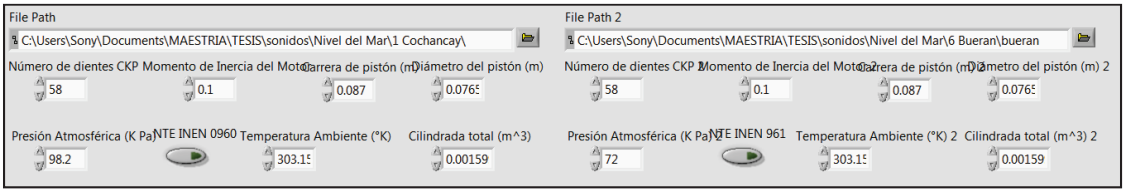

Figura. 2.11. Entorno de software de procesamiento de datos.
(Fuente: Autores).

La programación realizada en el Labview (National Instruments, 1986) que permite esto se muestra encerrada en la zona 1 de la figura 2.12. Esto permite buscar en las diferentes carpetas de archivos del computador el sonido grabado previamente e ingresarlo al software para su posterior tratamiento. Es importante recalcar que se trabajará solo con un archivo de tipo WAV para el procesamiento de datos.

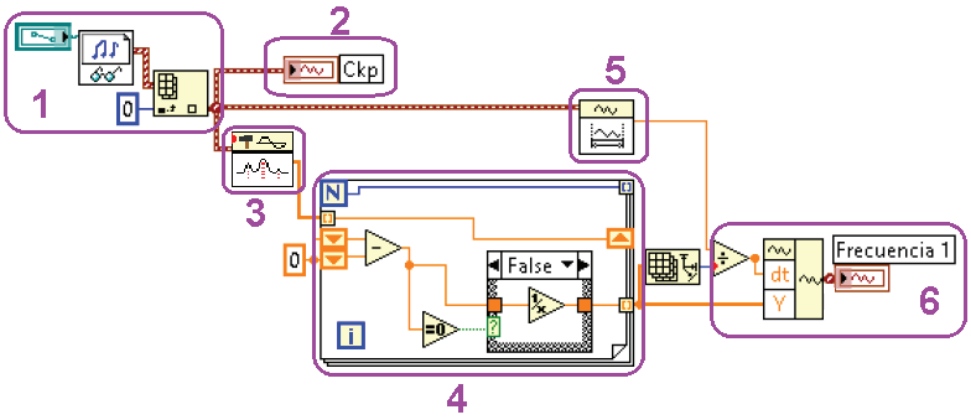

Figura. 2.12. Código del software para cargar archivos y determinar frecuencia.
(Fuente: Autores).

El comando encerrado en la zona 2 de la figura 2.12 es el que permite la visualización en el software de la señal mostrada en la figura 2.13, donde en a) se muestra su entorno más amplio que representa toda la prueba, y en b se aplica un zoom para cada señal en una zona cualquiera de una vuelta del cigüeñal, donde se nota además que se detecta el diente más ancho de la rueda fónica para el sensor CKP.

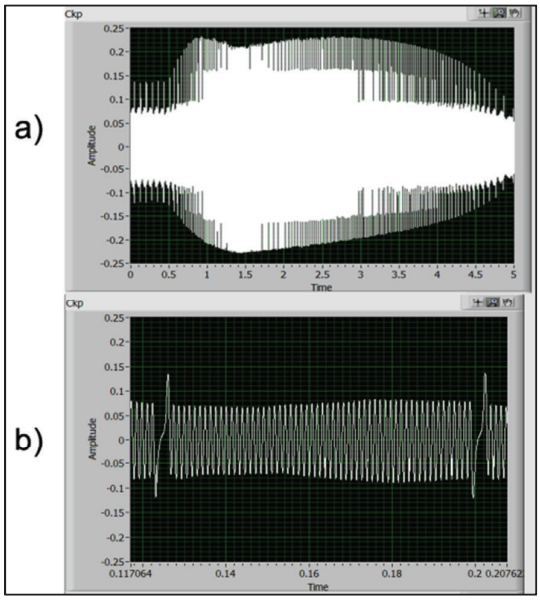

Figura. 2.13. Archivos de audio WAV cargados al software.
(Fuente: Autores).

Determinar el tiempo de cada ciclo de la señal del sensor CKP.

La estrategia utilizada en la programación para determinar el tiempo de cada ciclo (o sea el tiempo transcurrido entre el paso de un diente y el siguiente frente al sensor CKP) es registrando el instante en el que se presentan cada uno de los picos de voltaje presentes en la señal que se visualiza en la figura 2.13. El comando que permite esto es el encerrado en la zona 3 de la figura 2.12. Así mismo es necesario tomar la medición del tiempo total que dura la prueba, lo cual se logra por medio del comando encerrado en la zona 5 de la figura 2.12.

Obtener la frecuencia de cada ciclo de la señal del sensor CKP.

Tomando el delta de tiempo entre pico y pico de voltaje se conoce el periodo para cada instante. Luego con su recíproco se obtiene la frecuencia instantánea de la señal mediante el software. Se logra esto a través del arreglo encerrado en la zona 4 de la figura 2.12, el cual adicionalmente se encarga de almacenar en una matriz un par ordenado: por cada instante, un valor de frecuencia. Para visualizar en el software la evolución de la frecuencia de la señal en el tiempo, se desarrolló el comando encerrado en la zona 6 de la figura 2.12. En la figura 2.14, se muestra la adquisición de la frecuencia obtenida en el tiempo expresada en Hz. Se aprecia que para una prueba en particular, parte desde el ralentí en un valor aproximado de unos 800Hz, y cuando se realiza una aceleración rápida del motor se obtiene aproximadamente hasta unos 6.5kHz, y en este instante es donde se apaga el motor y el sensor capta hasta que se detiene por completo. La prueba completa tarda 5seg.

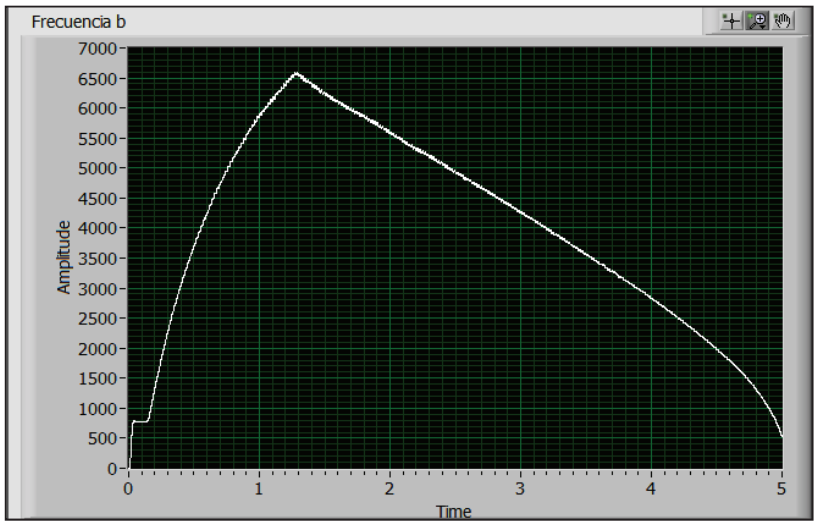

Figura. 2.14. Adquisición de la frecuencia (Hz) en el tiempo.
(Fuente: Autores).

Obtener la velocidad de giro del motor en RPM y posteriormente en rad/seg.

Para obtener la velocidad angular en rpm, la frecuencia obtenida se debe dividir por el número de dientes que tiene el sensor y multiplicarlo por 60. Adicionalmente también se debe realizar la conversión a rad/seg multiplicando los datos obtenidos de rpm, por $\pi/30$, esto se hace para poder aplicar las ecuaciones correspondientes de potencia y torque.

En la figura 2.15 se observa el desarrollo del software que permite la determinación tanto de la velocidad del motor en RPM como en rad/s: se toma la frecuencia de la señal (zona 6) y se divide por el número de dientes del sensor CKP y se multiplica por 60 (zona 7). El resultado de esto da la evolución de la velocidad angular (RPM) en el tiempo, cuya gráfica se muestra en la figura 2.16 a). El comando que permite la visualización de esta gráfica se encuentra encerrado en la zona 8 de la figura 2.15.

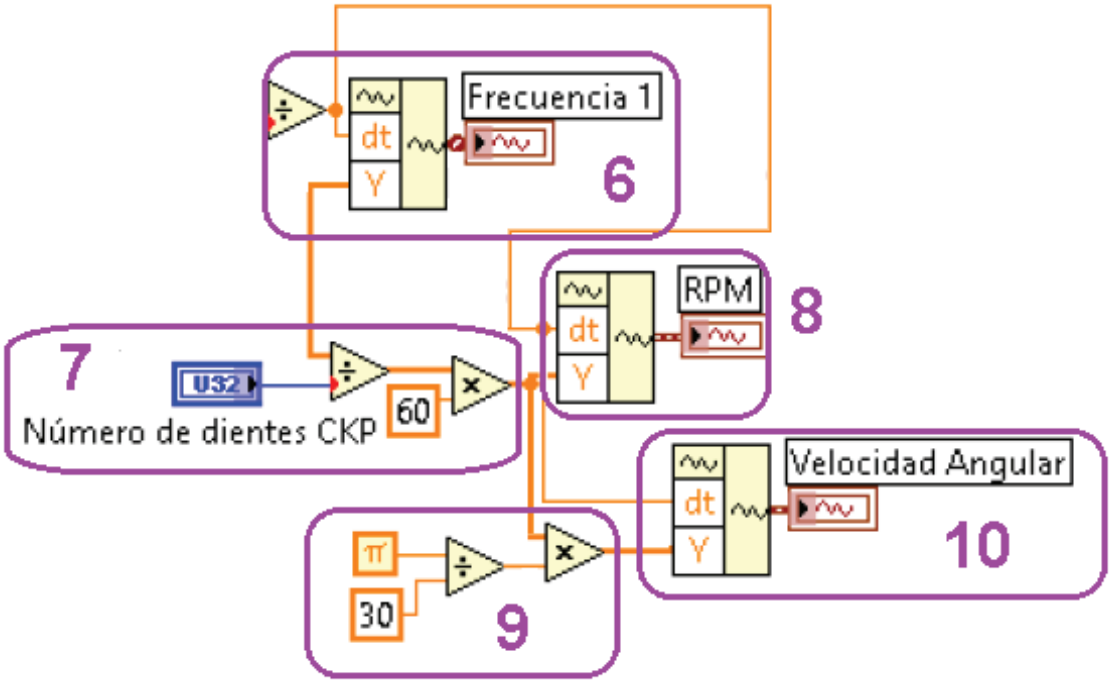

Figura. 2.15. Código del software para calcular la velocidad angular.
(Fuente: Autores).

Para el cálculo de la velocidad angular del motor expresada en rad/s se toma la velocidad angular en RPM (zona 8 de la figura 2.15) y se multiplica por $\pi/30$ (zona 9 de la figura 2.15). En la figura 2.16 b) se observa la evolución de la velocidad angular (en rad/s) en el tiempo. La programación que permite su visualización es la encerrada en la zona 10 de la figura 2.15.

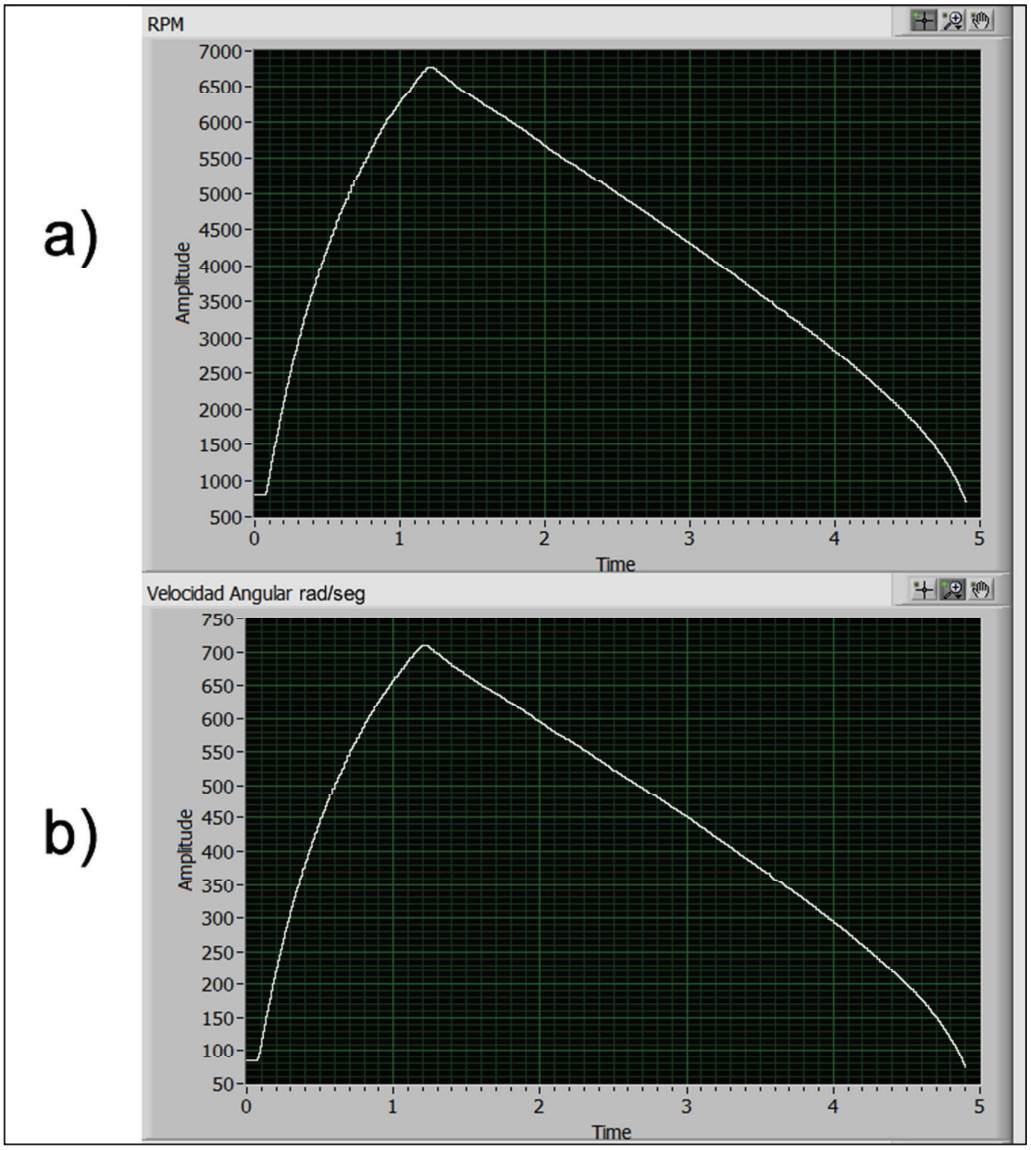

Figura. 2.16. Escalamiento de la velocidad angular a rpm y rad/seg.
(Fuente: Autores).

Obtener la aceleración angular aplicando la derivada a la velocidad angular.

Para la derivación de la señal de la velocidad angular en rad/s, el software desarrollado utiliza la programación mostrada en la figura 2.17: Se toma la señal de la velocidad angular en rad/s (zona 10) y se ingresa al algoritmo encerrado en la zona 11, el cual se encarga de hacer la derivación de la señal. Este algoritmo tiene la particularidad de haber sido importado desde el MATLAB (Moler, 1984), lo que representa una ventaja para la programación en LabView (National Instruments, 1986). Finalmente, el comando encargado de generar la gráfica de la evolución de la velocidad angular del motor en el tiempo es el encerrado en la zona 12 de la figura 2.17.

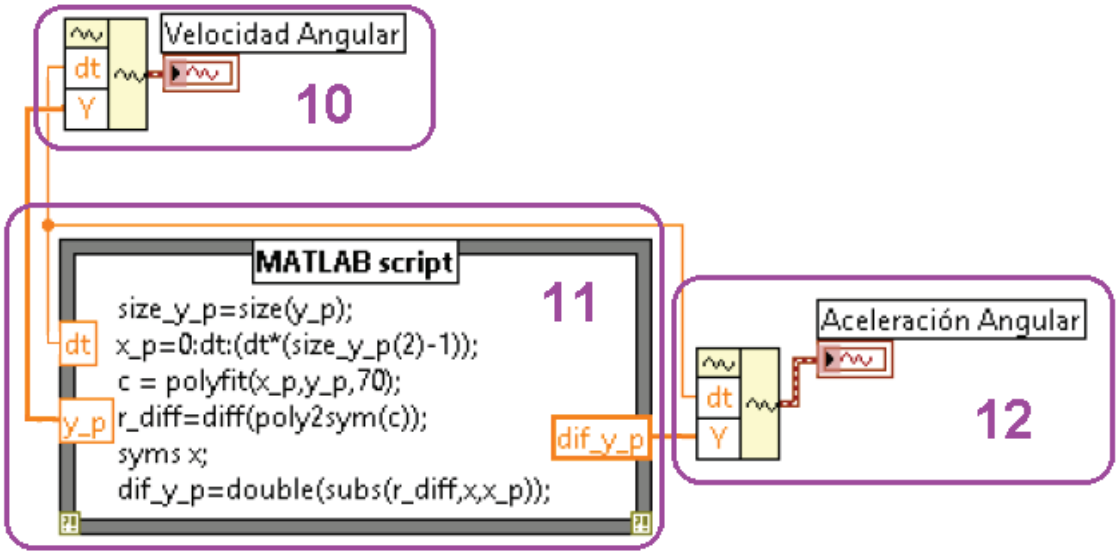

Figura. 2.17. Código del software para calcular la aceleración angular.
(Fuente: Autores).

La evolución de la aceleración angular del motor se muestra como resultado del software en la figura 2.18.

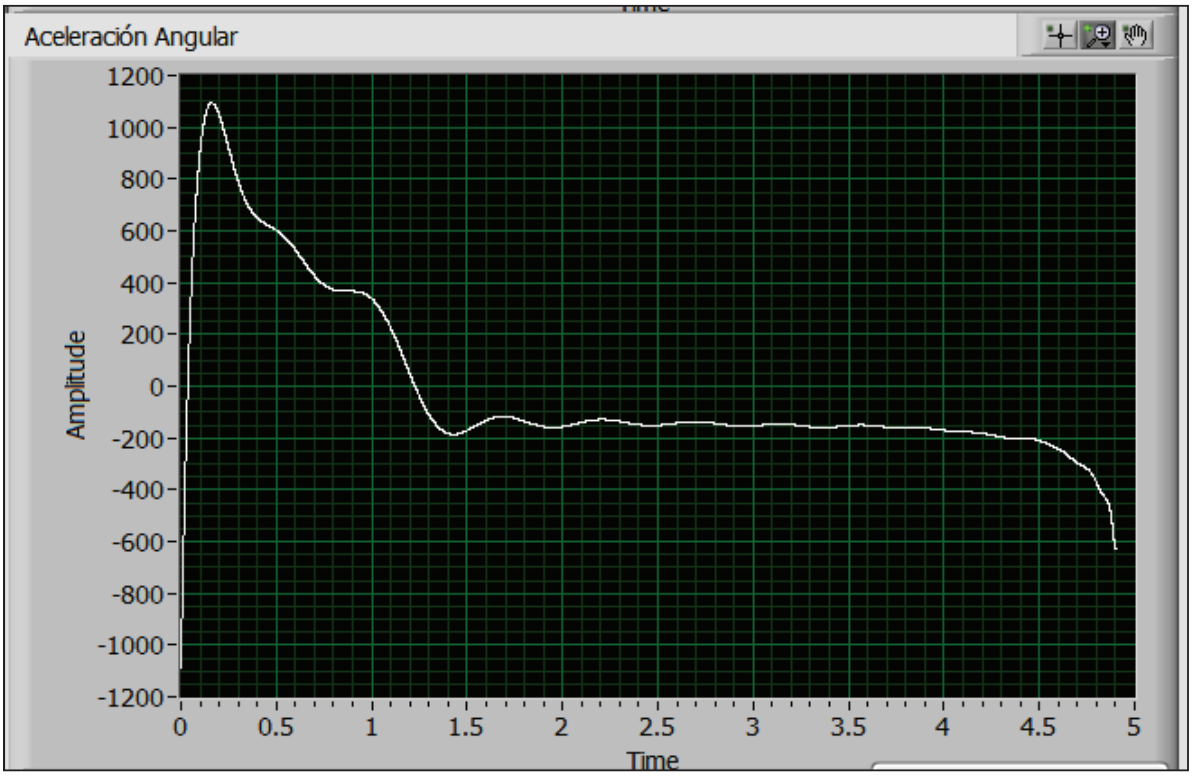

Figura. 2.18. Perfil de aceleración angular obtenida para ambos archivos cargados.
(Fuente: Autores).

Cálculo del torque del motor.

En la figura 2.19 se muestra la programación utilizada en el software para el cálculo del torque del motor: por un lado se toma la señal de la aceleración angular (zona 12) y se multiplica por el momento de inercia del motor (zona 13) que se puede ingresar manualmente a través de la interface desarrollada. Luego este producto se le ingresa, junto a la señal de la velocidad angular del motor en RPM (zona 8), al comando encerrado en la zona 14; este último se encarga de generar un par ordenado que asocia a cada valor de RPM un valor de torque.

Es de resaltar que para cada instante de tiempo hay asociada una velocidad angular en RPM (figura 2.14 a)), lo que constituye una función adicional para el comando encerrado en la zona 14: hacer un cambio de escala en el eje x, en el cual ya se no visualiza el tiempo, sino la velocidad angular para cada instante.

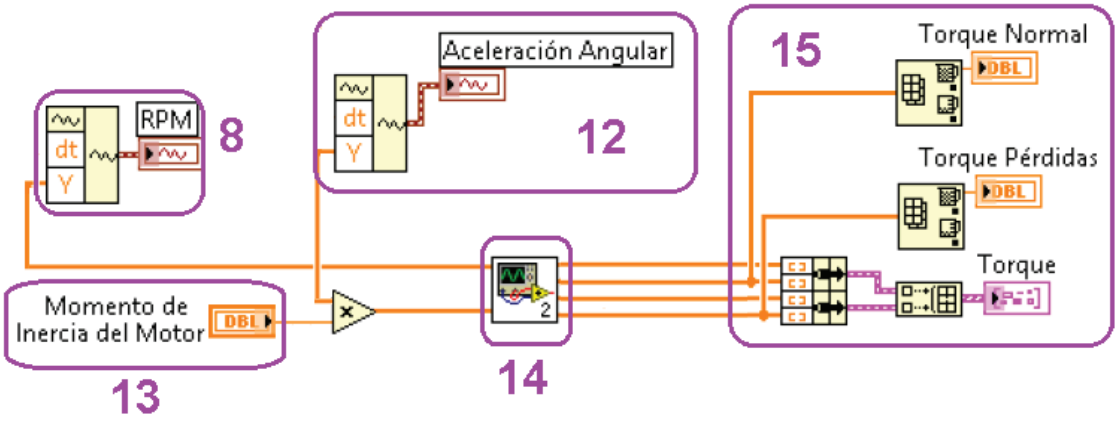

Figura. 2.19. Código del software para calcular el torque del motor.
(Fuente: Autores).

El comando encerrado en la zona 15 de la figura 2.19 es el encargado de permitir la visualización de resultados de la figura 2.20, en la que se puede apreciar la evolución del torque en N.m del motor en función de su velocidad angular en RPM.

Para visualizar los resultados en la siguiente figura se ha colocado un momento de inercia con un valor de 0,1 $kg.m^2$. Este valor jusfica más adelante como resultado del desarrollo pràctico para obtener el momento de inercia del motor.

Con este valor de momento de inercia, en una prueba en particular se muestra que se tiene un torque máximo de ente 72N.m @ 1800rpm.

Tambien se muestra el torque de perdidas mecánicas graficado de color rojo, se muestra que este torque de perdidas es constante en el regimen de desaceleración del motor.

