



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE SEDE LATACUNGA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica Carrera de Ingeniería Automotriz

Tema: Investigación de la incidencia del sistema de inyección BI – FUEL y DUAL – FUEL de hidrógeno, en los parámetros de desempeño de los motores de combustión interna de encendido por compresión

Autores: Alvarez Molina, Stalyn Paul
Yacelga Cajas, José Antonio

Director: Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio



CONTENIDO

- **Antecedentes**
- **Planteamiento del problema**
- **Objetivos**
- **Hipótesis**
- **Implementación del sistema de hidrógeno**
- **Características de los vehículos**
- **Protocolo prueba torque y potencia**
- **Ensayo de torque y potencia**
- **Resultados torque y potencia**
- **Protocolo prueba de consumo de combustible**
- **Ensayo consumo de combustible**
- **Resultados del consumo de combustible**
- **Análisis de torque y potencia**
- **Análisis del consumo de combustible**
- **Conclusiones**
- **Recomendaciones**



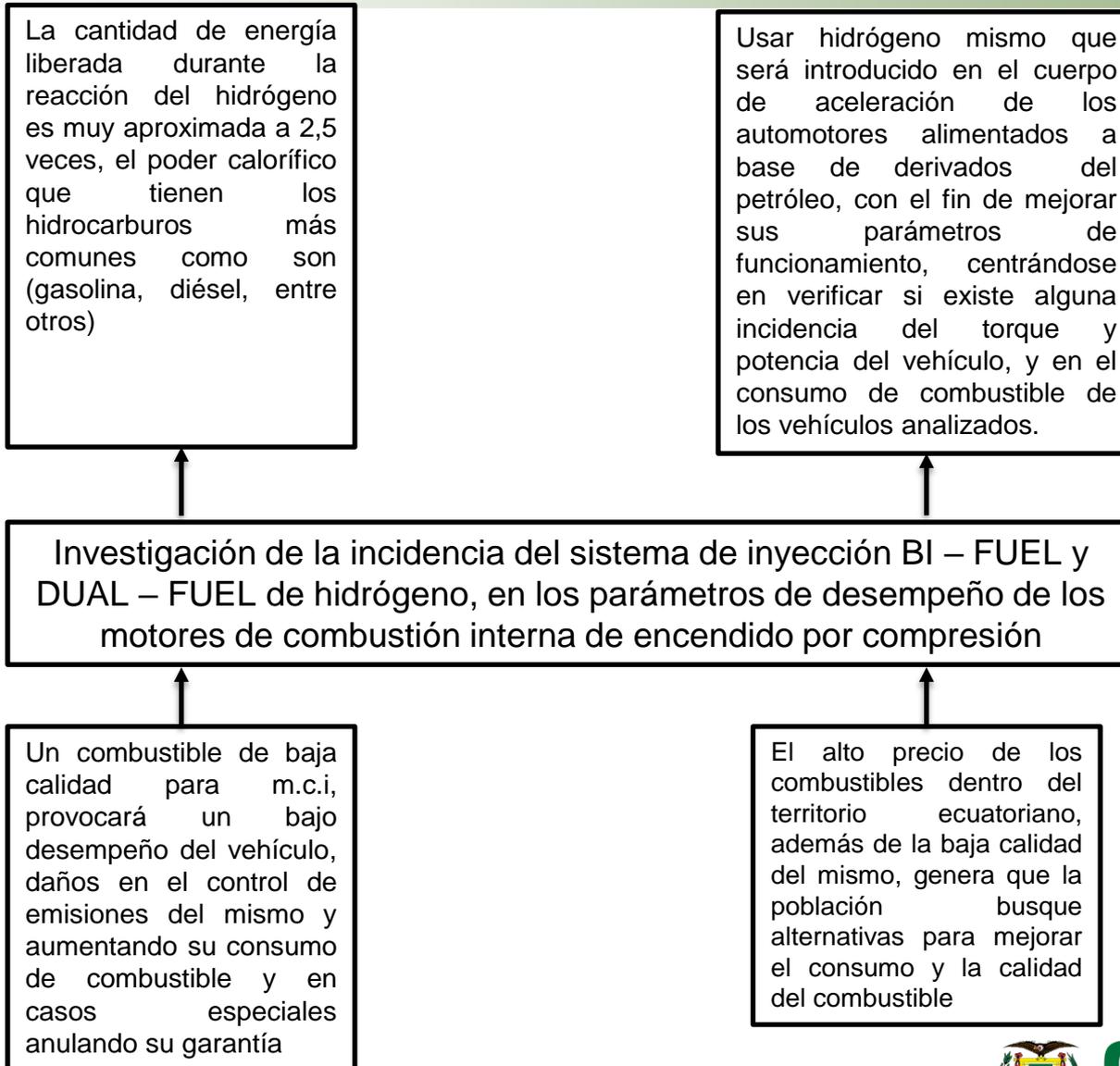
Antecedentes:



- El elemento hidrógeno es en su mayoría el elemento más abundante del universo llegando a constituir un 70% de la masa del mismo, sin embargo, en la Tierra no existe lugar alguno donde encontrarlo en estado puro
- Actualmente el costo de producción de 1 barril de petróleo es de 16,3 USD frente a los 3067 USD necesarios para producir un barril de hidrógeno verde, frenando así su uso inmediato pues por la tecnología actual disponible el costo de fabricación es sumamente elevado y por consiguiente muy difícil de implementar para desarrollar vehículos que operen 100% a hidrógeno.
- Desde un punto de vista energético el hidrógeno es el combustible con mayor relación energía/peso con una energía específica de 33,33 kWh/Kg frente a combustibles tradicionales como son por ejemplo la gasolina con aproximadamente 12 kWh/Kg



Planteamiento del Problema:



Objetivo General:

- Investigar la incidencia del sistema de inyección BI – FUEL y DUAL – FUEL de hidrógeno, en los parámetros de desempeño de los motores de combustión interna de encendido por compresión.

Objetivos Específicos:



- Implementar un reactor de hidrógeno por electrólisis del agua para la separación de las moléculas de oxígeno de las moléculas de hidrógeno.
- Ejecutar ensayos de medición de torque y potencia de acuerdo a la normativa de la SAE J1349 de Engine Power Test Code Spark Ignition and Compression Net Power Rating.
- Ejecutar ensayos de medición de torque y potencia de acuerdo a la normativa de la SAE antes y después de la implementación del reactor y sistema de inyección de hidrógeno vehicular.
- Determinar el consumo de combustible de los vehículos, antes y después de la implementación del reactor y sistema de inyección de hidrógeno vehicular.
- Tabular los resultados de la medición de torque y potencia para determinar el aumento o disminución de los mismos en los vehículos después la implementación del reactor y sistema de inyección de hidrógeno vehicular.



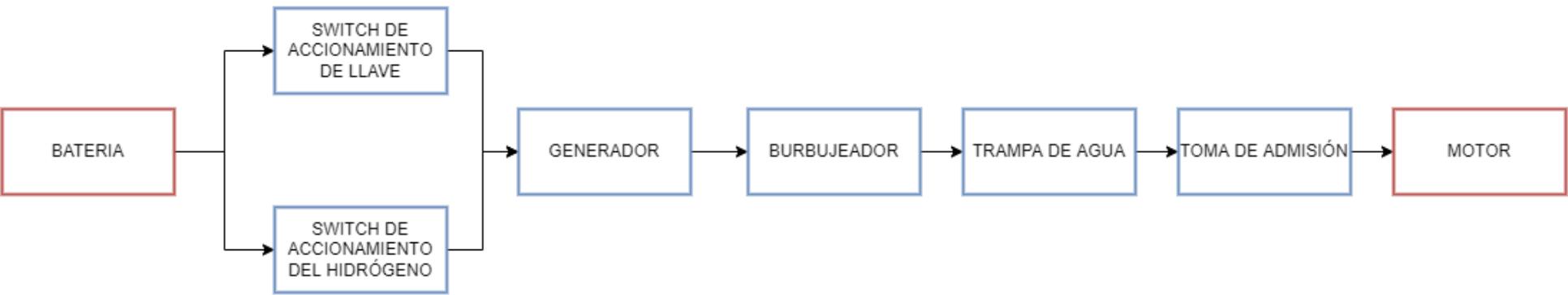
Hipótesis:



Siendo el hidrógeno un combustible alternativo con excelentes capacidades energéticas al usarlo de manera complementaria con el combustible con el que han sido diseñados los vehículos se espera conseguir una mejora de potencia estimada de 3 CV y una economía de ahorro combustible del 5% - 10%.



Implementación del sistema de generación de hidrógeno



Características de los vehículos



Kia Sportage R 2.0 GLS MT

| Característica | Parámetro |
|-------------------------|-------------------|
| Serie | G4KD |
| Cilindraje | 1998 cc |
| Diámetro x Carrera (mm) | 86 x 86 |
| Relación de compresión | 9.5:1 |
| Cantidad de cilindros | 4 |
| Potencia | 163 Hp @ 6200 rpm |
| Torque | 195 Nm @ 4600 rpm |
| Combustible | Gasolina |



Características de los vehículos

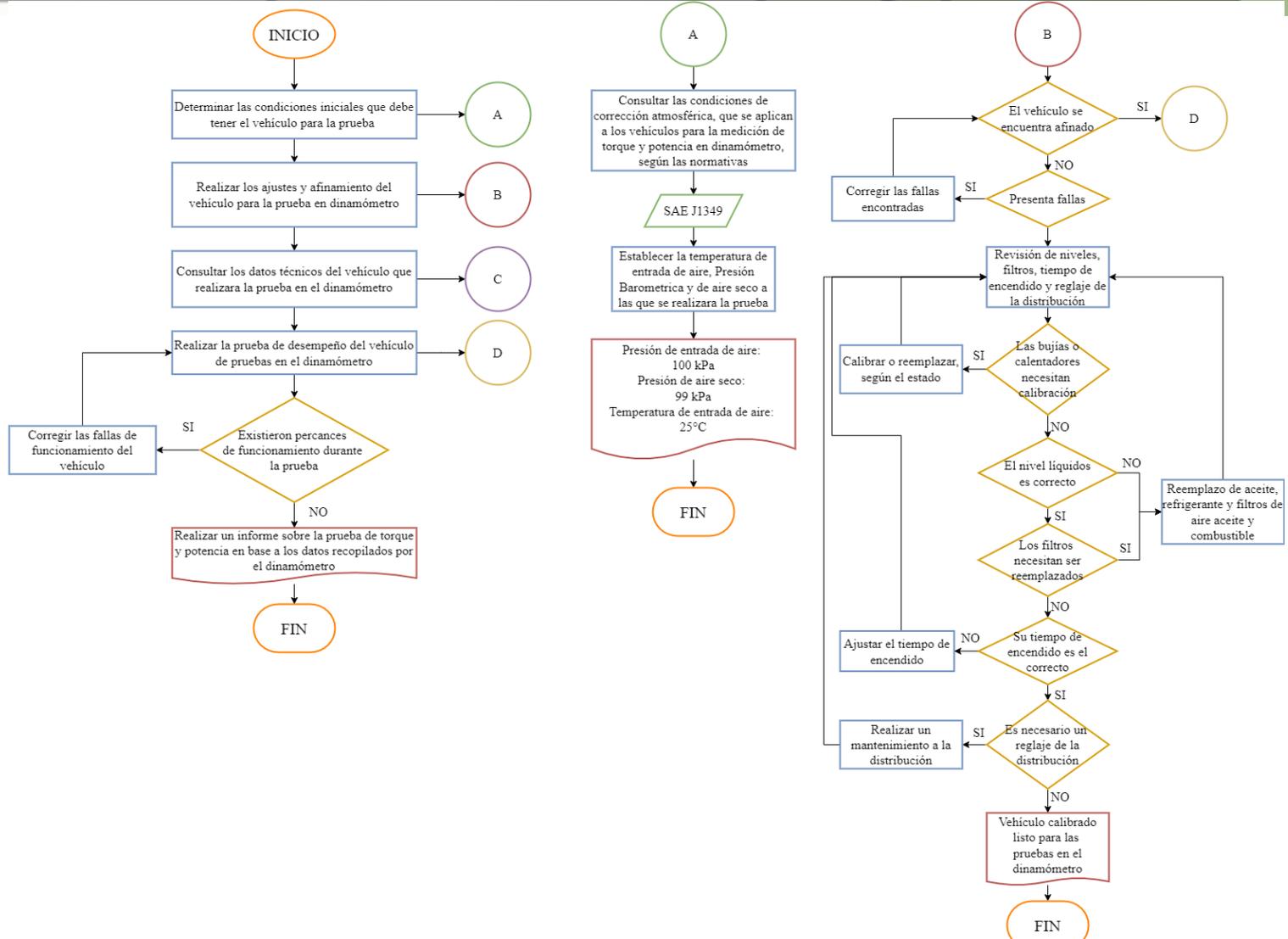


Chevrolet D-Max 3.0 CRDI

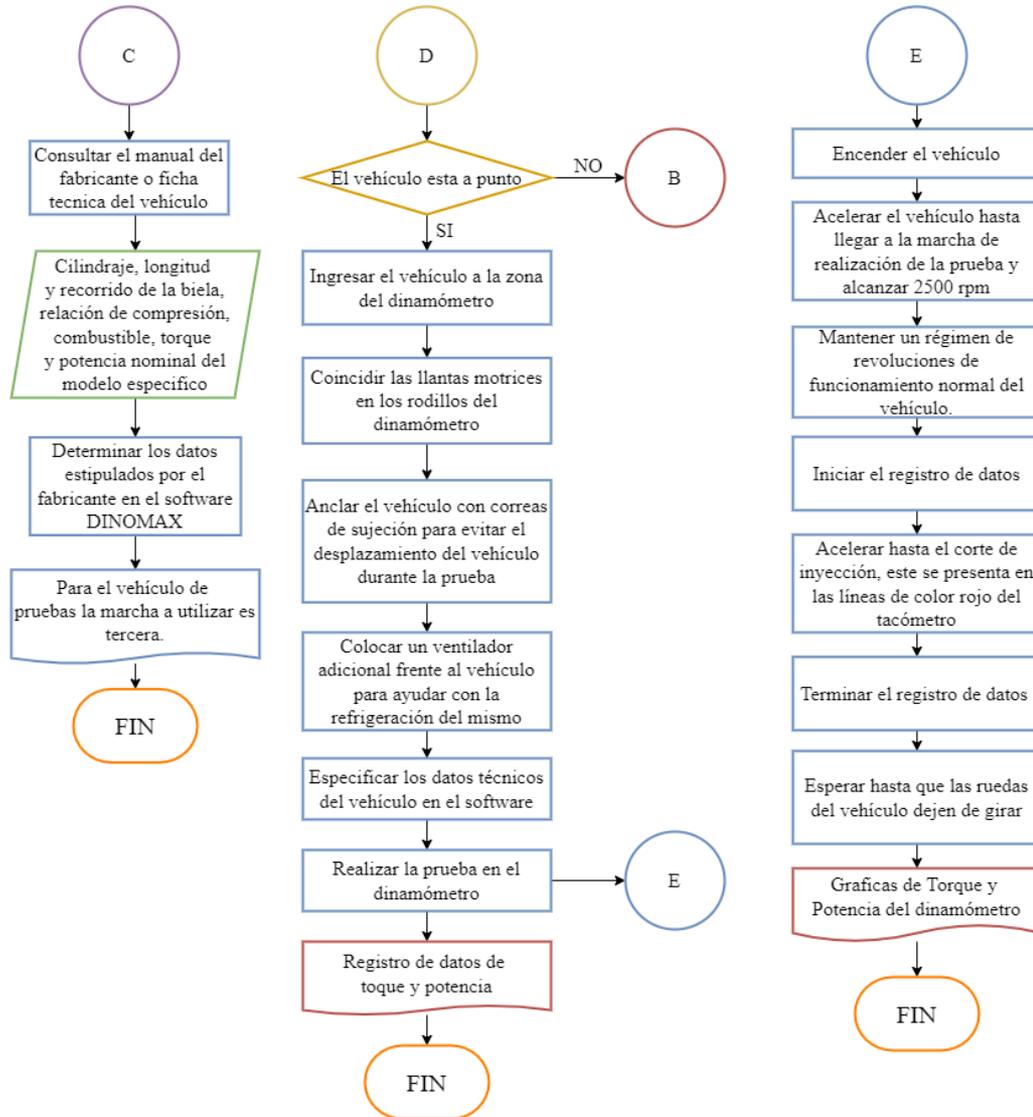
| Característica | Parámetro |
|-------------------------|-------------------|
| Serie | 4JJ1 |
| Cilindraje | 3000 cc |
| Diámetro x Carrera (mm) | 95.4 x 104.9 |
| Relación de compresión | 17.5:1 |
| Cantidad de cilindros | 4 |
| Potencia | 134 Hp @ 2500 rpm |
| Torque | 280 Nm @ 1800 rpm |
| Combustible | Diésel |