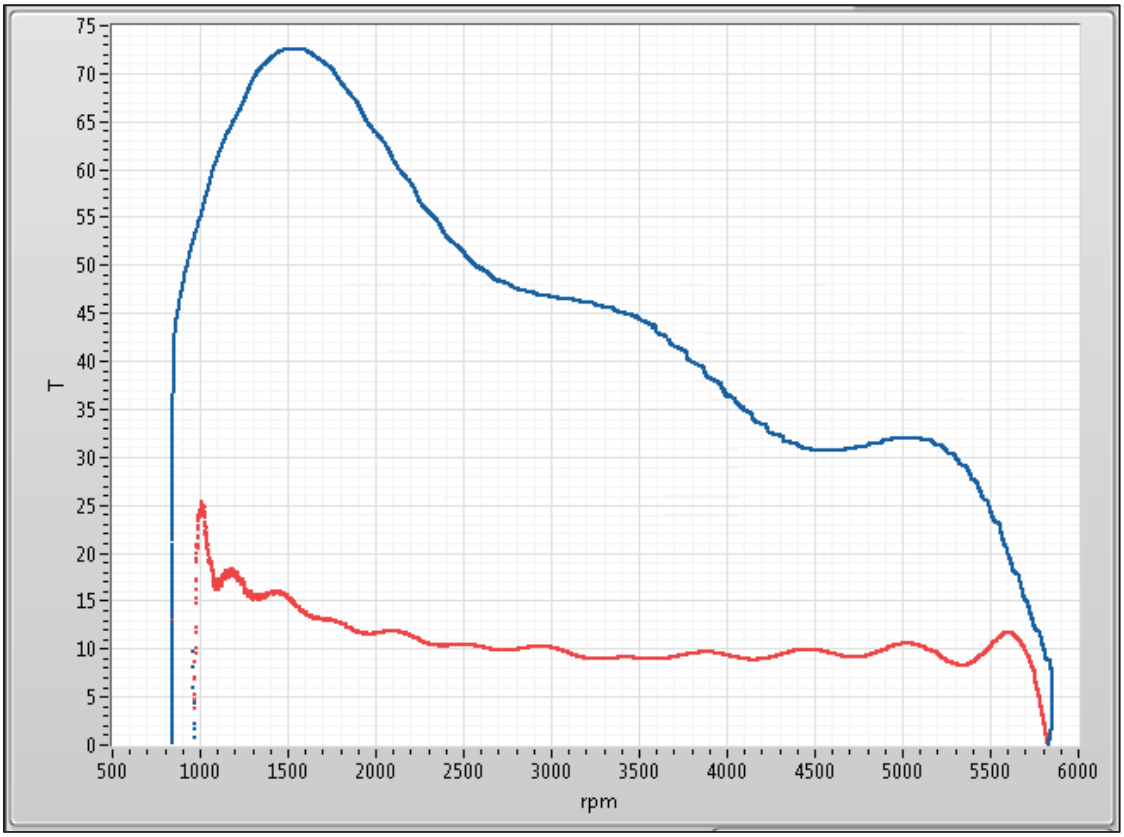

Figura. 2.20. Evolución del torque del motor en función de la velocidad angular.
(Fuente: Autores).

Cálculo de la potencia del motor.

De manera análoga al cálculo del torque del motor, la programación utilizada para el cálculo de la potencia (figura 2.21) toma la señal de la aceleración angular (zona 12), la multiplica por el momento de inercia del motor (zona 13) y por la velocidad angular (zona 10).

En la zona 16 se puede apreciar lo operadores matemáticos utilizados. Se observa que el total de estas multiplicaciones se divide por 1000 con el objetivo de presentar los resultados de la potencia en kW.

Al comando encerrado en la zona 14 se ingresa la señal de la potencia y de la velocidad angular en RPM, el cual cumple la misma función que la realizada en la programación para calcular el torque.

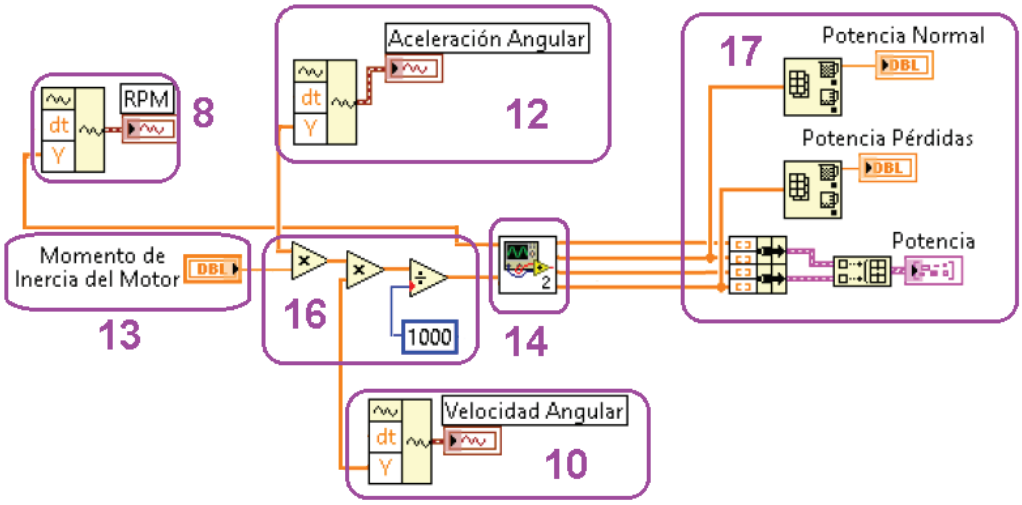

Figura. 2.21. Código del software para calcular la potencia del motor.
(Fuente: Autores).

Finalmente el comando encerrado en la zona 17 de la figura 2.21 es el que permite la visualización, en el software desarrollado, de la evolución de la potencia en función de la velocidad angular del motor, la cual se puede observar en la figura 2.22.

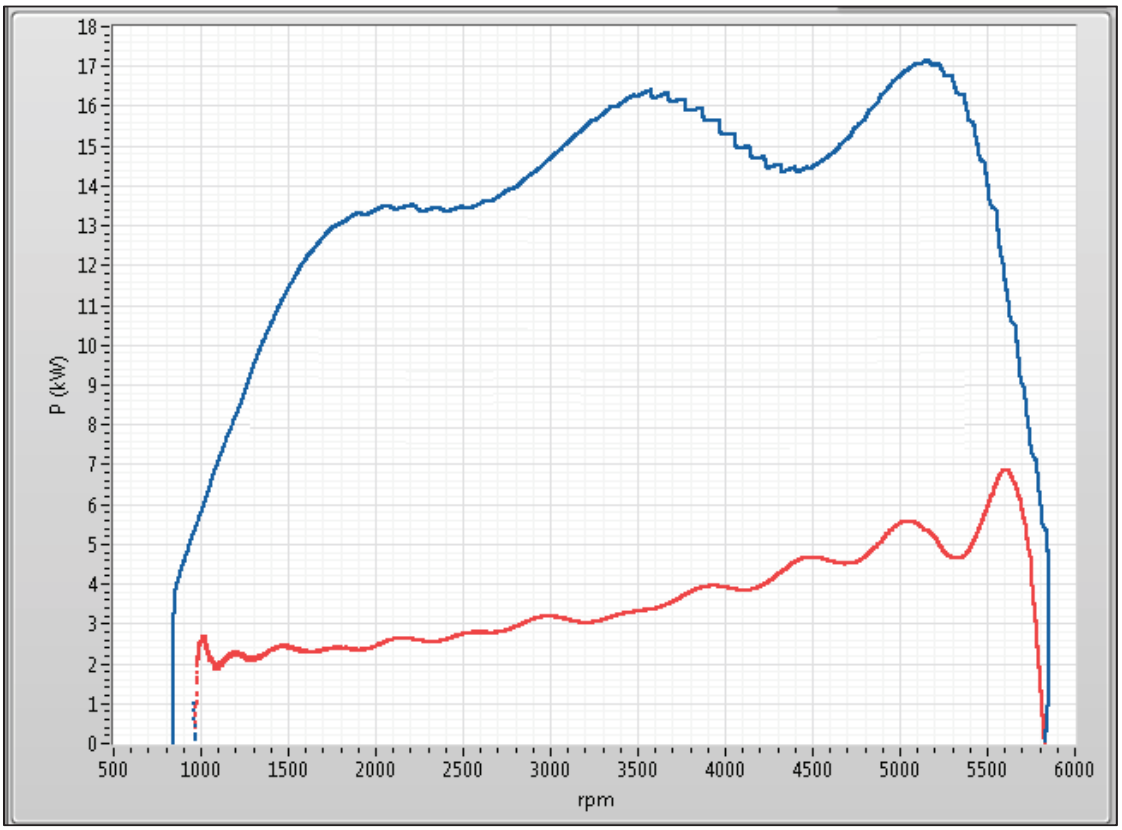

Figura. 2.22. Evolución de la potencia del motor en función de la velocidad angular.
(Fuente: Autores).

Cálculo de la velocidad media del pistón.

Para obtener las curvas normalizadas, lo primero que se requiere es conocer la velocidad media del pistón (c_m). Para ello la programación utilizada es la presentada en la figura 2.23, donde se toma la velocidad angular del motor (zona 8) y se multiplica por dos veces la carrera del pistón (zona 18). La carrera del pistón se puede introducir manualmente a través de la interface desarrollada.

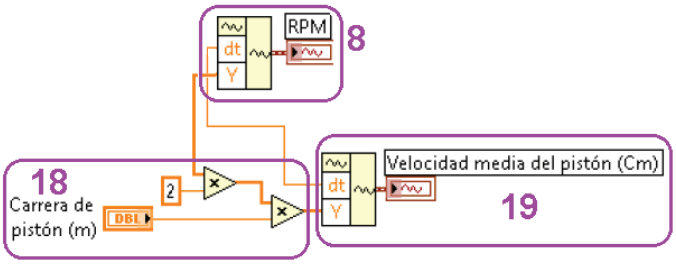

Figura. 2.23. Código del software para calcular la velocidad media del pistón.
(Fuente: Autores).

Cálculo de la presión media efectiva.

De manera muy similar al desarrollo hecho para calcular el torque del motor, se observa en la figura 2.24 la programación para el cálculo de la presión media efectiva del motor: en este caso se toma la señal del torque (zona 15) para multiplicarla por 4π y dividirla por la cilindrada total; adicionalmente se divide por 100000 para presentar la presión media efectiva en Bares y no en Pascales.

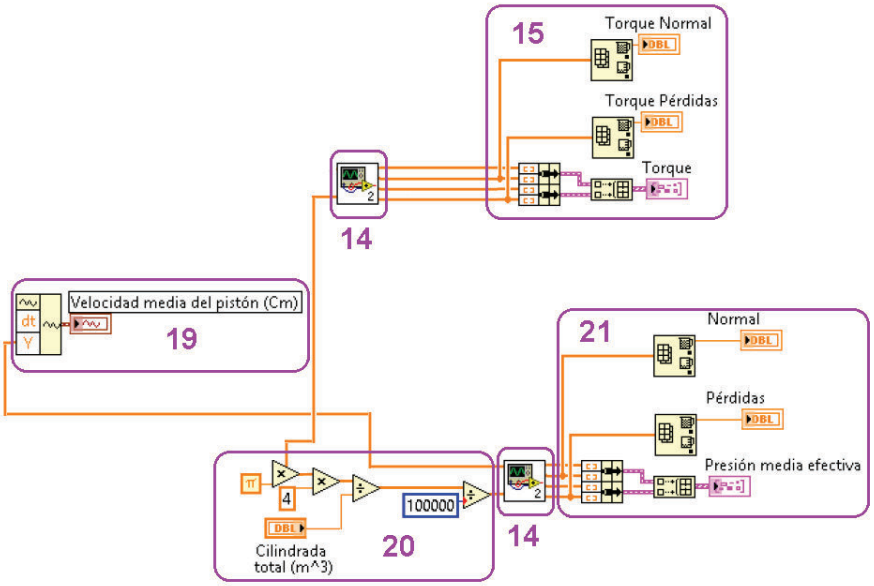

Figura. 2.24. Código del software para calcular la presión media efectiva.
(Fuente: Autores).

Al comando encerrado en la zona 14 se le ingresan tanto la señal de la presión media efectiva como la señal de la velocidad media del pistón. Este comando es el mismo utilizado antes y se encarga de generar un par ordenado que asocia a cada valor de velocidad media del pistón un valor de presión media efectiva.

El comando encerrado en la zona 21 de la figura 2.24 es el encargado de graficar en el software la evolución de la presión media efectiva en función de la velocidad media del pistón. Dicha gráfica se presenta en la figura 2.25.

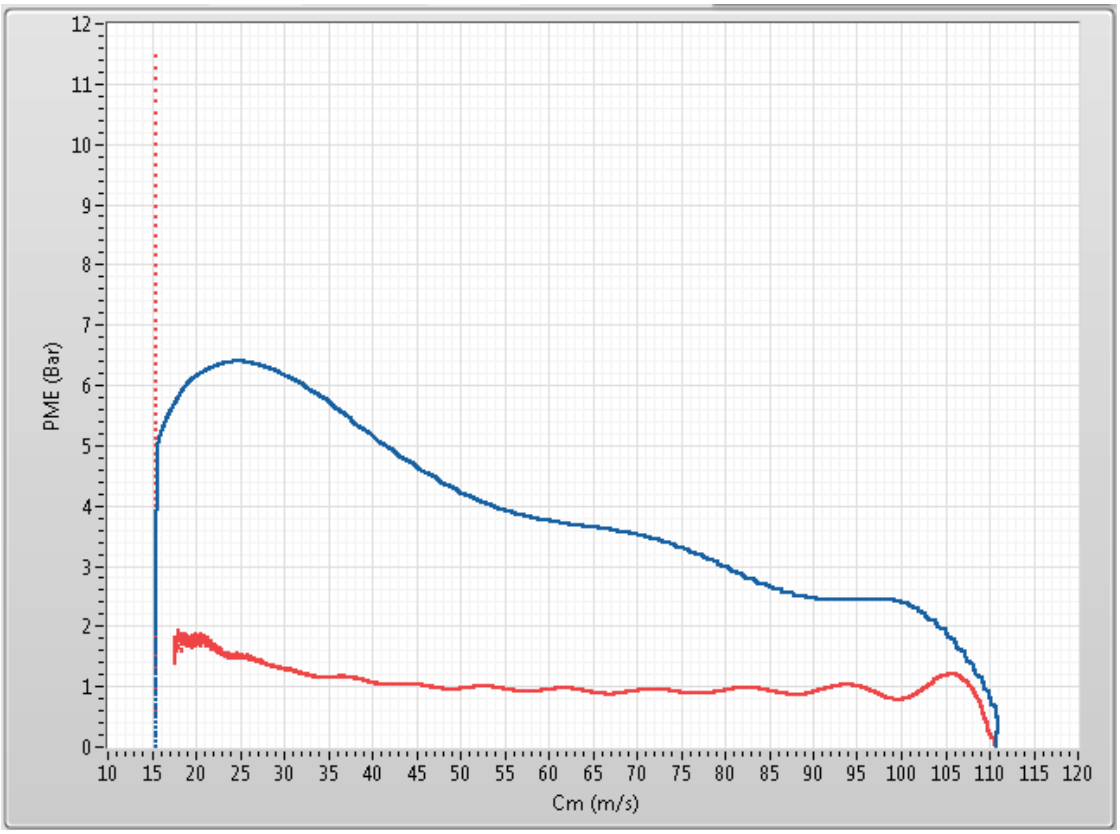

Figura. 2.25. Evolución de la presión media efectiva en función de la velocidad media del pistón. (Fuente: Autores)

Cálculo de la carga térmica del motor.

Para el cálculo de la carga térmica del motor la programación utilizada se muestra en la figura 2.26. Se toma la señal de la potencia (zona 17) y se multiplica por 4 para luego ser dividida por π veces el diámetro del pistón al cuadrado por el número de cilindros del motor (zona 22). Se ingresa este resultado, junto con la señal de la velocidad media del pistón, al comando encerrado en la zona 14 para su procesamiento.

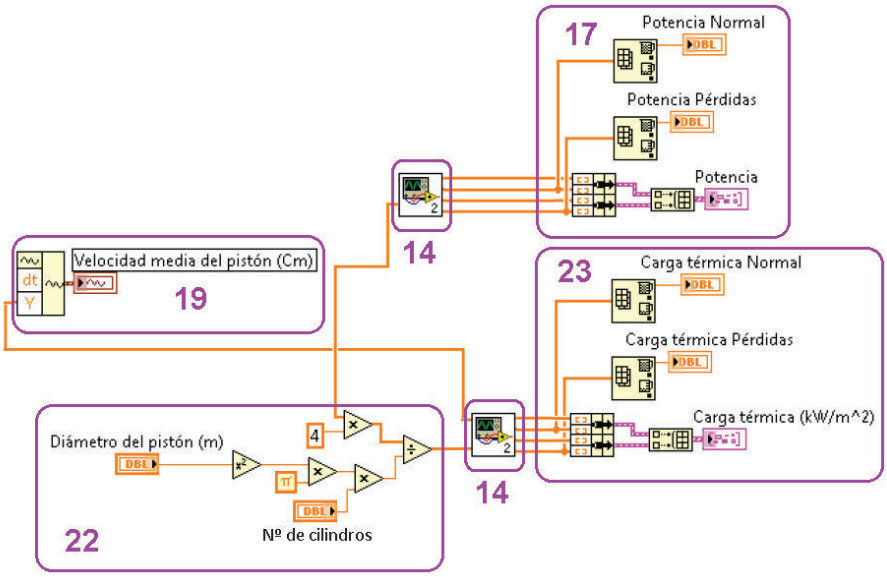

Figura. 2.26. Código del software para calcular la carga térmica normal.
(Fuente: Autores).

El comando encerrado en la zona 23 de la figura 2.26 es el encargado de graficar en el software la evolución de la carga térmica del motor en función de la velocidad media del pistón (figura 2.27).

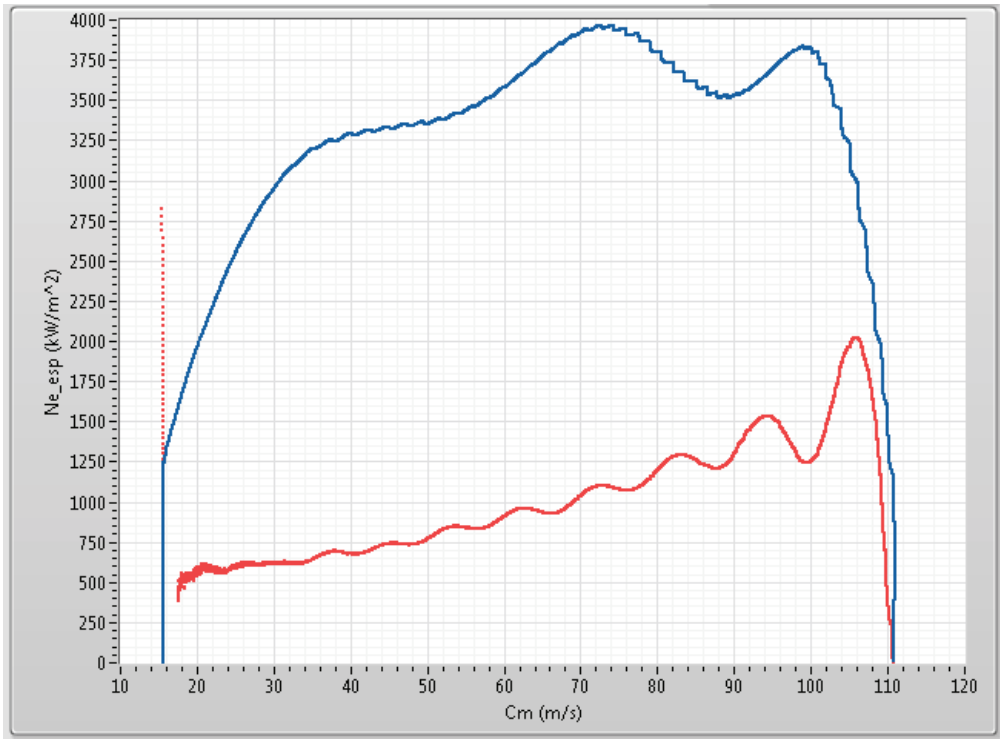

Figura. 2.27. Evolución de la presión media efectiva en función de la velocidad media del pistón.
(Fuente: Autores).

Cabe recordar que los parámetros del motor necesarios para calcular la velocidad media del pistón, la presión media efectiva y la carga térmica normal, es posible ingresarlos al software a través de la interface desarrollada. En la figura 2.28 se muestra dicha interface.

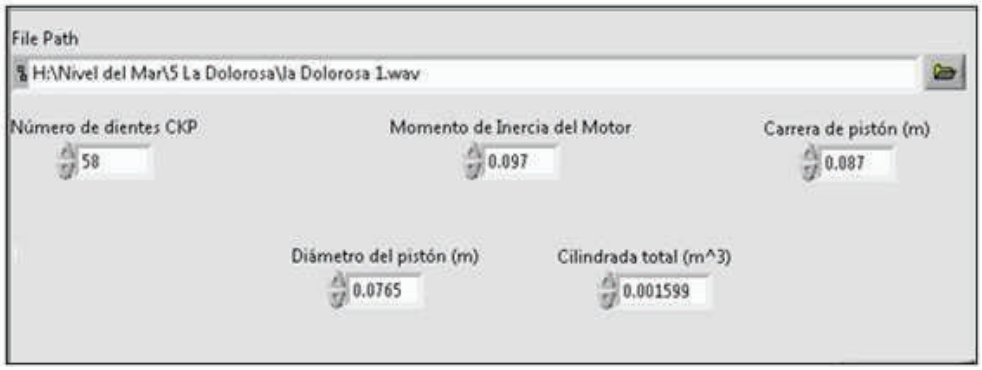

Figura. 2.28. Parámetros que se deben ingresar al software.
(Fuente: Autores).

2.5. Determinación del momento de inercia del motor: adición de una masa con momento de inercia conocido al eje del cigüeñal.

Si bien ya están definidas las ecuaciones por medio de las cuales se puede calcular el momento de inercia del motor, no se ha descrito aún cómo se determinó el momento de inercia de la masa conocida que se le adicionó al motor ni cómo medir en la práctica las respectivas desaceleraciones del motor. A continuación se muestra la manera como se determina el momento de inercia de la masa que se adiciona al motor y la manera como se determinan las respectivas desaceleraciones.

Determinación del momento de inercia de la masa que se le adiciona al motor.

Para el diseño y fabricación de dicha pieza sólo se tiene en cuenta: el cómo fijarla a la polea motriz del alternador que está montada sobre el eje del cigüeñal, el no añadir demasiada carga a su respectiva chaveta para evitar cualquier daño inesperado y el espacio físico del que se dispone para su montaje. En la figura 2.29 se muestra la pieza ya fabricada y la forma en la que se fija a la polea. Se muestra la pieza horizontalmente y la polea verticalmente.

Figura. 2.29. Polea de accesorios y masa diseñada.
(Fuente: Autores)

Nótese en la figura 2.30 que la pieza cuenta con una manzana cuya cara frontal va apoyada en la polea en la zona de la chavetera y con un tope que coincide con el diámetro interior de la polea con el objetivo de que ambos cuerpos sean concéntricos.

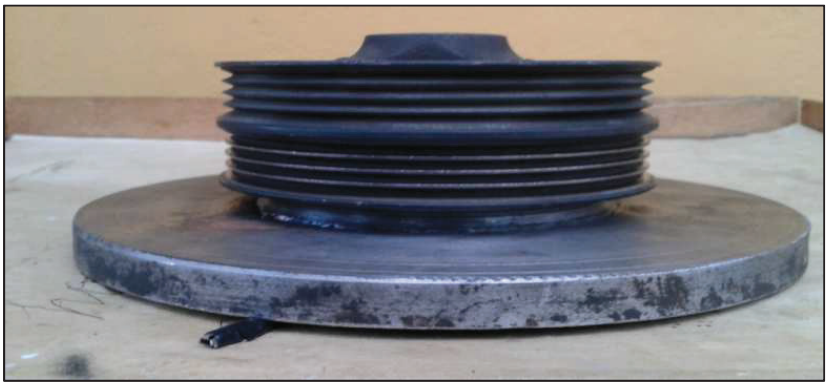

Figura. 2.30. Polea de accesorios y masa diseñada acoplados.
(Fuente: Autores)

En la figura 2.31 se muestra cómo la polea encaja concéntricamente en la pieza. Esta es la posición relativa que llevarán ambas piezas una vez sean atornilladas al eje del cigüeñal. En la figura 2.32 se muestra a la polea instalada en su posición habitual dentro del motor. Sobre ésta y con su mismo tornillo se ubica a la pieza fabricada.

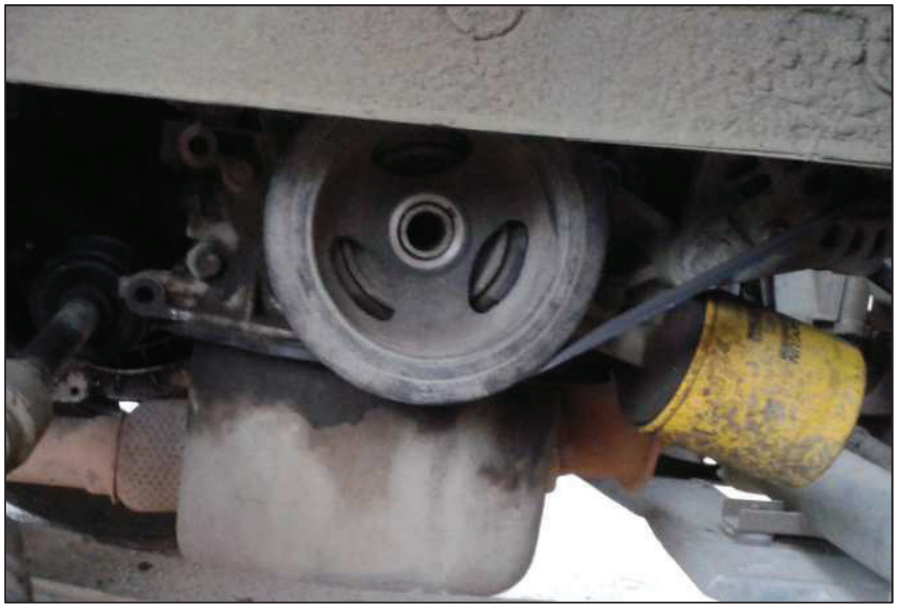

Figura. 2.31. Posición de la polea de accesorios.
(Fuente: Autores)

Finalmente se le da el torque adecuado al tornillo y se verifica que ambos cuerpos giren solidariamente, sin ningún tipo de desbalanceo y sin ninguna interferencia con los demás elementos del motor.

Figura. 2.32. Instalación sobre el motor de la polea de accesorios y masa diseñada.
(Fuente: Autores)

Para determinar el momento de inercia de la pieza se modela en 3D. Generalmente los programas de diseño tienen la opción de asignarle un tipo de material a la pieza y además permiten hacer un análisis físico de la misma, dentro del cual se pueden obtener datos como el volumen, la masa y en particular el momento de inercia con respecto a cada uno de sus tres ejes coordenados. Tanto la modelación en 3D como el análisis físico de la pieza fueron realizados en el programa Ansys de Swanson, (1970). La modelación se muestra en la figura 2.33.

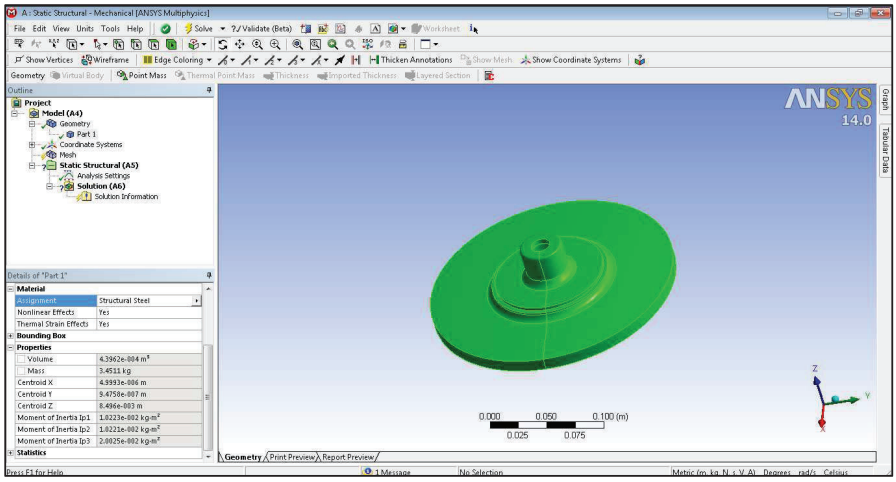

Figura. 2.33. Modelado en 3D de la masa que se le añade al motor.
(Fuente: Autores)

En la figura 2.34 se muestran los resultados obtenidos del análisis físico de la pieza; se puede apreciar que se selecciona el material “Structural Steel” y en función de éste el programa arroja, entre otros datos, el momento de inercia en los diferentes ejes.

Details of "Part 1"

Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	
Volume	4.3962e-004 m^3
Mass	3.4511 kg
Centroid X	4.9993e-006 m
Centroid Y	9.4758e-007 m
Centroid Z	8.496e-003 m
Moment of Inertia Ip1	1.0223e-002 $kg \cdot m^2$
Moment of Inertia Ip2	1.0221e-002 $kg \cdot m^2$
Moment of Inertia Ip3	2.0025e-002 $kg \cdot m^2$
Statistics	

Figura. 2.34. Análisis físico de la masa modelada en 3D.
(Fuente: Autores)

Para el objetivo de este estudio el momento de inercia de interés es con respecto al eje Z. Se resalta que el momento de inercia en los otros dos ejes es igual ya que la pieza en esos ejes es simétrica. Por lo tanto el momento de inercia conocido (I_c) es igual a:

$$I_c = 0.02\ kg.m^2$$

Para corroborar que los órdenes de magnitud de los momentos de inercia obtenidos a través del software Ansys (Swanson, 1970) son correctos, se compara con el obtenido de manera manual de un disco simplificado con una geometría similar a la masa modelada. El momento de inercia I de un disco delgado de masa m y con un radio r viene dado por la siguiente expresión (Beer, Johnston, Clausen, & Staab, 2004):

$$I_d = \frac{1}{2} m.r^2$$

Ecuación 2.1

Donde:

$\boldsymbol{I_d}$: Momento de Inercia del disco ($kg.m^2$)

$\boldsymbol{m}$: Masa del disco (kg)

$\boldsymbol{r^2}$: Radio del disco (m)

De acuerdo con la figura 2.35 que muestra las dimensiones más relevantes de la masa que se le añadió al motor, el disco simplificado tendría un radio $r = 0.11m$ y un espesor $h = 0.011m$.

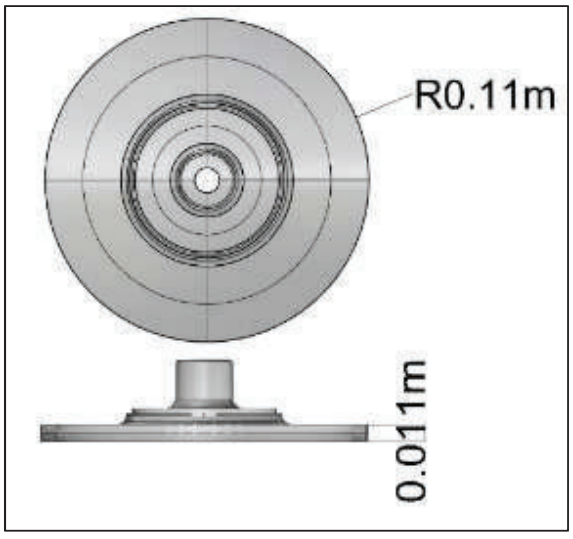

Figura. 2.35. Dimensiones relevantes de la masa añadida al motor.
(Fuente: Autores)

Conocidos el volumen del disco simplificado V y la densidad del acero ρ_{acero}, se puede calcular su masa por medio de las ecuaciones 2-10 y 2-11, (Hibbeler, 2004).

$$V = \pi . r^2 . h$$

Ecuación 2.2

$$m = V . \rho_{acero}$$

Ecuación 2.3

Donde:

$\boldsymbol{r}$: Radio (m)

$\boldsymbol{h}$: Altura (m)

$\boldsymbol{m}$: Masa (Kg)

$\boldsymbol{V}$:Volumen(m^3)

$\boldsymbol{\rho_{acero}}$:Densidad del Acero($\frac{Kg}{m^3}$) $= 7850 \frac{Kg}{m^3}$

Los cálculos desarrollados arrojan los siguientes resultados:

$$V = \pi . r^2 . h = 4.18X10^{-4} m^3$$

$$m = V . \rho_{acero} = 3.28Kg$$

Notar que también se colocó el disco sobre una balanza para corroborar los datos, los cuales son los mismos.

Luego, como ya se conocen la masa y el radio del disco simplificado, su momento de inercia es.

$$I_d = \frac{1}{2} m . r^2 = 0.019844 kg . m^2 \approx 0.02 kg . m^2$$

El momento de inercia arrojado por el software es exactamente igual al obtenido manualmente del disco simplificado, lo que lleva a concluir que el método para la obtención del momento de inercia por medio de la utilización de un software de diseño es válido y confiable.

Desaceleraciones del motor obtenidas.

Utilizando tanto el dispositivo para la adquisición de datos como el software desarrollado se toman y se procesan los respectivos datos para determinar las desaceleraciones.

El software muestra el comportamiento de la velocidad angular en el tiempo y adicionalmente permite analizar únicamente la zona de interés para determinar las desaceleraciones por medio de un par de reglas verticales de color amarillo.

En la figura 2.36 se muestra el perfil completo de velocidad angular y las dos reglas que limitan la zona de interés.

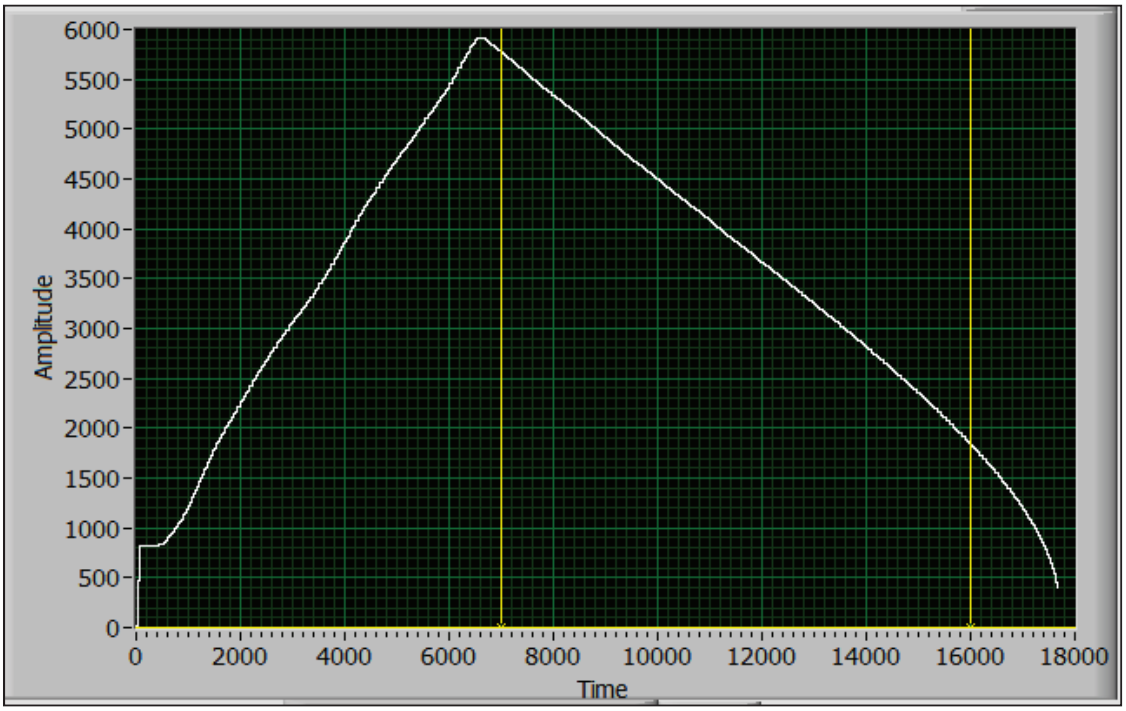

Figura. 2.36. Perfil de velocidad angular del motor obtenida.
(Fuente: Autores)

Nótese que la zona delimitada por las dos líneas amarillas corresponde a una recta, lo que confirma el hecho de que el torque de pérdidas en el motor es constante.

El software toma los datos correspondientes a dicha zona y los ajusta de la mejor manera a un polinomio con el objetivo de suavizar la curva. En la figura 2.37 se muestra el segmento de la curva ya completamente suavizado.

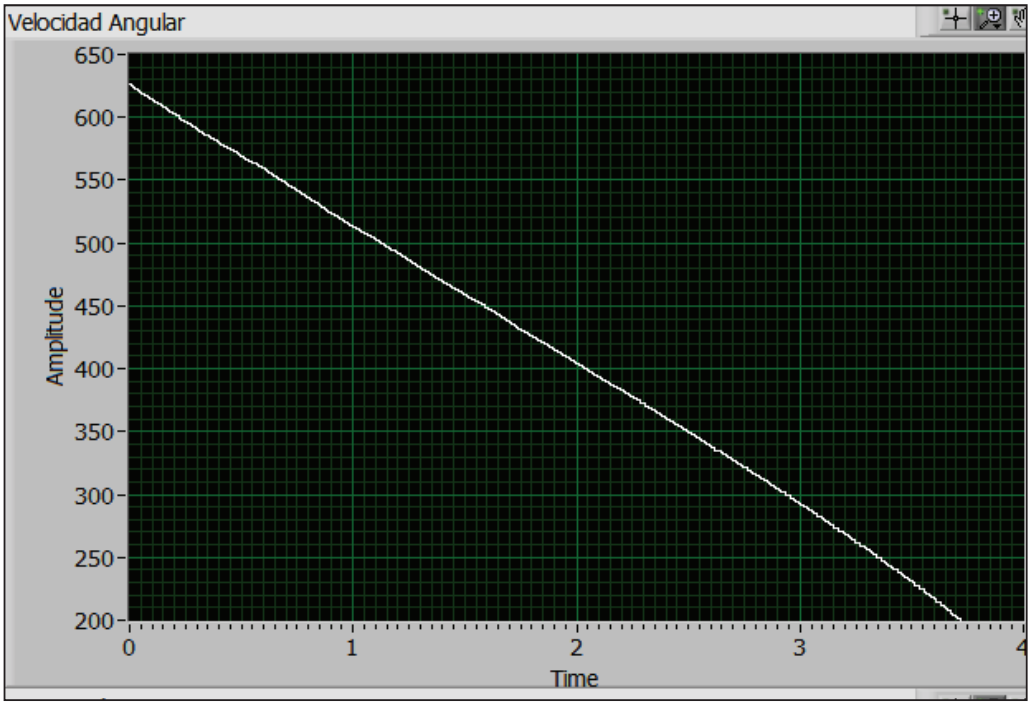

Figura. 2.37. Segmento de velocidad angular del motor obtenida.
(Fuente: Autores)

El software también permite exportar a Excel todos los datos que constituyen la curva. Una vez en Excel se procede a graficar nuevamente y adicionalmente se crea una línea de tendencia que para el caso se aproxima a una recta, se muestra en la figura 2.38.

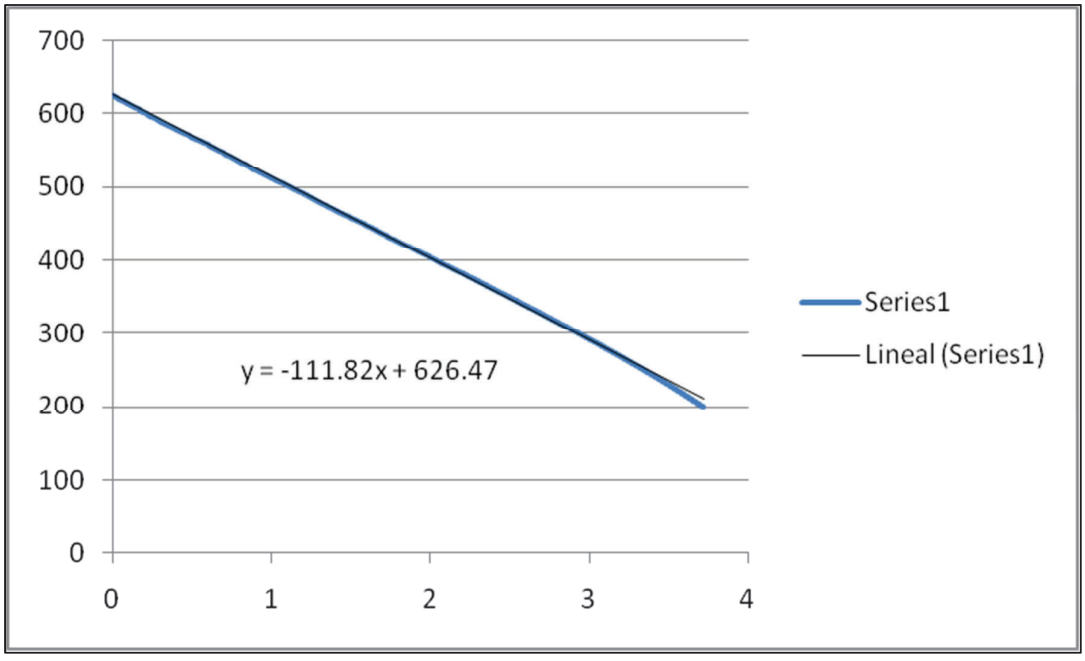

Figura. 2.38. Segmento de velocidad angular del motor ajustado con una línea de tendencia.
(Fuente: Autores)

Por definición, la derivada de la velocidad es la aceleración y para el caso de una recta, ésta coincide con su pendiente.

De manera que al obtener la ecuación de la recta que ajusta todos los valores, se puede leer directamente el valor de la aceleración, que por tratarse de una desaceleración se presenta con un signo negativo: $-111.82\ rad/s^2$.

También el software entrega una gráfica del perfil completo y del segmento de desaceleración angular obtenido. Para determinar las desaceleraciones $\propto_1$ y $\propto_2$ se hicieron 14 y 14 pruebas respectivamente, siguiendo para cada una de ellas el procedimiento descrito anteriormente.

En la tabla 3 se muestran las ecuaciones de las rectas que ajustan los datos para cada una de las pruebas y sus respectivas desaceleraciones.

Tabla 2. Ecuaciones de las rectas obtenidas sin inercia y con inercia conocida.

Sin inercia				**Con inercia**			
Nº	**Ecuación**	**α1**	**Diferencia respecto al promedio**	**Nº**	**Ecuación**	**α2**	**Diferencia respecto al promedio**
1	y = -122.68x + 624.05	-122.68	-5.66	1	y = -94.951x + 519.07	-94.95	1.00
2	y = -120.62x + 677.46	-120.62	-3.60	2	y = -102.84x + 565.53	-102.84	-6.89
3	y = -113.85x + 644.86	-113.85	3.17	3	y = -105.21x + 614.2	-105.21	-9.26
4	y = -114.02x + 625.51	-114.02	3.00	4	y = -94.536x + 547.01	-94.54	1.41
5	y = -118.38x + 664.08	-118.38	-1.36	5	y = -96.777x + 567.41	-96.78	-0.83
6	y = -123.5x + 641.41	-123.50	-6.48	6	y = -96.279x + 531.56	-96.28	-0.33
7	y = -112.93x + 603.31	-112.93	4.09	7	y = -92.259x + 485.22	-92.26	3.69
8	y = -118.86x + 595.32	-118.86	-1.84	8	y = -94.9x + 553.47	-94.90	1.05
9	y = -118.8x + 663.43	-118.80	-1.78	9	y = -95.413x + 514.32	-95.41	0.54
10	y = -109.93x + 569.6	-109.93	7.09	10	y = -96.069x + 586.73	-96.07	-0.12
11	y = -113.45x + 570.43	-113.45	3.57	11	y = -92.672x + 585.11	-92.67	3.28
12	y = -118.46x + 641.65	-118.46	-1.44	12	y = -94.38x + 532.17	-94.38	1.57
13	y = -113.04x + 612.17	-113.04	3.98	13	y = -90.519x + 526.58	-90.52	5.43
14	y = -119.81x + 634.4	-119.81	-2.79	14	y = -96.506x + 558.95	-96.51	-0.56
	PROMEDIO:	-117.02			**PROMEDIO:**	-95.95	
	DESVIACIÓN ESTANDAR:	4.11			**DESVIACIÓN ESTANDAR:**	3.87	

(Fuente: Autores)

De acuerdo con Pierce, (2011) para validar que tan pertinentes son los datos que componen una serie se calcula su desviación estándar. Esto da los resultados de que tan dispersos están los datos con respecto a su promedio, de manera que aquellos datos cuya diferencia con respecto al promedio (en valor absoluto) sea superior a la desviación

estándar, se consideran como no representativos y por lo tanto se pueden descartar, luego, con la serie ya depurada, se calcula nuevamente el promedio.

En la tabla 2 se muestran los respectivos valores de la desviación estándar para cada una de las series y se muestran resaltados aquellos datos que fueron descartados para calcular nuevamente los promedios. En la tabla 3 se muestran los valores de $\propto_1$ y $\propto_2$ obtenidos.

Tabla 3. Valores de $\propto_1$ y $\propto_2$ obtenidas.

Desaceleraciones (rad/s^2)	
$\propto_1$	-116.57
$\propto_2$	-94.98

(Fuente: Autores)

Ya conocidos el momento de inercia de la masa que se le agrega al motor, así como las desaceleraciones $\propto_1$ y $\propto_2$ de forma estadística, es posible calcular el momento de inercia del motor aplicando las ecuaciones correspondientes. A continuación en la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4. Resultados obtenidos del momento de Inercia.

I_c =	0.02 $kg.m^2$
$\propto_1$ =	-116.57 rad/s^2
$\propto_2$ =	-94.98 rad/s^2
I_m =	0.088 $kg.m^2 \approx 0.1\ kg.m^2$

(Fuente: Autores)

Para corroborar que los órdenes de magnitud del valor del momento de inercia encontrado corresponden con los valores típicos de este parámetro, se hace uso de la herramienta Simscape™ Driveline™ que provee librerías de componentes para modelar y simular sistemas mecánicos rotacionales y traslacionales. En particular permite la simulación de motores de combustión interna genéricos. Para tener acceso a la herramienta de simulación de motores, basta con ejecutar el siguiente comando en MATLAB 7.12.0 (Moler, 1984): sdl_manual_transmission.

En la Figura 2.39, que corresponde a la interface que se despliega en el MATLAB al ejecutar el comando mencionado, se pueden visualizar todas las variables que pudieran llegar a ser modificadas durante la simulación.

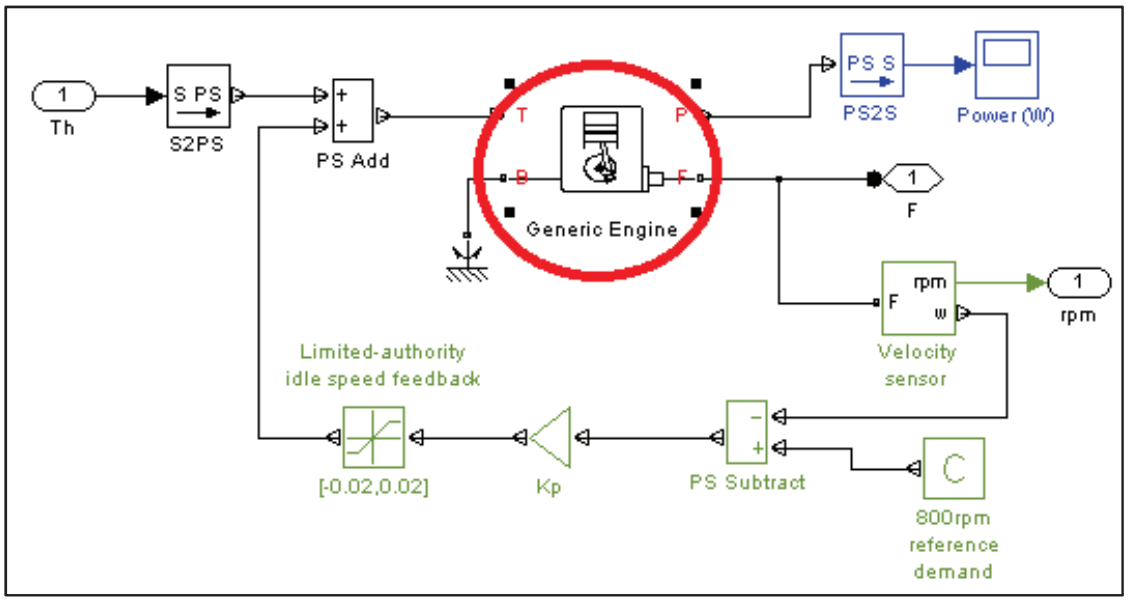

Figura. 2.39. Diagrama de bloques para simulación de motor.
(Fuente: MATLAB 7.12.0. Aplicación sdl_manual_transmission.)

Al hacer clic sobre el motor (correspondiente al icono encerrado en el círculo rojo en la imagen anterior) se despliegan una serie de parámetros dinámicos al motor objeto de simulación que pueden ser modificados; sin embargo, por tratarse de un motor genérico, este ya trae asignados unos valores por defecto. Se muestra en la figura 2.40.

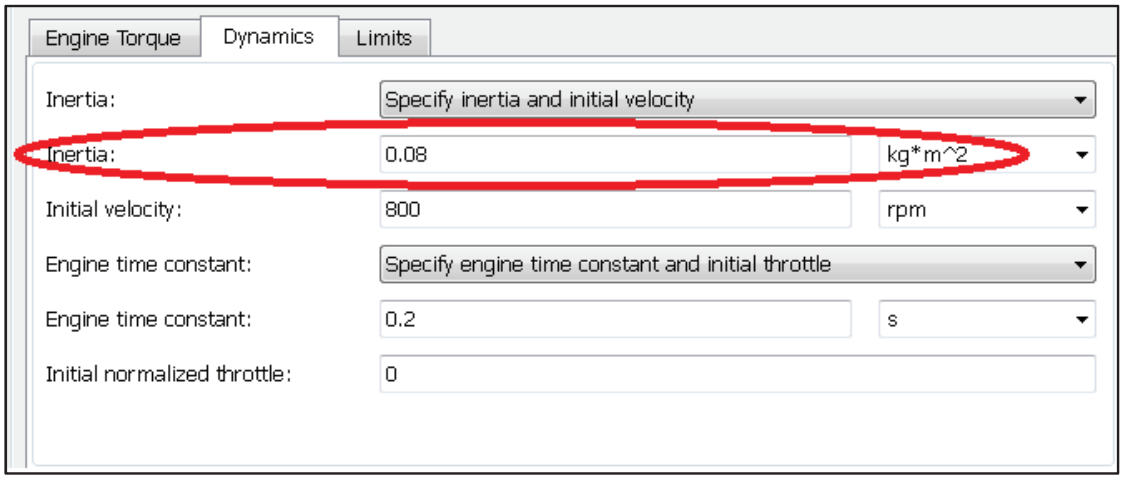

Figura. 2.40. Parámetros por defecto del motor genérico.
Fuente: MATLAB 7.12.0.

Como se puede observar, el momento de inercia del motor genérico está en el mismo orden de magnitud del momento de inercia encontrado siguiendo la metodología descrita en esta tesis.

2.6. Validación del método.

A continuación se realiza un análisis comparativo de las curvas características obtenidas con el método de la aceleración libre frente a resultados obtenidos con mediciones realizas en un banco dinamométrico, esto para establecer más adelante algunos aspectos que puedan dar por válido el método desarrollado.

Análisis comparativo de las curvas características obtenidas frente a resultados en banco dinamométrico.

Se procede a comparar las curvas características obtenidas por el método de la aceleración libre en las figuras 2.42 y 2.44 respectivamente, frente a la potencia medida en un banco dinamométrico MAHA LPS 3000 mostradas en la figura 2.41 y 2.43.

Las pruebas fueron realizadas bajo las siguientes condiciones:

Condición 1: Con el motor en condiciones de funcionamiento normales, es decir el motor en óptimas condiciones de funcionamiento. Esto para que se tenga una curva característica que en adelante se llamará curva patrón de comparación frente a las demás condiciones de pruebas que se realicen.

Condición 2: Con el primer cilindro del motor inhabilitado. Esto se logra cortando el suministro de combustible al desconectar el soque de conexión eléctrica del respectivo inyector. Se aplican las pruebas tanto en el banco dinamométrico como por el método de aceleración libre.

Descripción de las gráficas.

Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos por ambos métodos, es importante conocer a fondo la información contenida en cada una de las gráficas.

Gráfica obtenida en el banco dinamométrico:

La gráfica muestra cuatro curvas, cuyos valores máximos son mostrados en la parte derecha de la misma:

P-Rueda (potencia en la rueda): El método sólo permite medir directamente la potencia en la rueda del vehículo. El valor mostrado de la potencia del motor es una medida indirecta.

P-Arrastre (potencia de arrastre): Es la potencia de pérdidas de la transmisión del vehículo cuando éste se encuentra engranado en la cuarta marcha. Es un dato importante porque sirve para determinar de manera indirecta la potencia del motor.

P-Motor (potencia del motor): Al considerar las pérdidas asociadas a las transmisión del vehículo es válido decir que la potencia en la rueda es igual a la potencia del motor menos la potencia de arrastre; o lo que es igual a decir que la potencia del motor es igual a la potencia medida en la rueda más la potencia de arrastre. Lo anterior pone de manifiesto que la potencia del motor es una medición indirecta.

M-Motor (torque del motor): Al igual que con la potencia del motor, el torque del motor es una medición indirecta basada en el torque medido en la rueda y el de arrastre de la transmisión.

Gráfica obtenida por el método de la aceleración libre:

Si bien el software creado durante el desarrollo del método permite la visualización de algunas otras curvas características del motor, se centra la atención en ésta en particular para efectos de la comparación con la gráfica obtenida en el banco dinamométrico porque ambas muestran mediciones de potencia del motor. En la gráfica se observan dos curvas diferentes:

Potencia Normal: Se refiere a la potencia generada por el motor, determinada a partir de su aceleración angular cuando se pisa el acelerador a fondo y éste no tiene ninguna carga. Dicha curva es la que se compararía directamente con la curva de la P-Motor obtenida con el banco dinamométrico.

Potencia Pérdidas: Se refiere a la potencia asociada a las pérdidas del motor. Dicha potencia, por referirse a pérdidas como tal, debería registrar valores negativos; pero se muestran sus valores absolutos por conveniencia en la presentación de la gráfica. La potencia de pérdidas no tiene entonces ninguna relación con la potencia de arrastre presentada en la otra gráfica y por lo tanto no tiene ninguna utilidad en este ejercicio de comparación de los dos métodos.

De acuerdo con lo anterior, la única herramienta para la comparación de los dos métodos son las respectivas curvas de potencia: P-Motor para el caso de la medición realizada en el banco dinamométrico y Potencia Normal para el caso de la medición realizada por el método de la aceleración libre.

Figura. 2.41. Curva de potencia obtenida en el banco dinamométrico con motor en condiciones normales. (Fuente: Software de banco dinamométrico MAHA LPS 3000 – Universidad Politécnica Salesiana Cuenca Ecuador)

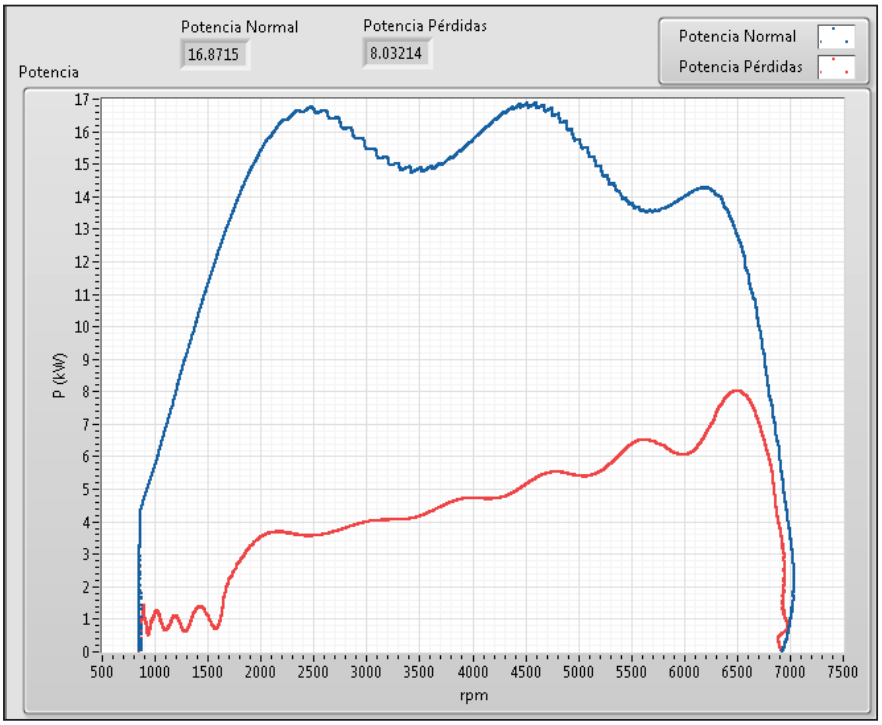

Figura. 2.42. Curva de potencia por el método de aceleración libre con motor en condiciones normales. (Fuente: Autores)

Figura. 2.43. Curva de potencia dinamométrica con el primer cilindro inhabilitado.
(Fuente: Software de banco dinamométrico MAHA LPS 3000 – Universidad Politécnica Salesiana Cuenca Ecuador)

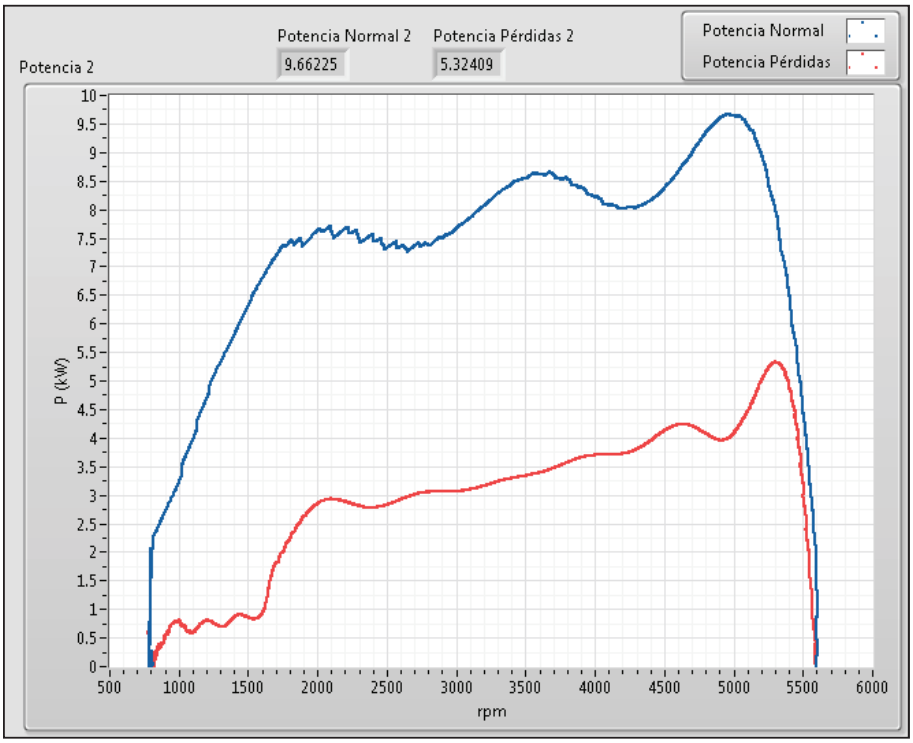

Figura. 2.44. Curva de potencia por el método de aceleración libre con el primer cilindro inhabilitado. (Fuente: Autores).

Criterios de comparación.

Se establecen los siguientes criterios de comparación entre las dos curvas de potencia obtenidas por los distintos métodos, con la intención de establecer cuán confiable es el método de la aceleración libre para calcular la potencia de un motor de combustión interna.

- Potencia máxima registrada:

En este criterio de comparación sólo se tendrán en cuenta las curvas de potencia obtenidas cuando el motor se encuentra en condiciones normales de funcionamiento. La potencia máxima registrada en el banco dinamométrico es de 47kW frente a los 16.87kW medida por el método de la aceleración libre. Es decir, la potencia máxima medida por el método de la aceleración libre es tan sólo un 36% de la potencia máxima medida en el banco, lo cual a primera vista, es un resultado poco favorable para la validez del método de la aceleración libre. Lo anterior no implica que el método propuesto en este trabajo no tenga una aplicación práctica, pues cabe recordar que los valores de potencia que éste arroja son el producto de $\propto.w$ multiplicado por un factor de proporcionalidad que para el caso viene siendo el momento de inercia del motor (Im). Entonces la diferencia entre las potencias máximas encontradas por los dos métodos puede estar asociada a: Errores en el cálculo de la aceleración angular; errores en el cálculo del momento de inercia del motor; o por la naturaleza misma de los dos métodos que de por sí son diferentes. Ahora bien, los errores tanto en el cálculo de la aceleración como en el del momento de inercia quedan descartados porque, como se vio en el apartado relativo al cálculo del momento de inercia, el valor medido es muy similar al valor de referencia encontrado en la literatura y como éste fue medido a través de una serie de desaceleraciones obtenidas utilizando el dispositivo y el software desarrollados, se concluye que ambos parámetros fueron bien medidos.

- Velocidad angular del motor en la que se registra el valor de máxima potencia:

Analizando las gráficas obtenidas por los dos métodos, cuando el motor se encuentra en condiciones normales de funcionamiento, se puede apreciar que en ambas la potencia máxima alcanzada ocurre a las 4500RPM.

- Porcentaje de pérdida de potencia al inhabilitar el primer cilindro del motor.

En la tabla 5 se resumen las potencias máximas obtenidas por ambos métodos en las dos condiciones descritas.

Tabla 5. Pérdidas de potencia al inhabilitar el primer cilindro.

CONDICIONES/ RESULTADOS	**Potencia en banco dinamométrico (kW)**	**Potencia método aceleración libre (kW)**
Condición 1 (El motor en condiciones normales):	47	16.87
Condición 2 (El motor con su primer cilindro inhabilitado):	25	9.66
% De pérdida de potencia.	53.19%	57.26%

(Fuente: Autores)

Como se puede observar, la caída de potencia registrada por ambos métodos está alrededor del 55%. Esto demuestra que el método de la aceleración libre tiene la capacidad de sensar la proporción en la que decae la potencia al inducir un determinado fallo, independientemente del valor de la potencia en sí mismo, lo cual marcaría el comportamiento real del motor si se utilizara cualquiera de los dos métodos para caracterizar modos de fallo específicos.

Comparación de resultados con los obtenidos en estudios similares.

El método de la aceleración libre para calcular el torque y la potencia efectiva de un motor, así como su torque y potencia de pérdidas, se basa es una correcta medición de la aceleración angular del motor a plenos gases sin carga y la desaceleración angular que sufre el motor debido al torque restrictivo asociado a las pérdidas en general.

En esta tesis se procede a comparar dichos valores de aceleración y desaceleración con los valores obtenidos por Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017) en su tesis de grado, en cuya investigación recurrieron también al uso del método de la aceleración libre.

En la tabla 6 se muestran algunas generalidades de los vehículos de prueba utilizados en cada una de las tesis: Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017) por su parte utilizan como vehículo de pruebas un Kia Río R, mientras que en esta tesis se utiliza un Hyundai Accent Verna.

En la figura 2.43 se muestra la evolución, en el tiempo, de la velocidad angular del motor del Kia Río y en la figura 2.44 se muestra la del Hyundai Accent.

En ambos casos, luego de hacer las conversiones de escala necesarias, se estiman los pares ordenados correspondientes a: 1) Inicio de la rampa de aumento de la velocidad angular; 2) Final de la rampa de aumento de la velocidad angular; 3) Inicio de la rampa de

disminución de la velocidad angular y 4) Final de la rampa de disminución de la velocidad angular. Luego se trazan rectas que unen los puntos 1 con los 2 y los 3 con los 4.

Las pendientes de dichas rectas corresponden a las tasas de aceleración y desaceleración globales que sufren dichos motores durante la realización de la prueba.

Tabla 6. Información general de vehículos de prueba.

Marca	Modelo	Cilindrada (CC)	Distribución	Cuerpo de Aceleración
Kia	Río R	1400	Variable CVV-T	Electrónico
Hyundai	Accent	1600	Fija DOHC	Mecánico

(Fuente: Autores)

Como se puede apreciar, en las gráficas se presentan las ecuaciones de las diferentes rectas.

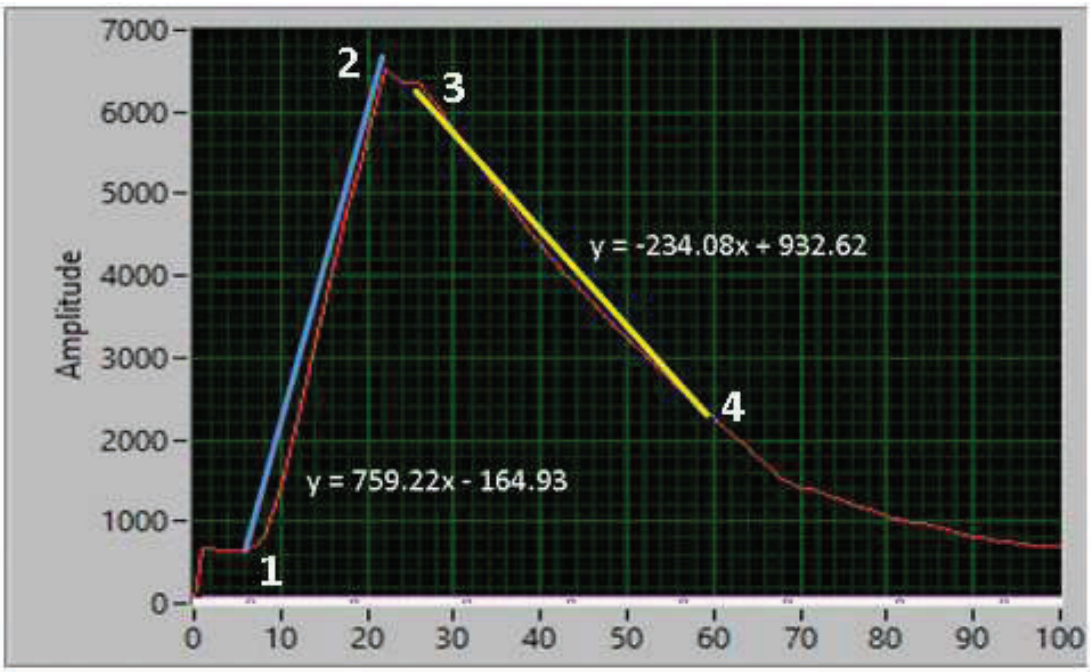

Figura. 2.43. Evolución de la velocidad angular con respecto al tiempo del motor de un Kía Río. (Fuente: Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017)).

Figura. 2.44. Evolución de la velocidad angular con respecto al tiempo del motor de un Hyundai Accent. (Fuente: Autores).

En la tabla 7 se muestran los pares ordenados seleccionados de acuerdo con las respectivas gráficas y los valores globales tanto de aceleración como de desaceleración obtenidos.

Tabla 7. Valores de aceleración y de desaceleración obtenidos.

Kía Rio		**Inicio aceleración**	**Final aceleración**	**Tasa de aceleración**
	t (s)	0.30	1.10	**759.22 rad/s²**
	w (Rad/s)	62.83	670.21	
		Inicio desaceleración	**Final desaceleración**	**Tasa de desaceleración**
	t (s)	1.30	3.00	**-234.08 rad/s²**
	w (Rad/s)	628.32	230.38	
Hyundai Accent		**Inicio aceleración**	**Final aceleración**	**Tasa de aceleración**
	t (s)	0.10	1.20	**571.2 rad/s²**
	w (Rad/s)	83.78	712.09	
		Inicio desaceleración	**Final desaceleración**	**Tasa de desaceleración**
	t (s)	1.30	4.00	**-147.38 rad/s²**
	w (Rad/s)	691.15	293.22	

(Fuente: Autores)

Como se puede observar, las tasas de aceleración tienen los mismos órdenes de magnitud, siendo mayor la tasa del Kía Río; diferencia que resulta ser normal dado que este vehículo cuenta con un sistema de distribución variable. Adicionalmente es un motor que tiene una cilindrada ligeramente inferior, lo que conlleva a que tenga un menor momento de inercia y por ende presente una menor resistencia al cambio de su velocidad angular como producto del torque que genera. Por otro lado, las tasas de desaceleración, a pesar de que presentan los mismos órdenes de magnitud, tienen una diferencia aún mayor. Esto se explica de nuevo por un menor momento de inercia del motor del Kía Río y por el método de realización de la prueba: el método descrito en esta tesis indica que durante la toma de datos de desaceleración del motor, la aleta de aceleración debe permanecer abierta, mientras que por el contrario en el método planteado por Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017), la aleta debe permanecer cerrada. Este hecho implica que las pérdidas por bombeo durante la prueba en el Kía Río son muy superiores a las pérdidas por bombeo en el Hyunadi Accent y es por ello el primero sufre una desaceleración mayor que el segundo.

Adicionalmente se comparan los valores del momento de inercia obtenidos: Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017) obtuvieron un momento de inercia de $0.071\ \mathrm{kg.m^2}$, mientras que el obtenido en este trabajo, siguiendo la metodología descrita por Bermúdez & Tormos, (2011), es $0.088\ \mathrm{kg.m^2}$. Ambos tienen los mismos órdenes de magnitud, siendo mayor el del Hyundai Accent, ya que se trata de un motor con un cilindraje mayor.

Por último se comparan los resultados del análisis del comportamiento de la potencia conforme se aumenta la altura sobre el nivel del mar: Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017), con base en sus mediciones, encontraron que la potencia disminuye 0.8% por cada 100m de aumento en la altura sobre el nivel del mar, mientras que en esta tesis, como se verá en el apartado 3.4, se encontró que la potencia disminuye 0.9% por cada 100m de aumento en la altura sobre el nivel del mar.

Aspectos que validan el método de la Aceleración Libre.

Con base en los criterios anteriormente expuestos, se considera que el método de la aceleración libre tiene una validez parcial; es decir, presenta una gran limitación para el cálculo del valor absoluto de la potencia del motor, pero es una herramienta muy útil para definir de una manera rápida el porcentaje de variación de la potencia cuando esta es medida bajo diferentes condiciones. Dada la correlación encontrada entre los resultados obtenidos con el banco dinamométrico y el método de la aceleración libre, podría llegar a ser de utilidad igualar los dos valores máximos de potencia medidos, multiplicando al

segundo por un factor de proporcionalidad (Fp). Luego se despeja dicho factor de proporcionalidad y se multiplica, en adelante, a todos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el método de la aceleración libre al vehículo de pruebas:

$$47\ kW = Fp\ x\ 16.87\ kW$$

$$Fp = 2.78$$

La utilidad de encontrar este factor de proporcionalidad radica en que es posible obtener a través del método de la aceleración libre prácticamente los mismos resultados que se obtendrían en el banco dinamométrico.

Por ello se resaltan algunas ventajas del método de la aceleración libre con respecto al banco dinamométrico:

El comportamiento de la potencia a bajas revoluciones, leída en la curva obtenida en el banco dinamométrico, es diferente. Ello se debe a que la prueba exige arrancar el vehículo en cuarta marcha y mientras alcanza las revoluciones en las que el torque generado por el motor es el suficiente como para arrastrar los rodillos del banco, es necesario hacer bastante uso del pisa - suelta del embrague (esto para transmisiones manuales). Lo anterior se deriva en que a bajas revoluciones existe un cierto grado de deslizamiento en el embrague (que es necesario durante la prueba) y por lo tanto la potencia registrada en el banco dinamométrico no corresponde con la potencia que el motor puede generar. El anterior problema no se presenta con el método de la aceleración libre, lo que constituye una ventaja para él. Análogamente, el método del banco dinamométrico no registra la potencia en altas revoluciones, pues la prueba se centra en encontrar la máxima potencia y una vez alcanzada se da por terminada la prueba. Se presume que se alcanza la máxima potencia cuando la curva empieza a decaer luego de alcanzar un determinado pico. De todas formas no es prudente llevar el motor a regímenes de giro superiores en dicha prueba. Con el método de la aceleración libre no se presenta dicho inconveniente, pues en éste es posible llevar el motor sin ningún inconveniente sobre las 6000RPM y observar qué ocurre con la potencia en esos regímenes. Esto, de igual manera, constituye una ventaja del método de la aceleración libre frente al método del banco dinamométrico. La desventaja que conlleva el uso del factor de proporcionalidad es que se hace necesario llevar al vehículo, por lo menos una vez, al banco dinamométrico para obtenerlo.

Se hace hincapié en que el método desarrollado en esta tesis permite por sí mismo la obtención de las curvas características del motor y determinar con facilidad la proporción

de variación en las distintas pruebas realizadas, sin la necesidad de usar el banco dinamométrico; sólo se utilizaron los resultados obtenidos en éste para validar el método de la aceleración libre.

Por otro lado es importante para la validación del método utilizado en esta tesis, tener la posibilidad de comparar los resultados con un trabajo similar, desarrollado por Cargua Colcha & Castelo Valdivieso, (2017). Dicha comparación se basa en tres aspectos: las mediciones de aceleración y desaceleración; el momento de inercia hallado y la determinación de la variación de la potencia conforme se aumenta la altura sobre el nivel del mar. Como se ha dicho, el método de la aceleración libre se basa en una correcta medición de las tasas de aceleración y desaceleración del motor durante la prueba, lo cual se comprueba en la comparativa realizada.

2.7. Desarrollo práctico para reproducir modos de falla en sensores y actuadores.

A continuación se establece cómo reproducir en la práctica los modos de falla posibles en algunos sensores de importancia para en lo posterior realizar la caracterización de las curvas características del motor cuando cada una de ellas se presente de forma individual.

Desarrollo práctico para reproducir modos de falla en sensores.

Los diagramas del fabricante con su respectiva forma de reproducir cada uno de los modos de fallo se muestran en el anexo 1, mientras que a continuación en la siguiente tabla se detallan cada uno de los modos de falla que serán puestos a prueba con el método de medición, donde además se detalla la condición de falla y una hipótesis de lo que podría debido al modo de fallo como tal.

Tabla 8. Descripción de los modos de falla en sensores.

Nº	Modo de Falla	Condición de falla	Hipótesis Inicial
1	Fallo de funcionamiento del sensor de Oxígeno	El sensor de Oxigeno no da señal	La gestión de control hará que exista más potencia
2	Mezcla de combustible demasiado pobre.	El sensor defectuoso entrega una señal de mezcla pobre.	Por el exceso de oxígeno en la cámara de combustión, aumenta la temperatura interna, provoca detonación, bajo consumo de combustible, la gestión electrónica compensara con mayor combustible por lo que habrá mayor potencia.
3	Mezcla de combustible demasiado rica	El sensor defectuoso entrega una señal de mezcla rica.	Exceso de combustible en el motor y no es quemado totalmente, aumento de consumo de combustible, la gestión electrónica compensara con menos combustible por lo que habrá menor

			potencia. **Continúa…**
4	Comprobación de rango se sensor MAP bajo.	El sensor defectuoso no entrega señal.	**Viene de la tabla 8….** La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. Habrá menor potencia.
5	Señal alta de circuito de temperatura de aire de admisión IAT	El sensor defectuoso no entrega señal.	La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. La potencia será ligeramente menor.
6	Señal alta de circuito de temperatura de refrigerante de motor ECT	El sensor defectuoso no entrega señal.	La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. La potencia será ligeramente menor.
7	Problema de Rango o rendimiento del circuito del sensor TPS.	El sensor defectuoso no entrega señal.	La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. La potencia será menor.
8	Fallo de funcionamiento del sensor CMP	El sensor defectuoso no entrega señal.	La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. La potencia será menor.

(Fuente: Autores)

Desarrollo práctico para reproducir modos de falla en actuadores.

Al igual que para el caso de los sensores, en el Anexo 1 también se detallan los procedimientos para reproducir modos de falla en actuadores mientras que a continuación en la siguiente tabla se detallan cada uno de los modos de falla que serán puestos a prueba con el método de medición, donde además se detalla la condición de falla y una hipótesis de lo que podría debido al modo de fallo como tal.

Tabla 9. Descripción de los modos de falla en actuadores.

Nº	Modo de Falla	Condición de falla	Hipótesis Inicial
9	Señal Baja / Alta del circuito del inyector	Se detecta un circuito abierto o un cortocircuito a masa en el circuito inyector de combustible defectuoso.	No habrá aporte de combustible a un determinado cilindro. La potencia será menor.
10	Señal Baja / Alta de la válvula de ralentí.	Se detecta un circuito abierto o un cortocircuito a masa en el circuito de la válvula de ralentí	De ser el caso que la válvula quede en alguna posición abierta o cerrada dejando pasar más o menos flujo de aire al motor se espera que la potencia aumente o disminuya ligeramente.
11	Fallo de encendido detectado.	No existe encendido para uno de los cilindros.	No habrá aporte de encendido a un determinado cilindro. La potencia será menor.
12	Circuito abierto / cortocircuito de la válvula de control de purga del sistema de control de emisiones EVAP	Se detecta un circuito abierto o un cortocircuito a masa en el circuito de la válvula EVAP	De ser el caso que la válvula quede en alguna posición abierta o cerrada dejando pasar más o menos flujo de aire al motor se espera que la potencia aumente o disminuya ligeramente.

(Fuente: Autores)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados de las pruebas y caracterización de modos de fallo para sensores y actuadores, mediciones con variación de altura con respecto al nivel del mar, pruebas de contribución de cilindros y análisis comparativo entre varios motores que se pudieron realizar durante el desarrollo del proyecto.

3.1 Curvas características con los modos de fallo inducidos.

Se muestra a continuación en la figura 3.1 las curvas características de potencia con todas las pruebas realizadas con los modos de fallo inducidos.

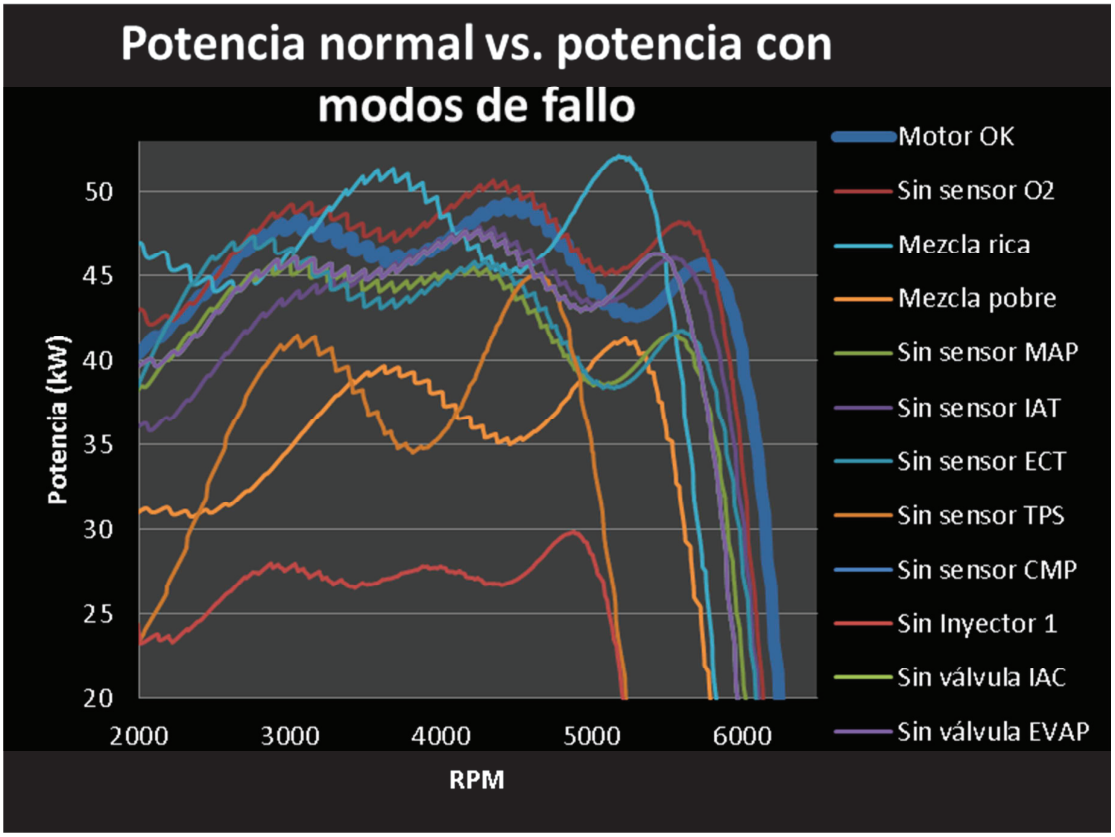

Figura. 3.1 Curvas de potencia efectiva por el método de aceleración libre con todos los modos de fallo inducidos. (Fuente: Autores).

Se muestra a continuación en la figura 3.2 las curvas características de potencia de pérdidas mecánicas con todas las pruebas realizadas de los modos de fallo inducidos, donde a pesar que en algunas de estas pruebas no alcanzan las mismas rpm todas las gráficas con respecto al patrón que son las 6500rpm, se verifica que los resultados son pérdidas que llevan una tendencia paralela con todos los modos de fallo en cada régimen de revoluciones. Las pérdidas como es lógico a bajo régimen de giro son pequeñas en

valores de alrededor de 5kW y 10kW a las 2000rpm, mientras que a medida que las revoluciones suben las pérdidas también se incrementan hasta llegar a valores de 25kW a las 6000rpm.

Si se miran los valores de potencia efectiva que alcanzan a las 2000 rpm y que son de 40kW y se miran los valores de pérdidas que alcanzan a las mismas 2000rpm que son 6kW, esto representa el 15% de pérdidas mecánicas a este régimen, y si se miran los valores de potencia máxima a las 4500rpm que son 47kW y si se miran las pérdidas a estas mismas 4500rpm, estas representan un 25% aproximado de pérdidas mecánicas a este régimen.

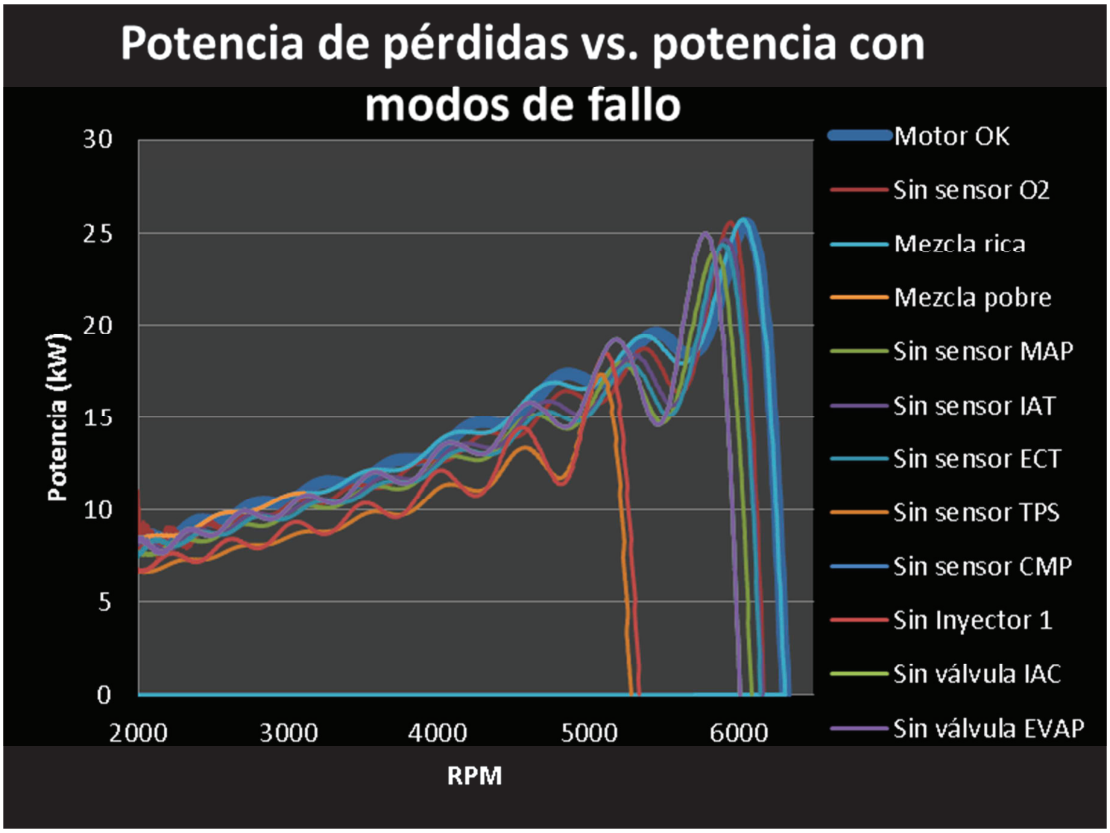

Figura. 3.2. Curvas de potencia de pérdidas mecánicas por el método de aceleración libre con todos los modos de fallo inducidos. (Fuente: Autores).

Se muestra a continuación en la figura 3.3 las curvas características de torque con todas las pruebas realizadas con los modos de fallo inducidos.

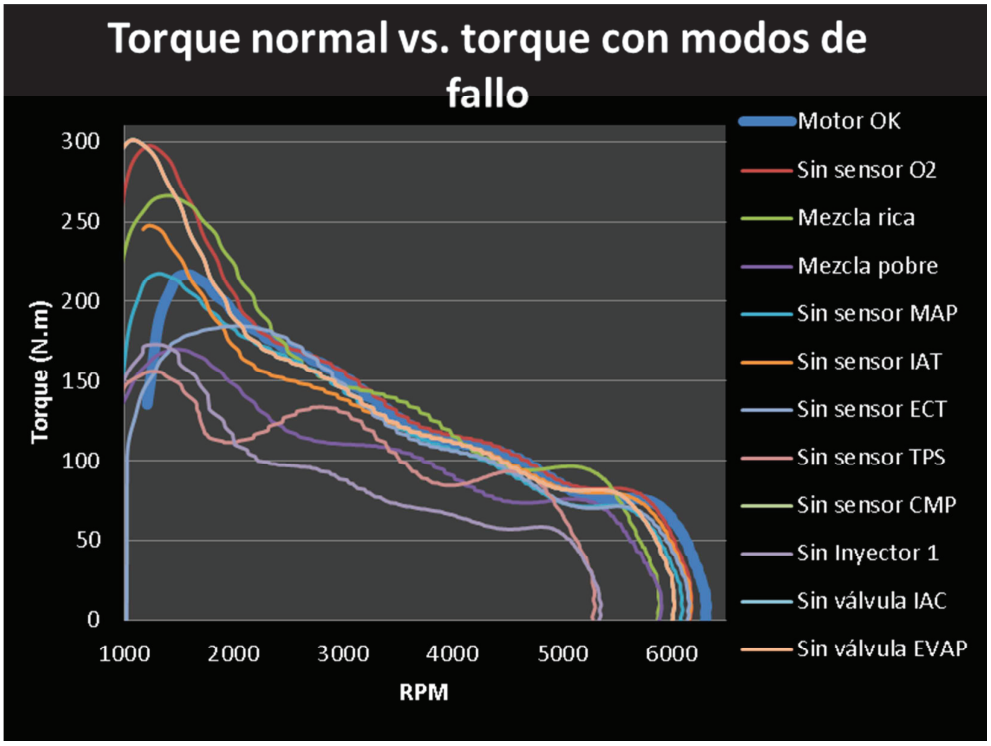

Figura. 3.3. Curvas de torque por el método de aceleración libre con todos los modos de fallo inducidos. (Fuente: Autores).

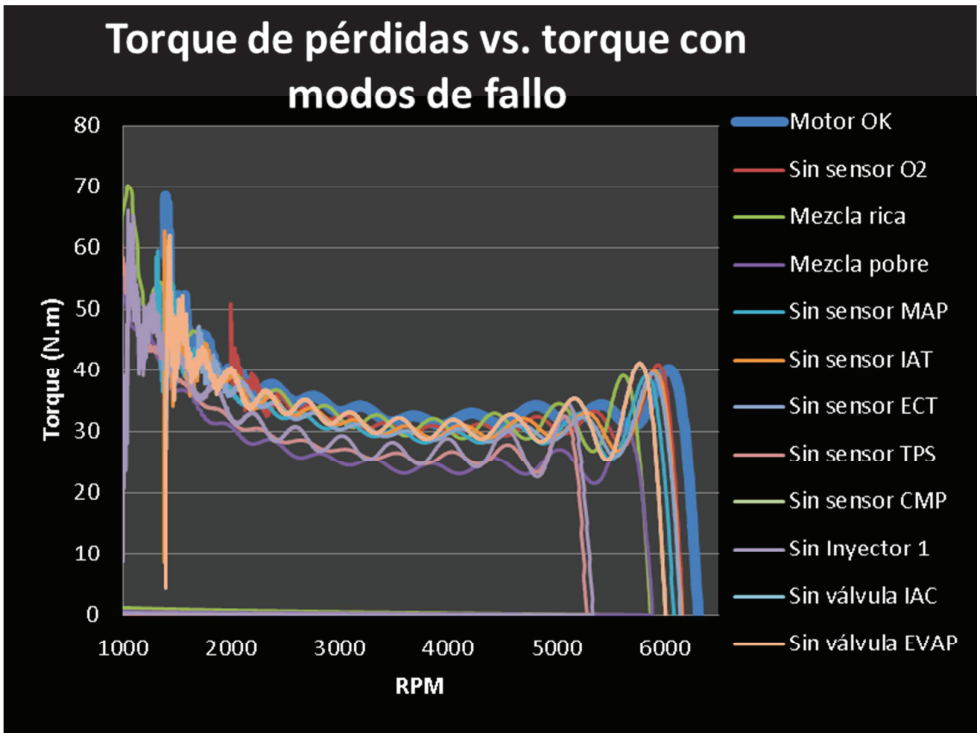

Figura. 3.4. Curvas de torque de pérdidas mecánicas por el método de aceleración libre con todos los modos de fallo inducidos. (Fuente: Autores).

Se muestra en la figura 3.4 las curvas características de torque de pérdidas mecánicas con todas las pruebas realizadas con los modos de fallo inducidos, donde a pesar que en algunas pruebas no alcanzan las mismas rpm todas las gráficas con respecto al patrón que son las 6500rpm, la tendencia siempre es constante en todo el régimen de revoluciones de entre 30N.m y 40 N.m donde se comprueba lo que se asume también al momento de definir la ecuación 1.13, donde se establece que el torque de pérdidas es constante en el régimen de revoluciones.

A continuación se detalla por elementos de importancia los resultados obtenidos de los modos de falla para un mejor análisis.

Bloque 1. Se muestra en la figura 3.5 la curva de potencia normal y los resultados obtenidos aplicando modos de fallo relacionados al sensor de oxígeno.

La curva de potencia con el motor OK alcanza los 47kW a 4500rpm. Con mezcla pobre se ve una disminución importante en todo el régimen de revoluciones, llegando a alcanzar la máxima potencia a las 5500rpm en 38kW, y a 4500 que es el máximo alcanzado sin modo de fallo llega hasta los 32kW lo que representa una caída de alrededor del 31,7% en la potencia.

Con mezcla rica se entiende que existe más aporte de combustible por lo que se muestra un ligero incremento a la potencia alcanzada, llegando al máximo valor a las 5500 rpm con 51kW, que representa un 8,5% de incremento.

Se muestra también la curva de potencia obtenida sin la señal del sensor de oxígeno, es decir con el conector desconectado, donde se alcanza una máxima potencia igual que en el caso sin modos de falla a las 4500rpm con un valor de 49KW que representa un incremento del 4,2% de potencia.

En el caso de las curvas características de torque mostradas en la figura 3.6, el patrón sin modo de fallo alguno alcanza los 218N.m a 1700 rpm. Cuando se aplica el modo de mezcla pobre el torque cae a 168N.m equivalente a un decremento del 23% a 1700 rpm. Cuando se aplica mezcla rica el torque se incrementa al máximo hasta 298 N.m a 1300 rpm siendo el 36,7% de incremento. Lo mismo sucede con deshabilitar el conector del sensor de O2 dejándolo sin señal, se muestra que alcanza los 265N.m a 1300 rpm siendo un incremento del 21,6%.

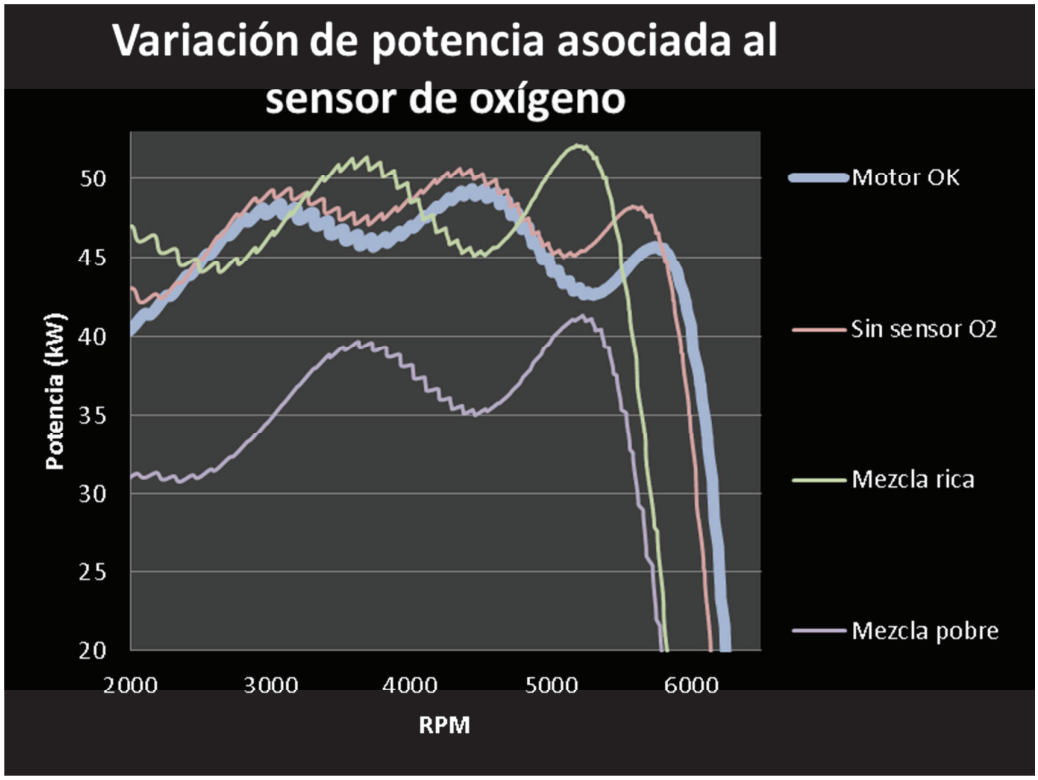

Figura. 3.5. Curvas de potencia normal sin fallos vs potencia con modos de fallo sin sensor de oxígeno, mezcla pobre y mezcla rica. (Fuente: Autores).

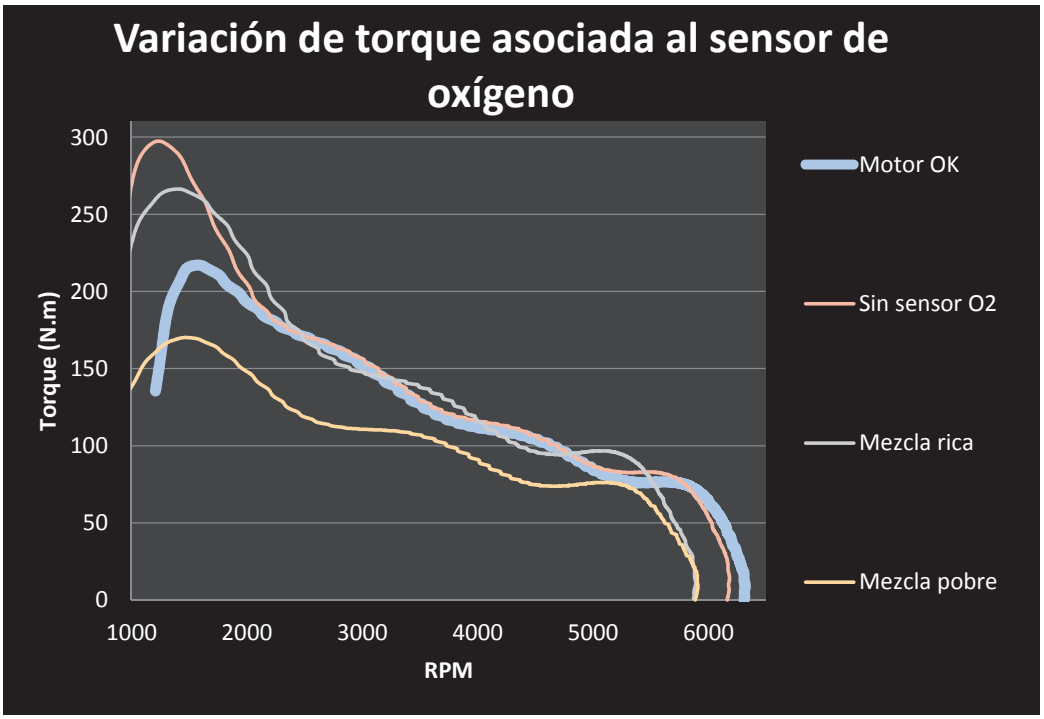

Figura. 3.6. Curvas de torque normal sin fallos vs potencia con modos de fallo sin sensor de oxígeno, mezcla pobre y mezcla rica.(Fuente: Autores).

Bloque 2: A continuación se muestra en la figura 3.7 la curva de potencia normal y los resultados obtenidos aplicando modos de fallo en sensor MAP, TPS y Sin inyector 1.

La curva de potencia sin modo de fallo como se sabe alcanza los 47KW a 4500 rpm. Los modos de fallo de Sensor MAP muestran una curva bastante parecida a lo largo de todo el régimen de revoluciones pero cae hasta 42KW a 4500 rpm que representa un 10,7% de disminución.

Al contrario del sensor MAP, el modo de fallo del sensor TPS a lo largo de todo el régimen de revoluciones se nota claramente que no sigue al comportamiento de la potencia sin modo de fallo, sino más bien intenta subir la potencia haciendo que la curva tenga oscilaciones importantes que inclusive se reflejan con la realidad al momento de realizar la prueba, resaltando además la importante caída de potencia en bajas rpm y la consecuente pérdida también en altas, lo que hace que inclusive no se pueda llegar hasta las 6500rpm que se alcanza con las otras pruebas e incluso a las 4500 rpm se tenga apenas 41 KW representando una caída del 12,8% en el máximo régimen alcanzado con las pruebas patrón.

El otro modo de fallo mostrado al inhabilitar un cilindro por medio del inyector, se nota un comportamiento evidente de disminución de la potencia del motor y tampoco se puede alcanzar el régimen máximo de hasta las 6500rpm como en las pruebas anteriores, pero la tendencia de la gráfica intenta mantenerse paralela a la curva sin modo de falla alcanzando a las 4500rpm los 27KW representando una caída del 42,55%

Con el torque sucede algo similar que con la potencia según se muestra en la figura 3.8. El torque máximo alcanzado sin modo de fallo que es de 218N.m a 1800rpm. El modo de fallo del sensor MAP muestra una curva bastante cercana a la curva sin modo de fallo alcanzando los mismos 218 N.m pero a un régimen más bajo de alrededor de 1500rpm. Con el sensor TPS deshabilitado la curva de torque nota también las mismas oscilaciones registradas en la curva de potencia debido al modo de fallo provocado, por lo que este cae dicho torque hasta los 155N.m a 1500rpm que representa una disminución del 28,9%. En el caso de deshabilitar un cilindro por medio del inyector la pérdida de torque es del 21,1% ya que alcanza hasta los 172 N.m a las 1500rpm, pero el comportamiento en todo el régimen de revoluciones es bastante paralelo a la curva patrón sin modo de fallo.

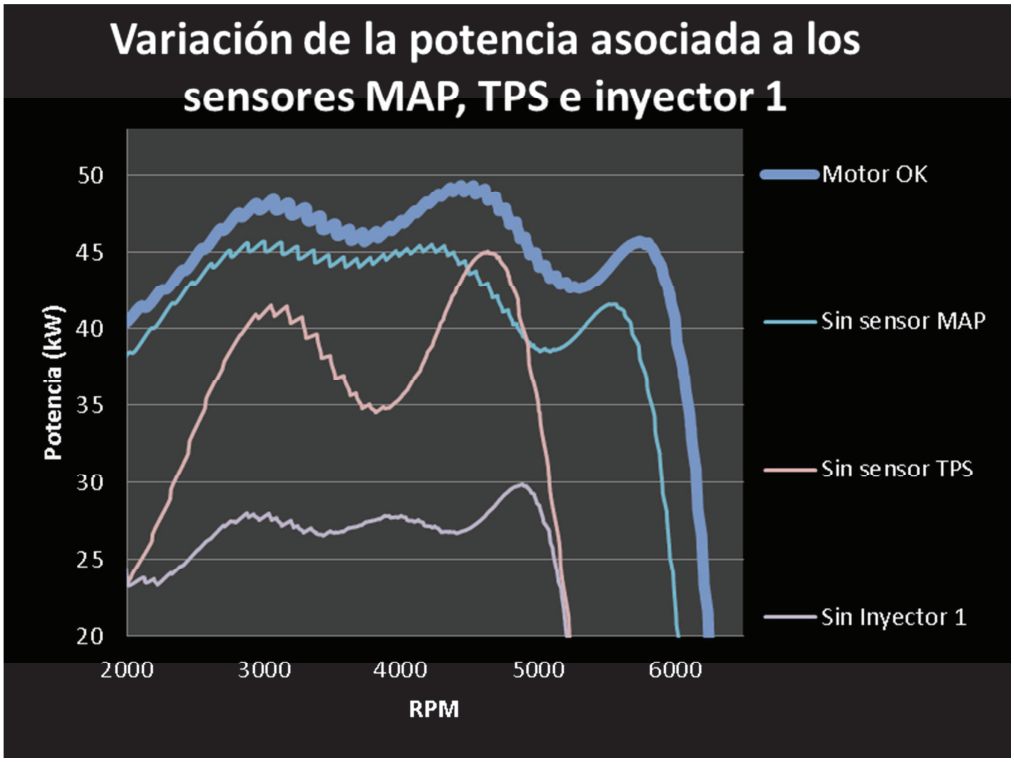

Figura. 3.7. Curvas de potencia normal sin fallos vs potencia con modos de fallo sin señal sensor map, sin señal sensor tps, sin inyector 1.
(Fuente: Autores).

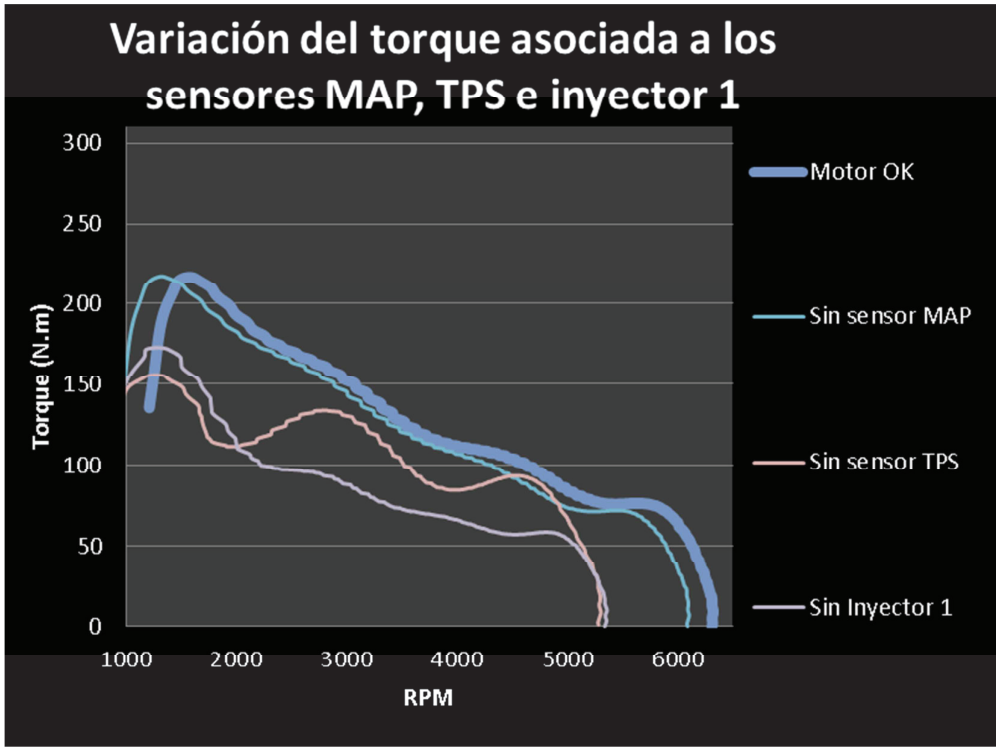

Figura. 3.8. Curvas de torque normal sin fallos vs torque con modos de fallo sin señal sensor MAP, sin señal sensor TPS, sin Inyector 1. (Fuente: Autores).

Bloque 3: A continuación se muestra la curva de potencia normal y los resultados obtenidos aplicando modos de fallo 5, 6, 8, 11, y 12 que corresponden a Sensor IAT, ECT, CMP, sin encendido en el cilindro 1 y sin Válvula EVAP, respectivamente.

Se ha decidido colocar estos modos de fallo frente a la gráfica patrón debido a la similitud y paralelismo que mantienen las curvas definidas con respecto a la curva patrón, que en algunos casos se ven ligeramente aumentado los valores de potencia en valores de hasta el 2% en ciertos regímenes de revoluciones, pero y en la mayoría de pruebas realizadas se muestra una disminución no más allá de entre el 2% y 7%, a excepción de la curva obtenida al aplicar la des habilitación de un cilindro por medio del encendido, siendo que representa el 43% de disminución de potencia como en el caso anterior que se deshabilito un cilindro por medio del inyector. Donde sí se evidencia una mayor diferencia en los valores alcanzados es en el rango de las 2500rpm hacia abajo y las 5000rpm hacia adelante.

En el caso del torque es similar el análisis según se muestra en la figura 3.10, donde para valores debajo de las 2200rpm la mayoría de pruebas realizadas difieren en la evolución y los valores máximos alcanzados, y a partir de este régimen de revoluciones los valores de torque son bastante similares y paralelos al comportamiento del motor sin modo de fallo, con diferencias de entre el 2% y 7% como máximo.

Sucede lo mismo al colocar el modo de fallo de deshabilitar un cilindro por medio del encendido frente a lo que sucede cuando se deshabilita el cilindro por medio de la desconexión del inyector.

Se nota que el torque de perdidas mecánicas para todas las pruebas realizadas siempre marca la misma tendencia constante en valores de entre 30N.m y 40 N.m lo que comprueba las afirmaciones anteriores con respecto a esta hipótesis.

Aquellas hipótesis que se plantearon en la tabla 6 y 7 se cumplen para estos modos de falla, pero se debe considerar que los porcentajes de variación para estas pruebas no son concluyentes al momento de realizar diagnóstico y se tendrán que recurrir a metodologías convencionales para contrastar dichos modos de fallo frente a este método.

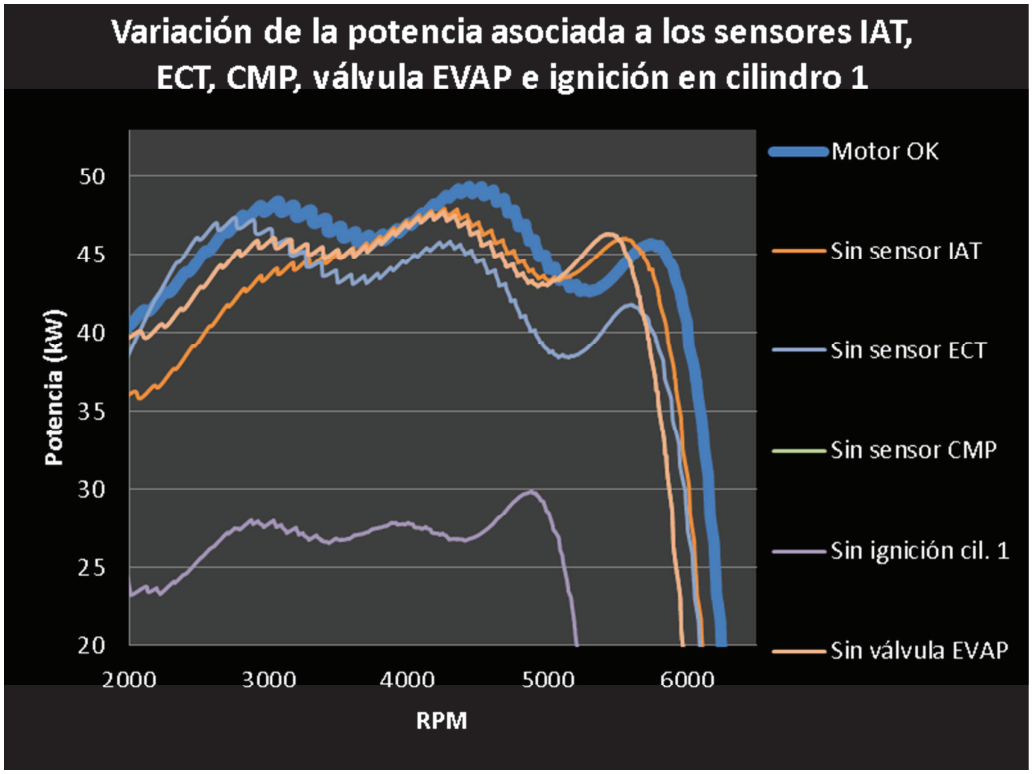

Figura. 3.9. Curvas de Potencia Normal sin Fallos vs Potencia con Modos de fallo Sin señal IAT, ECT, CMP, sin Ignición cilindro 1 y sin EVAP. (Fuente: Autores).

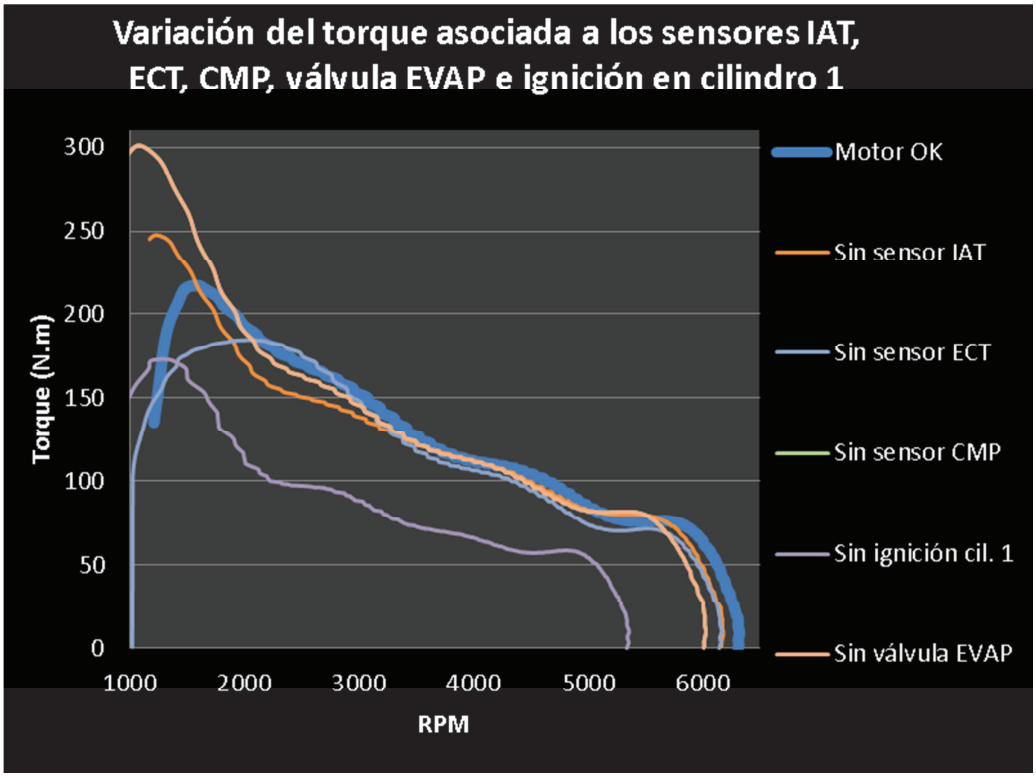

Figura. 3.10. Curvas de Torque Normal sin Fallos vs Torque con Modos de fallo Sin señal IAT, ECT, CPM, sin Ignición cilindro 1 y sin EVAP. (Fuente: Autores).

3.2 Desactivación sucesiva de cilindros.

Se muestra la curva de potencia normal y torque frente a los resultados obtenidos aplicando la desactivación sucesiva de cilindros del motor en la figura 3.11 y 3.12 respectivamente. La grafica de azul siendo la patrón sin modo de fallo alguno alcanza los 47kW a las 4500rpm, mientras que existen dos cilindros correspondientes al Nº2 y Nº3 que guardan una relación cercana en el rango de revoluciones y son las gráficas que más cercanas están a la curva patrón en valores de alrededor de 33kW a las 4500 rpm, lo que indica que estos dos cilindros por un lado aportan una proporción casi igual a la potencia total por individual pero estarían con menor aporte de forma individual a la potencia total alcanzada. A la vez si comparamos con graficas obtenidas con el cilindro Nº1 y Nº4 estos están más abajo de la curva patrón en alrededor de 28kW en las mismas 4500rpm, lo que significa que estos cilindros serían los que contribuyen en mayor medida a la potencia total por aportación individual de cada cilindro debido a que cuando son desactivados ya sea por encendido o combustible estos dejan de aportar esa potencia superior comparado a los otros cilindros Nº2 y Nº3. La misma lógica se establece para la curva de torque mostrada en la figura 3.12.

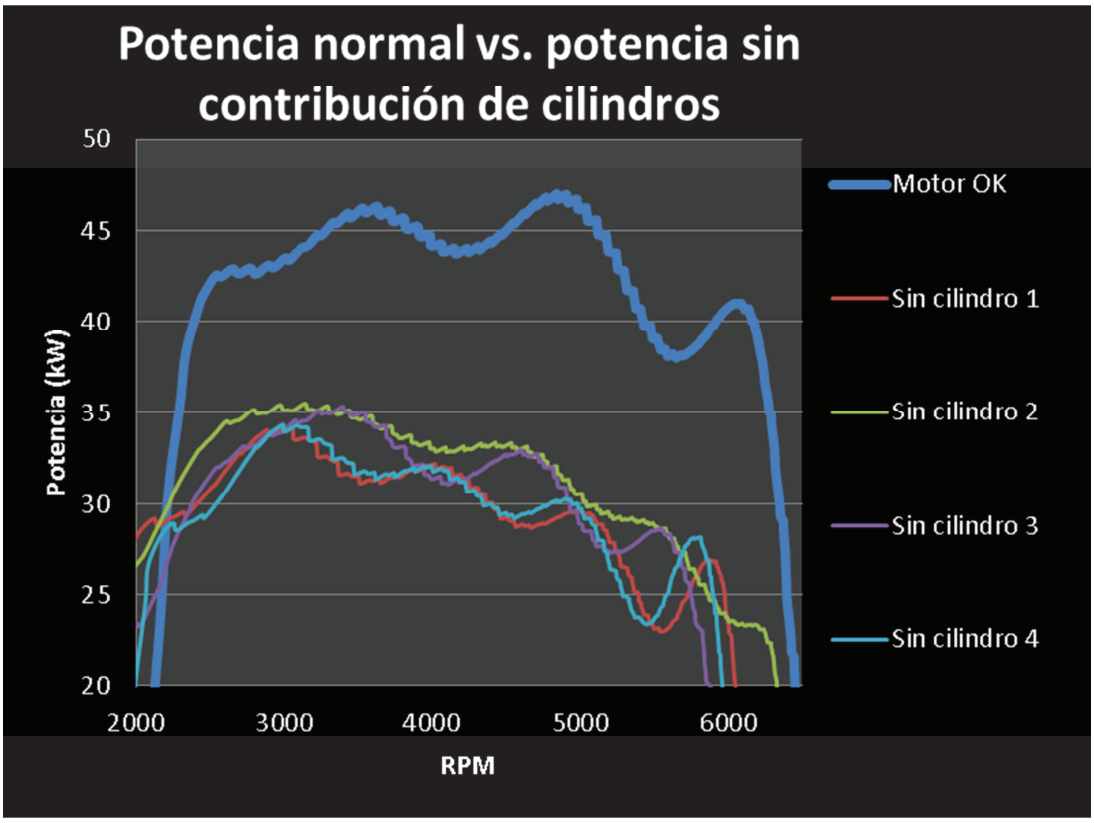

Figura. 3.11. Curvas de potencia normal vs curvas de potencia con la desactivación sucesiva de cilindros por medio de corte de combustible.
(Fuente: Autores).

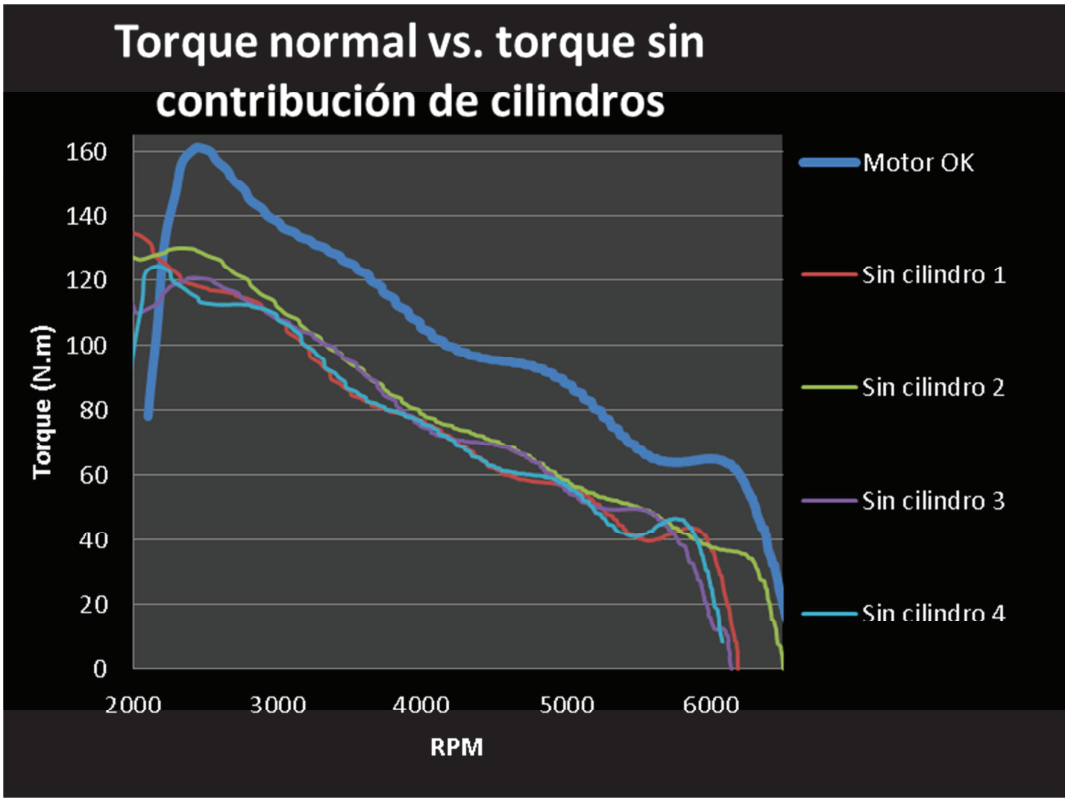

Figura. 3.12. Curvas de torque normal vs curvas de potencia con la desactivación sucesiva de cilindros por medio de corte de combustible por cilindro.
(Fuente: Autores).

3.3 Comparativa de motores por medio de curvas características normalizadas.

En este apartado se comparan los motores de cuatro vehículos diferentes a través de sus curvas características. En la tabla 10 se muestran algunas características generales de dichos motores.

Tabla 10. Características de los motores comparados.

Marca	Vehículo	Cilindraje (cc)	Diámetro pistón (mm)	Carrera pistón (mm)
Chevrolet	Aveo Emotion	1598	79	81.5
Hyundai	Accent	1599	76.5	87
Chevrolet	Spark	995	68.5	67.5
Peugeot	206	1587	78.5	82

(Fuente: Autores)

Como se puede observar, los motores del Chevrolet Aveo, del Hyundai Accent y del Peugeot 206 son muy similares en cuanto a su cilindrada (alrededor de 1600 CC.),

mientras que el motor del Chevrolet Spark presenta una cilindrada considerablemente inferior (aprox. 1000 cc).

La primera comparación que se hace entre estos motores es a través de la potencia y torque máximas que desarrollan. En la figura 3.13 y 3.14 2 se muestran sus curvas características respectivamente.

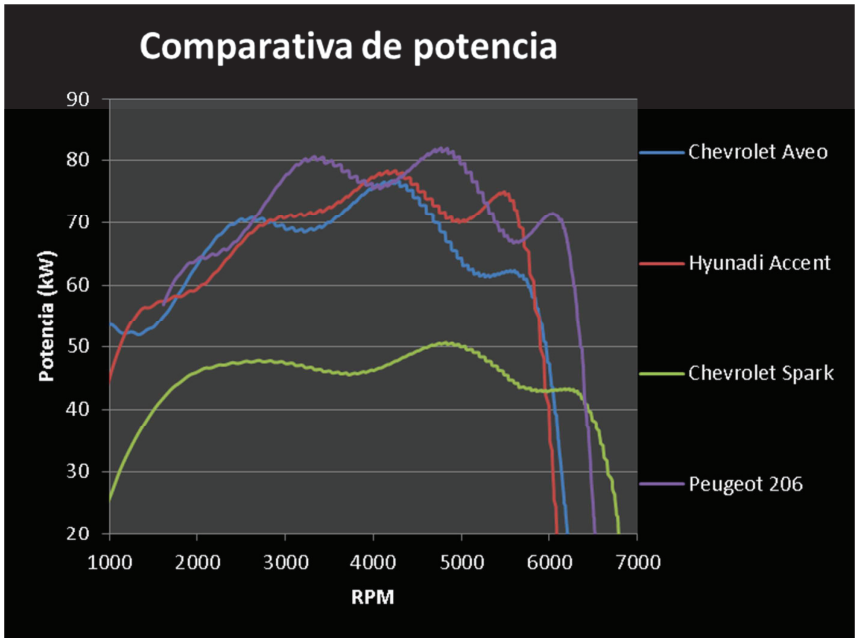

Figura. 3.13. Curva de potencia efectiva comparativa entre diferentes motores. (Fuente: Autores).

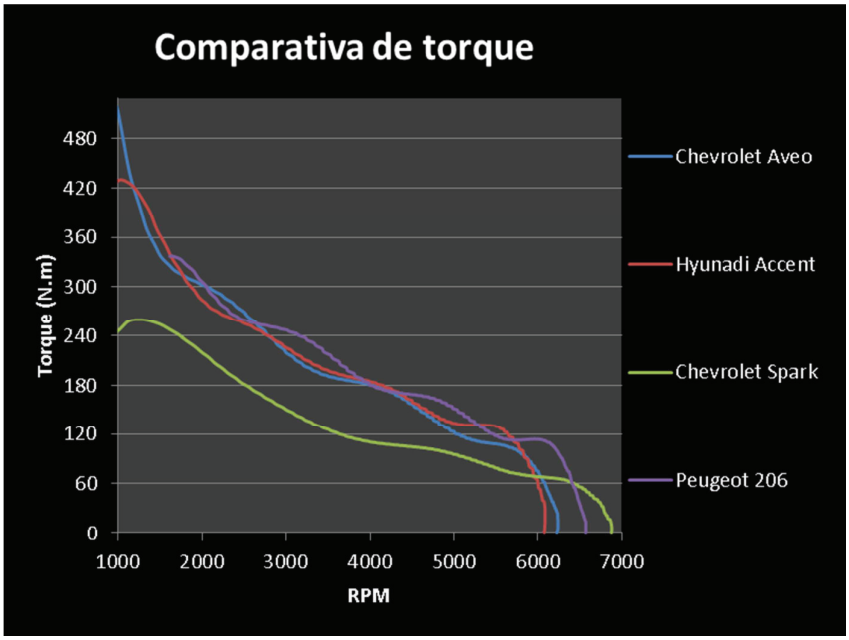

Figura. 3.14. Curva de torque comparativa entre diferentes motores. (Fuente: Autores).

En la tabla 11 se muestran los valores máximos de potencia desarrollados por cada uno de los motores.

Tabla 11. Resultados de Potencia de los motores comparados.

Marca	Vehículo	Potencia Max. (kW)	Proporción con respecto al más potente
Chevrolet	Aveo Emotion	76.8071	93.64%
Hyundai	Accent	78.2985	95.45%
Chevrolet	Spark	48.4705	59.09%
Peugeot	206	82.027	100.00%

(Fuente: Autores)

Se comparan las diferentes potencias máximas entre ellas mismas, tomando como referencia la potencia máxima generada por el Peugeot 206 y expresando qué proporción de ésta son capaces de generar los demás motores.

Se observa que entre los tres motores con cilindrada similar, la potencia máxima que desarrollan es parecida, aunque el Peugeot 206 presenta una potencia máxima ligeramente superior. Por otro lado es de anotar que el Chevrolet Spark es el que presenta la menor potencia, en concordancia con su baja cilindrada.

A continuación se comparan los cuatro motores a través de sus curvas características normalizadas, las cuales suponen un cambio de escala que permite evaluar el desempeño de los diferentes motores independientemente de su tamaño. En las figura 3.15 y 3.16 se muestran las curvas características normalizadas de los motores.

Haciendo un símil con las curvas características convencionales, es de resaltar que en las normalizadas en vez de mirar la evolución de los parámetros en función del régimen de giro del motor, se hace en función de la velocidad media de sus pistones; en vez de comparar los motores por el torque que generan, se hace por la presión media efectiva (pme); y en vez de compararlos por su potencia, se hace por la carga térmica.

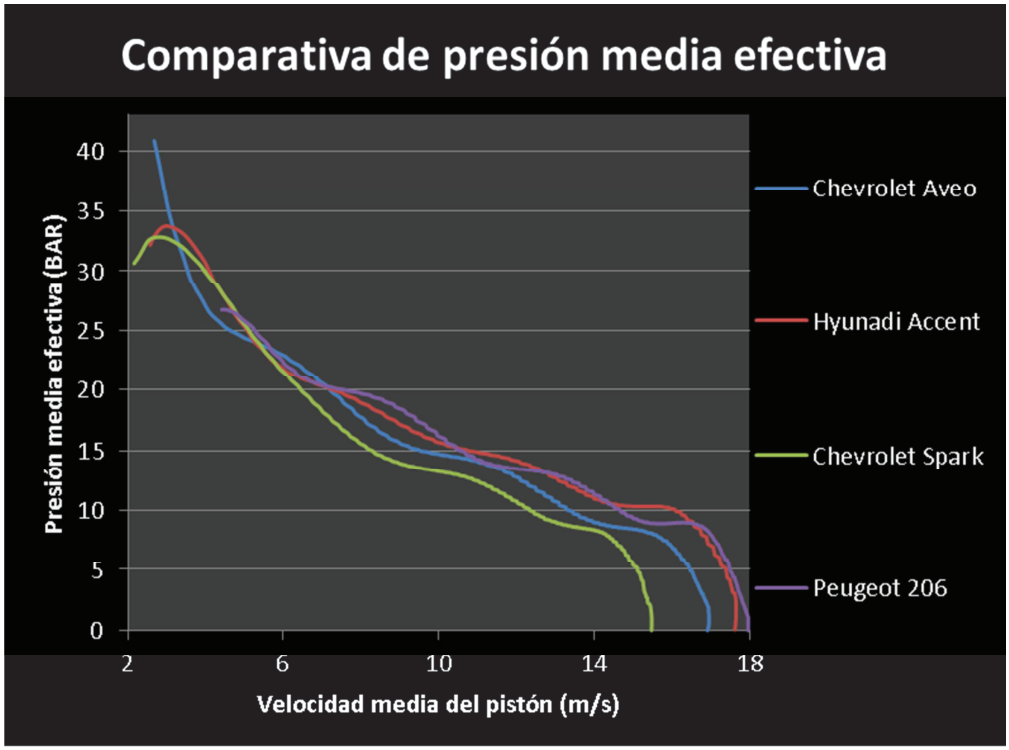

Figura. 3.15. Curva de presión media efectiva comparativa entre varios motores (Fuente: Autores).

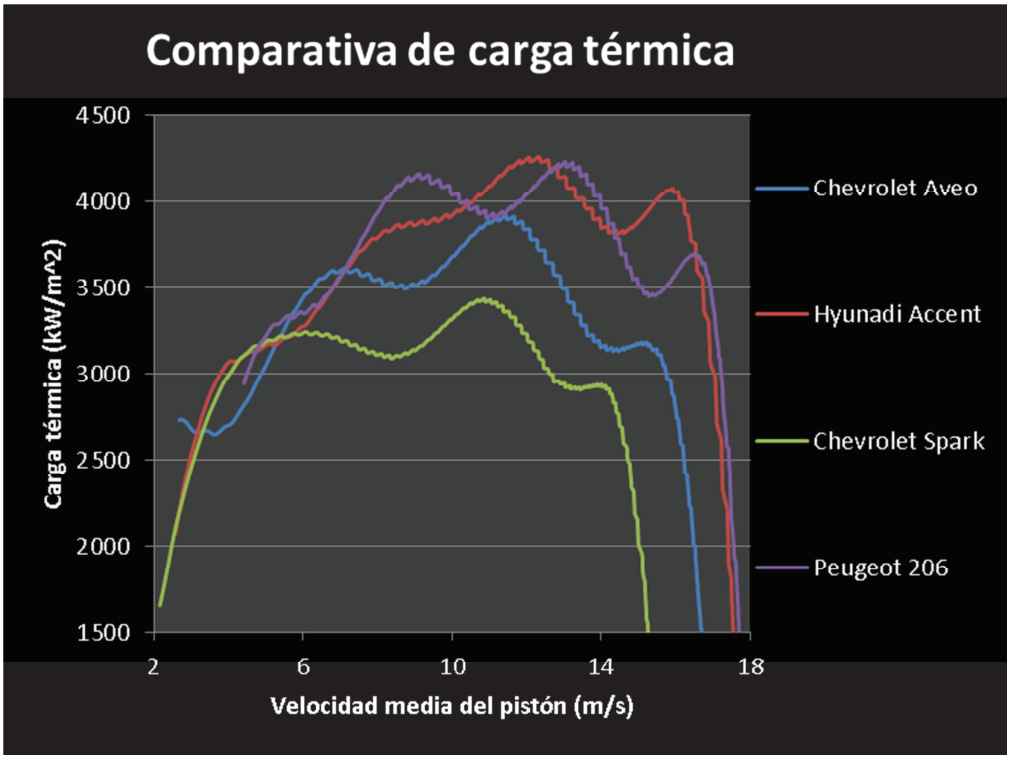

Figura. 3.16. Curva de carga térmica comparativa entre varios motores. (Fuente: Autores).

En la tabla 12 se muestran los valores máximos de la carga térmica desarrollada por cada uno de los motores.

Tabla 12. Resultados de Carga Térmica de los motores comparados.

Marca	Vehículo	Carga térmica Max. (kW/m^2)	Proporción con respecto al de mayor carga térmica
Chevrolet	Aveo Emotion	3917.4	91.98%
Hyundai	Accent	4258.7	100.00%
Chevrolet	Spark	3288.1	77.21%
Peugeot	206	4237.1	99.49%

(Fuente: Autores)

Al comparar dichas cargas térmicas se observa que el orden en el que se situaron los cuatro motores en cuanto a potencia, sufre una modificación: ahora el motor que presenta el mejor desempeño es el del Hyundai Accent, situando al Peugeot 206 en el segundo lugar. El Aveo y el Spark mantienen sus posiciones: tercero y cuarto puesto respectivamente. Es de resaltar que entre los tres motores con cilindrada similar, sus valores máximos de carga térmica siguen siendo muy similares. Por parte del Spark se observa que la brecha con respecto al vehículo que tiene las mejores prestaciones se redujo al compararlo por medio de la carga térmica; sin embargo por tratarse de los parámetros normalizados, se concluye que el motor del Spark es el más básico de todos; por un lado es el que presenta los niveles más bajos de pme y de carga térmica y adicionalmente su velocidad media del pistón es inferior a la de los demás motores, a pesar de que es el que trabaja a un mayor régimen de giro.

3.4 Análisis del comportamiento de la potencia a diferentes alturas sobre el nivel del mar.

Primero hay que definir un método para establecer la temperatura y la presión del aire de admisión del motor para determinar la altura sobre el nivel del mar del sitio donde se realiza la prueba.

Para lo anterior es posible utilizar un par de sensores a bordo del mismo vehículo: el sensor de temperatura del aire de admisión (IAT) y el sensor de presión de aire en el múltiple de admisión (MAP).

Para la utilización del sensor IAT para el propósito planteado, es preciso conocer primero cómo varía el voltaje de la señal que genera en función de la temperatura. En el manual del vehículo se encuentra dicha información, la cual se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Valores de voltaje de operación del sensor IAT.

T (°C)	Voltaje MIN Fabricante (V)	Voltaje MAX Fabricante (V)	Voltaje Promedio Fabricante (V)
0	4	4.4	4.2
20	3.3	3.7	3.5
40	2.5	2.9	2.7
80	1	1.4	1.2

(Fuente: Manual del vehículo Hyundai Accent Verna)

Si se grafican los anteriores valores se concluye que el comportamiento del sensor es lineal por lo menos en el rango de funcionamiento. Ajustando los valores obtenidos a una recta y conociendo su ecuación, entonces es posible determinar la temperatura en función del voltaje medido. A continuación se muestra la gráfica obtenida en la figura 3.17, con la recta que la ajusta y su respectiva ecuación.

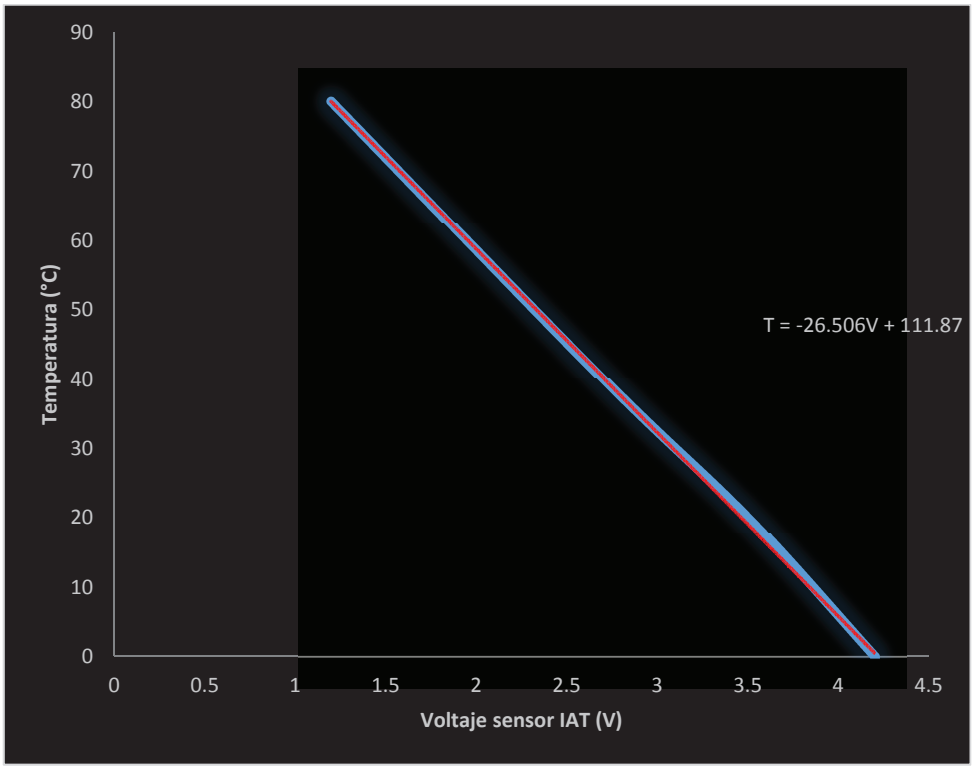

Figura. 3.17. Voltaje del Sensor IAT vs Temperatura.
(Fuente: Autores).

El fabricante no suministra el comportamiento del sensor MAP, pero sin embargo es posible determinarlo siguiendo un procedimiento simple: Por la toma de vacío del sensor se le conecta un vacuómetro con una T y succionando con una bomba de vacío por el

extremo libre se genera un valor leído se registra junto con el voltaje de la señal del sensor.

Cuando el vacuómetro se encuentra expuesto a la presión atmosférica, marca 0 inHg (Naturalmente es así puesto que su función es medir sólo la presión de vacío) y conforme se succiona, éste comenzará a registrar una determinada presión vacuométrica. Entonces para convertir dicha presión en el equivalente a la presión atmosférica, se mide con un reloj la presión atmosférica (73.6 kPa) y a ésta se le resta cada una de las presiones leídas en el vacuómetro.

En la tabla 14 se muestra el comportamiento del sensor MAP, donde se ven las presiones leídas del vacuómetro en diferentes unidades, se muestra el voltaje de la señal del sensor MAP y finalmente se muestra la presión atmosférica equivalente en diferentes unidades también.

Tabla 14. Comportamiento del sensor MAP.

Presión en Vacuometro (inHg)	**Presión en Vacuometro (kPa)**	**Presión en Vacuometro (PSI)**	**Voltaje de Señal MAP Medido (V)**	**Presión Atmosférica Local(kPa)**	**Presión Atmosférica Local (PSI)**
0	0	0	2.8	73.6	11.04
2	6.77	1.0155	2.6	66.83	10.02
3	10.16	1.524	2.5	63.44	9.52
5	16.93	2.5395	2.2	56.67	8.50
7	23.7	3.555	2	49.9	7.49

(Fuente: Autores)

A continuación en la figura 3.18 se muestra la gráfica del comportamiento del sensor MAP obtenida a partir de los datos anteriores. De manera análoga al sensor IAT, se observa un comportamiento lineal; igualmente se traza una recta que ajusta todos los valores y se obtiene la ecuación de dicha recta.

Ya conocidos los comportamientos de los sensores, descritos por las ecuaciones obtenidas, se puede determinar la presión y la temperatura en cualquier lugar con base en los voltajes de sus señales. Se realizaron mediciones de la potencia generada por el motor en estudio a diferentes altitudes con respecto al nivel del mar.

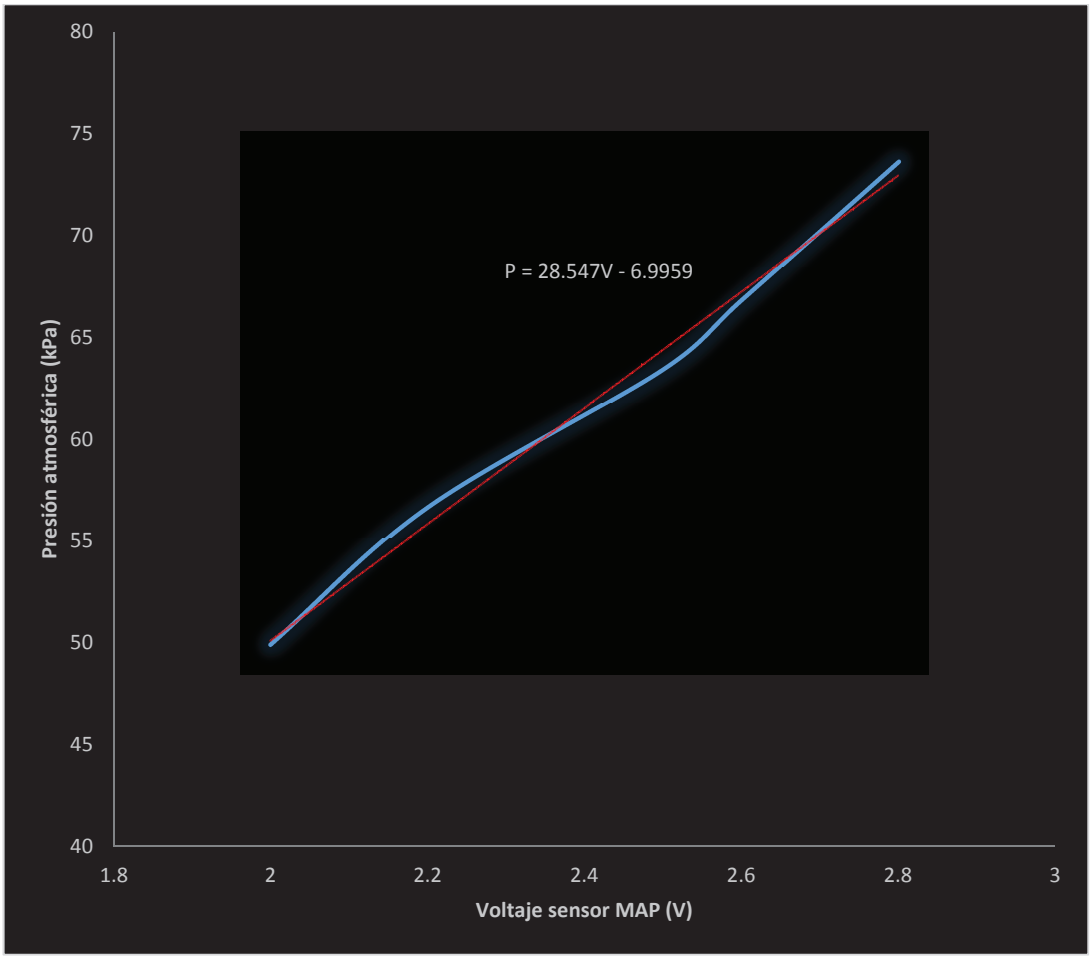

Figura. 3.18. Voltaje del sensor MAP vs presión atmosférica obtenida.
(Fuente: Autores).

La ruta tomada para realizar las diferentes mediciones parte desde la ciudad de Azogues hasta la ciudad de Cochancay provincia del Cañar en Ecuador. Se muestra en la figura 3.19 tomada de google maps el trazo seguido con la diferencia de altura aproximada que entrega esta herramienta.

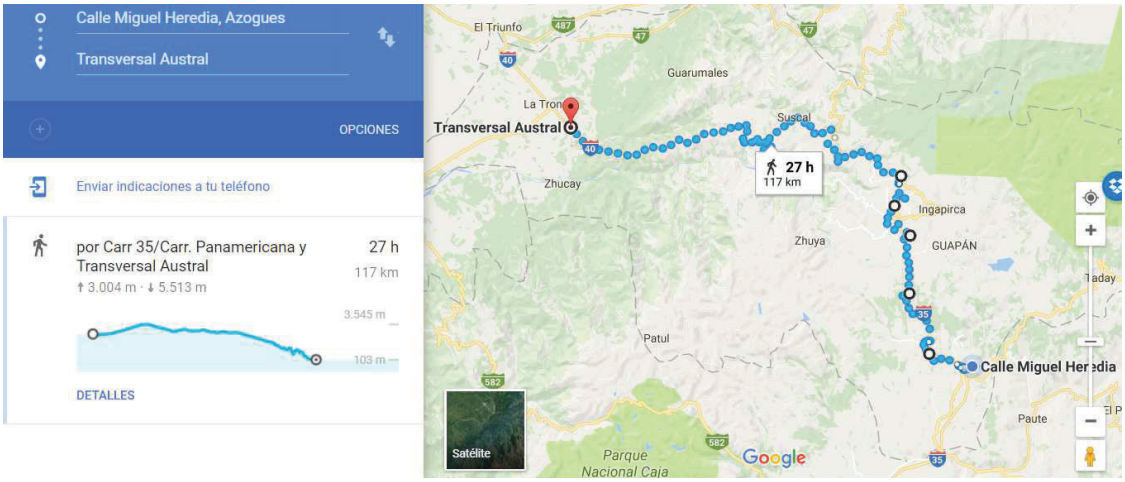

Figura. 3.19. Ruta tomada para el análisis realizar la pruebas de comportamiento a diferentes alturas. (Fuente: Google Maps.).

En la tabla 15 se relacionan los diferentes lugares donde se realizaron las pruebas, los voltajes medidos en los sensores MAP e IAT, los valores calculados de presión (con base en este dato la altura sobre el nivel del mar) y temperatura.

Tabla 15. Resultados de presión, temperatura y altitudes obtenidas.

Lugar	Voltaje MAP (V)	Presión Atmosférica (kPa)	Presión Atmosférica (PSI)	Altitud (m.s.n.m)	Voltaje IAT (V)	Temperatura (°C)	Temperatura (°K)
Cochancay	3.92	104.91	15.74	127	2.64	41.89	315.04
La Delicia	3.59	95.49	14.32	578	1.96	59.92	333.07
Javin	3.40	90.06	13.51	1144	2.78	38.18	332.00
Chil Chil	3.20	84.35	12.65	1681	2.70	40.30	313.45
La Dolorosa	2.89	75.50	11.33	2697	2.70	40.30	313.45
Bueran	2.60	67.23	10.08	3635	3.10	29.70	302.85

(Fuente: Autores)

Para la estimación de la altura con base en la presión atmosférica y la temperatura del aire, se utiliza la siguiente ecuación que las relaciona (Puerto, 2011):

$$z = \frac{R.T_m}{g}.ln\frac{P_0}{P}$$

Donde:

$z\ (m)$: Altitud.

$P_0\ (kPa)$: Presión al nivel del mar = 101.32 kPa.

$P\ (kPa)$: Presión a la altura z.

R: Constante del aire seco = 287.06

$T_m\ (K)$: Temperatura media en la altura z.

$g\ (\frac{m}{s^2})$: Aceleración de la gravedad = 9.81.

En cada lugar se realizaron cuatro mediciones de potencia y se obtuvieron los siguientes resultados de la tabla 16, mientras en la figura 3.19 se muestra la potencia promedio obtenida a diferentes alturas sobre el nivel del mar en la que se realiza cada prueba.

Tabla 16. Resultados de potencia máxima obtenida a diferentes alturas.

Ubicación	**Altura (m.s.n.m)**	**Potencia máx. (kW)**
Cochancay	127	74.30
		61.28
		74.89
		65.27
		Promedio: 68.93
La Delicia	578	59.47
		64.08
		59.67
		64.16
		Promedio: 61.85
Javin	1144	61.13
		56.21
		61.25
		61.76
		Promedio: 60.09
Chil Chil	1681	57.66
		53.12
		58.09
		55.66
		Promedio: 56.13
La Dolorosa	2697	47.66
		45.33
		50.42
		49.52
		Promedio: 48.24
Buerán	3635	45.35
		45.90
		47.09
		47.19
		Promedio: 46.38

(Fuente: Autores)

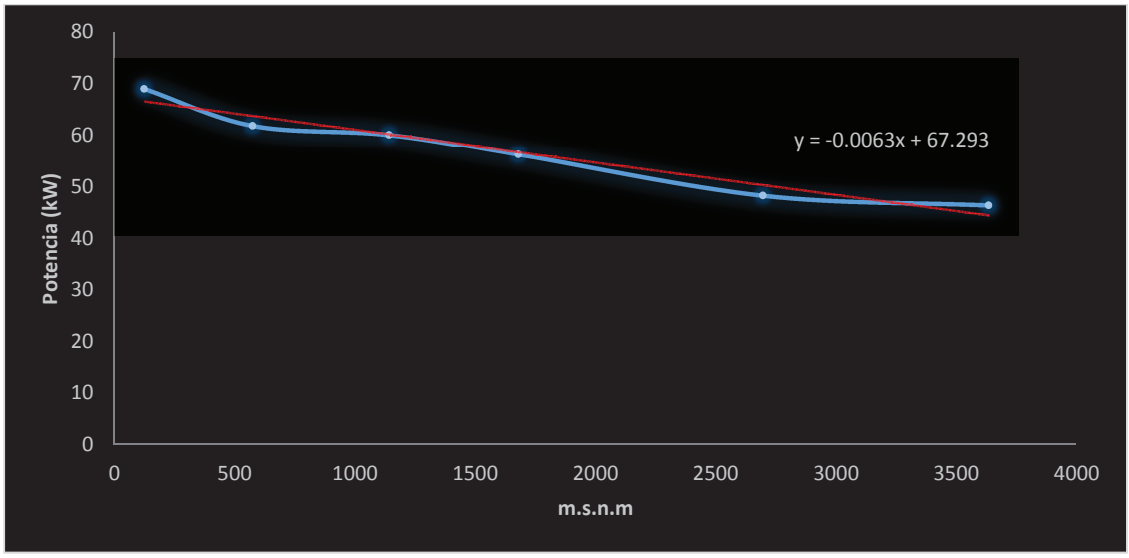

Figura. 3.20. Potencia obtenida a diferentes alturas sobre el nivel del mar.
(Fuente: Autores).

Como se puede observar, la potencia es inversamente proporcional a la altura; por cada 100 m.s.n.m más arriba, el vehículo pierde 0.63 kW equivalente a aproximadamente un 1% del valor medido sobre el nivel del mar.

Por otro lado cabe resaltar que conforme aumenta la altura, la potencia medida disminuye lo que confirma que el método es capaz de estudiar este tipo de comportamientos.

3.5 Discusión

Los resultados obtenidos indican que la confiabilidad del método para presentar resultados es correcta con respecto a las pruebas realizadas siendo posible determinar modos de fallo por medio de la medición de las curvas características del motor en los casos específicos como daños permanentes en los sensores MAP, TPS, Sensor de Oxigeno y desactivación o falla de algún cilindro, así como también se afirma que existen sensores y actuadores que al presentar un modo de fallo permanente, estos no afectan en gran medida el comportamiento de la potencia y torque del motor por lo que se tendrá que recurrir a métodos convencionales de diagnóstico, sin desmerecer que el método es capaz de sensar estas pequeñas diferencias o afectaciones por estos modos de fallo y ser capaz de determinar el porcentaje de afectación que sufren las curvas características del motor.

Los resultados y facilidades del método de aceleración libre frente al método de medición por banco dinamométrico son cercanas si tomamos como referencia la metodología de medición que se debe aplicar, donde el principal factor para el desarrollo del método de aceleración libre siempre será mayor la exigencia el poder determinar el momento de

inercia del motor debido a las complicaciones técnicas y metodológicas que implican diseñar, fabricar y acoplar la inercia adicional; y realizar posterior el procedimiento para obtener dicho momento de inercia; o llevar al menos una vez el motor al banco dinamométrico para poder estimarlo y con esto fijar un valor con el cual se puedan realizar estudios válidos.

4. CONCLUSIONES

- Los esfuerzos para desarrollar el método de la aceleración libre de una manera económica son de utilidad a la hora de replicar con esta tesis estudios futuros sobre este metodo. Dentro de esto se puede mencionar el uso de una tarjeta de sonido de un computador portatil como tarjeta de adquisición de datos, el uso de un software gratuito de grabación de sonido y el uso de la señal del sensor CKP, que va a bordo de todos los vehículos con sistemas de inyección electrónica, como medio para capturar la frecuencia de giro del motor, entre otros.
- Las pérdidas mecánicas en el motor no se ven afectadas por las pruebas realizadas, por lo tanto los análisis de los resultados se centran en las curvas de torque y de potencia obtenidos.
- De acuerdo con la comparación de los resultados de medición de potencia del motor obtenidos en un banco dinamométrico y el método de la aceleración libre, se evidencia que el segundo tiene la capacidad de sensar adecuadamente la proporción en la que decae la potencia al inducir un determinado fallo, independientemente del valor de la potencia en sí mismo, lo cual marcaría el comportamiento real del motor si se utilizara cualquiera de los dos métodos para caracterizar modos de fallo específicos. Se puede calcular un factor de proporcionalidad entre los resultados obtenidos por el método de la aceleración libre y los obtenidos en un banco dinamométrico para obtener los mismos resultados. Para el caso de este estudio, dicho factor de proporcionalidad es igual a 2.8.
- El método de la aceleración libre para el cálculo del torque y de la potencia depende directamente de la capacidad que se tenga para hacer una correcta medición de la aceleración del motor. En este sentido, se comprueba que el método y las herramientas utilizadas son las adecuadas, al comparar los resultados con un trabajo de investigación similar que hace uso también del método de la aceleración libre.
- Los modos de fallo asociados al malfuncionamiento del sensor de oxígeno presenta variaciones en la potencia de hasta un 31,7% cuando se simula una mezcla aire-combustible rica y con variaciones de hasta un 8.5% cuando se simula una mezcla pobre.
- La ausencia de la señal del sensor TPS influye de manera considerable en la potencia del motor: su comportamiento es errático a lo largo de los distintos regímenes de revoluciones, que inclusive llegan tan sólo hasta las 4500 rpm, frente a las 6500 rpm habituales a las que llega el motor bajo condiciones normales. Además presenta una caída del 12,8% en la potencia máxima alcanzada.

- Los fallos asociados a los sensores MAP, IAT, ECT y CMP, así como los asociados a la válvula EVAP, no tienen incidencias representativas en la potencia del motor, al no superar la variación de su máximo valor en más del 7%.
- Al inhabilitar un cilindro (ya sea a través de la desconexión de su respectivo inyector o a través de la interrupción del encendido) se presenta una caída de potencia del 43%.
- La medición de potencia por el método de la aceleración libre puede usarse como una herramienta para presumir problemas con el sensor TPS o problemas con desempeño de cualquiera de los cilindros, ya que las curvas de potencia obtenidas bajo los modos de fallo asociados a estos componentes son muy particulares. Así mismo se puede utilizar el método para el diagnóstico del estado de compresión de los diferentes cilindros al inhabilitar uno a uno midiendo la respectiva potencia en cada caso. Luego se comparan las curvas obtenidas y se asume que aquel cilindro cuyo aporte a la potencia total del vehículo sea la menor, es el que presenta problemas de compresión.
- Al comparar a través de sus curvas características normalizadas los motores de un Chevrolet Aveo, un Hyundai Accent, un Peugeot 206 y un Chevrolet Spark, se encontró que a pesar de que el Peugeot 206 es el más potente, el Hyundai Accent es el que presenta una mayor carga térmica; es decir, es el motor con el mejor desempeño.
- La portabilidad de los elementos necesarios para la medición de la potencia por el método de la aceleración libre facilita hacer el análsis de la variación de la potencia en función de la altura sobre el nivel del mar. De acuerdo con los resultados obtenidos al realizar la medición de potencia en el vehículo de pruebas a diferentes alturas se concluye que la potencia es inversamente proporcional a la altura; por cada 100 m.s.n.m más arriba, el vehículo pierde 0.63 kW equivalente a aproximadamente un 1% del valor medido sobre el nivel del mar.

Referencias Bibliográficas

[1] Alonso, M., & Finn, E. (1967). Fundamental university physics. (D. Lazarus, Ed.) Washington D.C., Estados Unidos: Addison Wesley.

[2] Beer, F. P., Johnston, E. R., Clausen, W. E., & Staab, G. H. (2004). Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica. (7 ed.). (S. C. Peláez, Ed., & G. N. Cazares, Trad.) México: McGraw-Hill.

[3] Bermúdez, V., & Tormos, B. (2011). Pérdidas mecánicas. En F. Payri, & J. M. Desantes, Motores de combustión interna alternativos. (págs. 152-172). Barcelona, España: Reverté.

[4] Cargua Colcha, F. A., & Castelo Valdivieso, J. C. (2017). Determinación de la variación par motor, potencia y pérdidas mecánicas en un motor de encendido provocado (MEP) en función de la presión atmosférica y temperatura ambiente a través del método de la aceleración libre. (Tesis de postgrado). Quito: Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

[5] Company., H. M. (01 de 01 de 2002). Manual del Fabricante Hyundai Accent Verna. Manual del Fabricante Hyundai Accent Verna. Korea, Korea, Korea: Korea.

[6] Hibbeler, R. (2004). Mecánica vectorial para ingenieros. Estática. (10 ed.). (G. Trujano Mendoza, Ed.) México: Pearson Prentice Hall.

[7] Labcenter Electronics Ltd. (1988). Proteus Design Suite (Versión 8.6 SP2) [Software] Recuperado de Labcenter Electronics Ltd: http://www.labcenter-electronics.com.

[8] Lecuona, A., & Rodríguez, P. A. (2011). Parámetros básicos. En F. Payri, & J. M. Desantes, Motores de combustión interna alternativos. (págs. 44-70). Barcelona, España: Reverté.

[9] Mazzoni, D., & Dannenberg, R. (28 de Mayo de 2000). Audacity (Versión 2.1.3) [Software] Recuperado de Audacity: http://www.audacityteam.org.

[10] Moler, C. (1984). MATLAB (Versión R2011a) [Software] Recuperado de MathWorks: https://www.mathworks.com/product/ltc/matlab.html.

[11] National Instruments. (1986). NI LabVIEW (Versón 2013) [Software] Recuperado de National Instruments: http://www.ni.com/labview.

[12] Pierce, R. (5 de Octubre de 2011). Varianza y desviación estándar. Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de Disfruta las matemáticas: <http://www.disfrutalasmatematicas.com/datos/desviacion-estandar.html>

[13] Puerto, E. A. (26 de 02 de 2011). Presión Atmosférica. Obtenido de DIPAC "Diseño e ingeniería de ventilación y climtización".: https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/#comments

[14] Rodríguez, P. A., & Nogueira, J. I. (2011). Curvas características y aplicaciones. En F. Payri, & J. M. Desantes, Motores de combustión interna alternativos. (págs. 952-978). Barcelona, España: Reverté.

[15] Sepúlveda, E. M. (21 de Marzo de 2016). Aceleración. Recuperado el 11 de Junio de 2016, de Física en línea: http://www.fisicaenlinea.com/04cinematica/cinematica08-aceleracion.html

[16] Swanson, J. (1970). Ansys Workbench (Versión 14.0) [Software] Recuperado de Swanson Analysis Systems, Inc.: http://www.ansys.com.

ANEXO I.

METODOLOGIA PARA REPRODUCIR MODOS DE FALLO EN SENSORES Y ACTUADORES

Modo de Falla N° 1:

Fallo de Funcionamiento del sensor de Oxígeno: El sensor de oxigeno no da señal, la unidad de control trabaja en ciclo abierto. Siendo así, para reproducir este modo de fallo se debe interferir en la ECU el pin 18 que es la entrada de señal del sensor, o en su defecto interrumpir directamente el pin 2 en su salida tal como se muestra en la Figura 1. Esto simulará un fallo en el funcionamiento del sensor de oxígeno.

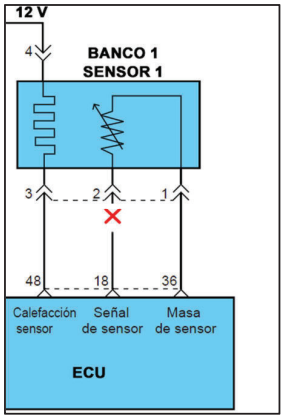

Figura.1. Esquema para reproducir modo de falla N° 1. (Fuente: Manual de fabricante vehículo Hyundai Accent Verna.)

Modo de Falla N° 2:

Mezcla de Combustible demasiado pobre: Para provocar una mezcla pobre se debe interrumpir el pin 2 de salida de la señal del sensor y colocar un potenciómetro tal como se muestra en la Figura 2. Deberíamos controlar la salida del potenciómetro hasta la ECU para que quede fijo un valor de entre un valor de alrededor de 0.1V – 0.15V.

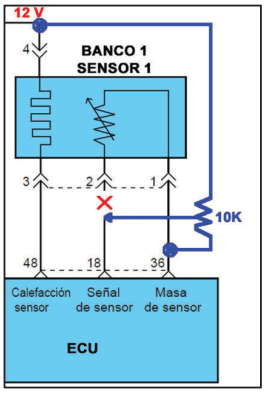

Figura. 2. Esquema para reproducir modo de falla N° 2 y 3. (Fuente: Manual de fabricante vehículo Hyundai Accent Verna.)

Modo de Falla N° 3:

Mezcla de combustible demasiado rica: Exceso de combustible en el motor y no es quemado totalmente, aumento de consumo de combustible.

Para provocar una mezcla rica se debe interrumpir el pin 2 de salida de la señal del sensor y colocar un potenciómetro tal como se muestra en la figura anterior. Se debería controlar la salida del potenciómetro hasta la ECU para que quede fijo un valor de entre 0.85V – 0.90V.

Modo de Falla N° 4:

Comprobación de Rango se sensor MAP alto / bajo:

Para reproducir un modo de fallo de este tipo se puede interrumpir la señal que va hasta la ECU, a continuación se muestra la Figura 3 que describe cómo hacerlo.

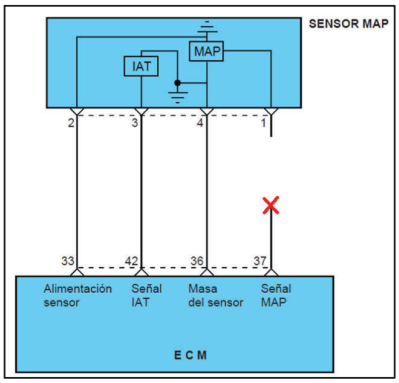

Figura. 3. Esquema para reproducir modo de falla 4. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 5:

Señal alta de circuito de temperatura de aire de admisión. Este código indica que el sensor IAT o el ECM están leyendo una temperatura inferior a la esperada después de que el motor se ha calentado.

Para reproducir este fallo se debe interrumpir la salida de señal del sensor en el pin número 3, como se muestra en la Figura 4.

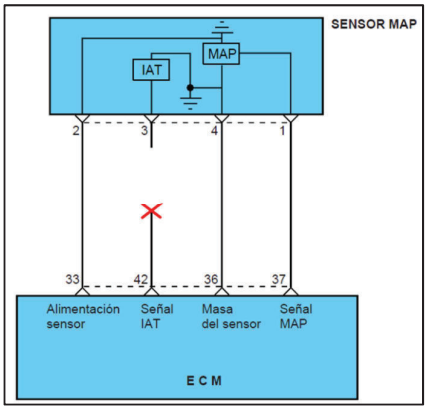

Figura. 4. Esquema para reproducir modo de falla 5. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 6:

Señal alta de circuito de temperatura de refrigerante de motor. La unidad de control no ajusta correctamente la mezcla. La ECU grabará el DTC P0117 y la luz de indicador de funcionamiento defectuoso (MIL) se encenderá si el sensor ECT muestra una temperatura inferior -49 F (-45°C) durante 0,2 segundos durante dos ciclos de excitación. La ECU grabará el DTC P0118 y la luz de indicador de funcionamiento defectuoso se encenderá si el sensor ECT informa de una temperatura superior a 284 F (140 °C) durante 0,2 segundos durante dos ciclos de conducción. Para reproducir este fallo se debe interrumpir la salida de señal del sensor en el pin número 1, como se muestra en la Figura 5.

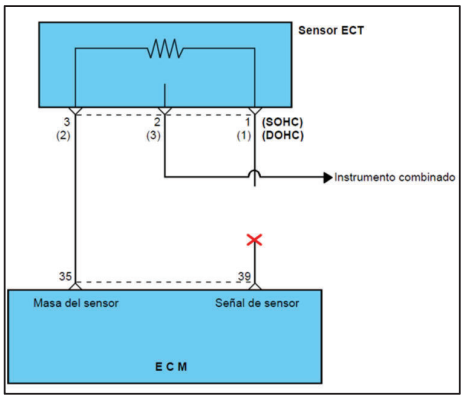

Figura. 5. Esquema para reproducir modo de falla 6. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 7:

Problema de Rango o rendimiento del circuito del sensor TPS. Provoca inestabilidad de ralentí, problemas de desarrollo en la aceleración del motor. Para reproducir este fallo se

debe interrumpir la salida de señal del sensor en el pin número 1, como se muestra en la Figura 6.

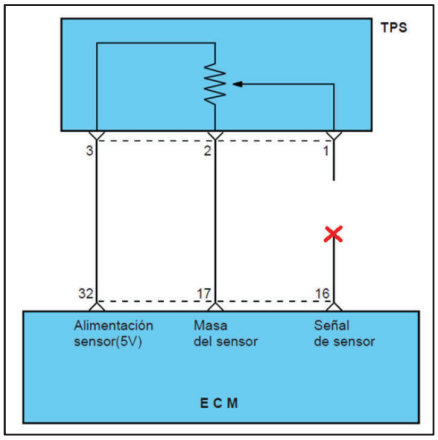

Figura. 6. Esquema para reproducir modo de falla 7. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 8:

Fallo de funcionamiento del sensor CMP. Provoca fallos en el avance de encendido. Para reproducir este fallo se debe interrumpir la salida de señal del sensor en el pin número 2, como se muestra en la Figura 7.

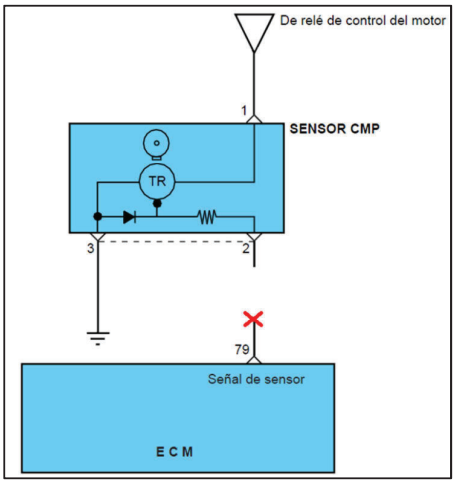

Figura. 7. Esquema para reproducir modo de falla 8. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 9:

Señal Baja / Alta del circuito del inyector. Falta de contribución de combustible del inyector correspondiente. El ECM fijará un código y la MIL se encenderá si se detecta un circuito abierto o un cortocircuito a masa en el circuito inyector de combustible durante dos ciclos de conducción. Para reproducir un modo de fallo del sensor, se logra

simplemente con desconectar la ficha de conexión del inyector la cual se muestra en la Figura 8.

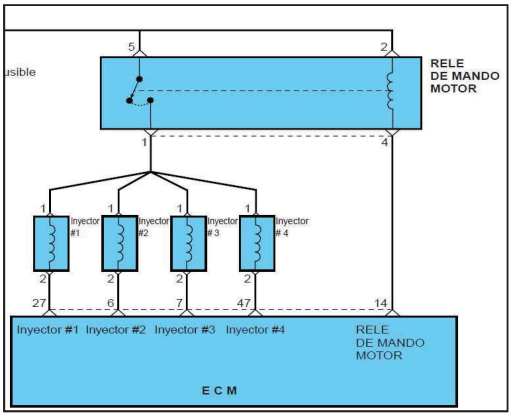

Figura. 8. Diagrama de conexión de los inyectores. Fuente: (Company., 2002)

Modo de Falla N° 10: Señal Baja / Alta de la válvula de ralentí. Para definir un modo de fallo de este tipo también basta con desconectar la ficha de la válvula. Para reproducir este modo de falla basta también con desconectar la ficha de conexión del actuador.

Modo de Falla N° 11: Fallo de encendido detectado. Falta de contribución de encendido un cilindro correspondiente al código de falla. Para reproducir un modo de fallo de este tipo, se procederá a desconectar el cable de la bujía del cilindro número 1.

Modo de Falla N° 12: Circuito abierto / cortocircuito de la válvula de control de purga del sistema de control de emisiones EVAP. Excesivo flujo del sistema de control de emisiones. Para reproducir un modo de fallo de este tipo, se procederá a desconectar la ficha de conexión del actuador

ORDEN DE EMPASTADO