Protocolo prueba de torque y potencia



Protocolo prueba de torque y potencia



Ensayo de torque y potencia



Stalyn Alvarez #7153 on 2022-08-02 @ 16-07-01

Nombre de archivo: C:\Program Files (x86)\DYNO-MAX\Runs\Stalyn Alvarez\Chevrolet D-Max 3.0 d\Stalyn Alvarez #7153 or
Ejecución de prueba: Stalyn Alvarez #7153 on 2022-08-02 @ 16-07-01 Nº: 7153 Fecha: 8/2/2022

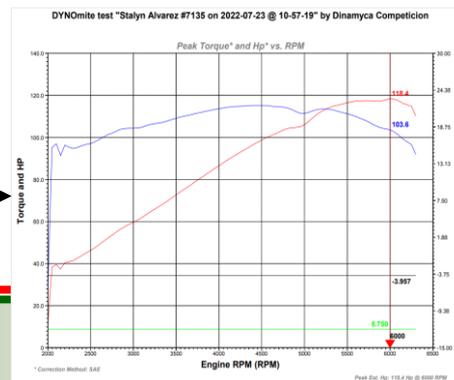
Por: Ronny Hidalgo Hora: 4:07 PM
Nombre: Stalyn Alvarez Importar (ejecutar modelo) Engine's Test Hour: 20919.7
Vehículo: Chevrolet D-Max 3.0 d Exportar configuración de ejecución como... #1- Four Stroke Ditto

Motor Tiempo Inercia Vehículo Fuel Ignición Cabecar Inducción Escape Válvulas Varios Dyno

Mostrar en informe de ejecución Mostrar en informe de impresión rápida

Marca del motor: ISUZU Relación de compresión: 17.5 :1
Modelo del motor: 4J1

Número de serie de motor: Cantidad de cilindros:
Descripción: Longitud de biela: 144.78 mm
Potencia anunciada: 134 Hp a 3600 rpm Cálbre: 95.4 mm
Par de torsión anunciado: N·m a 3000 rpm Recorrido: 104.9 mm
Descripción de pistón: Desplazamiento: 2998.8 cc



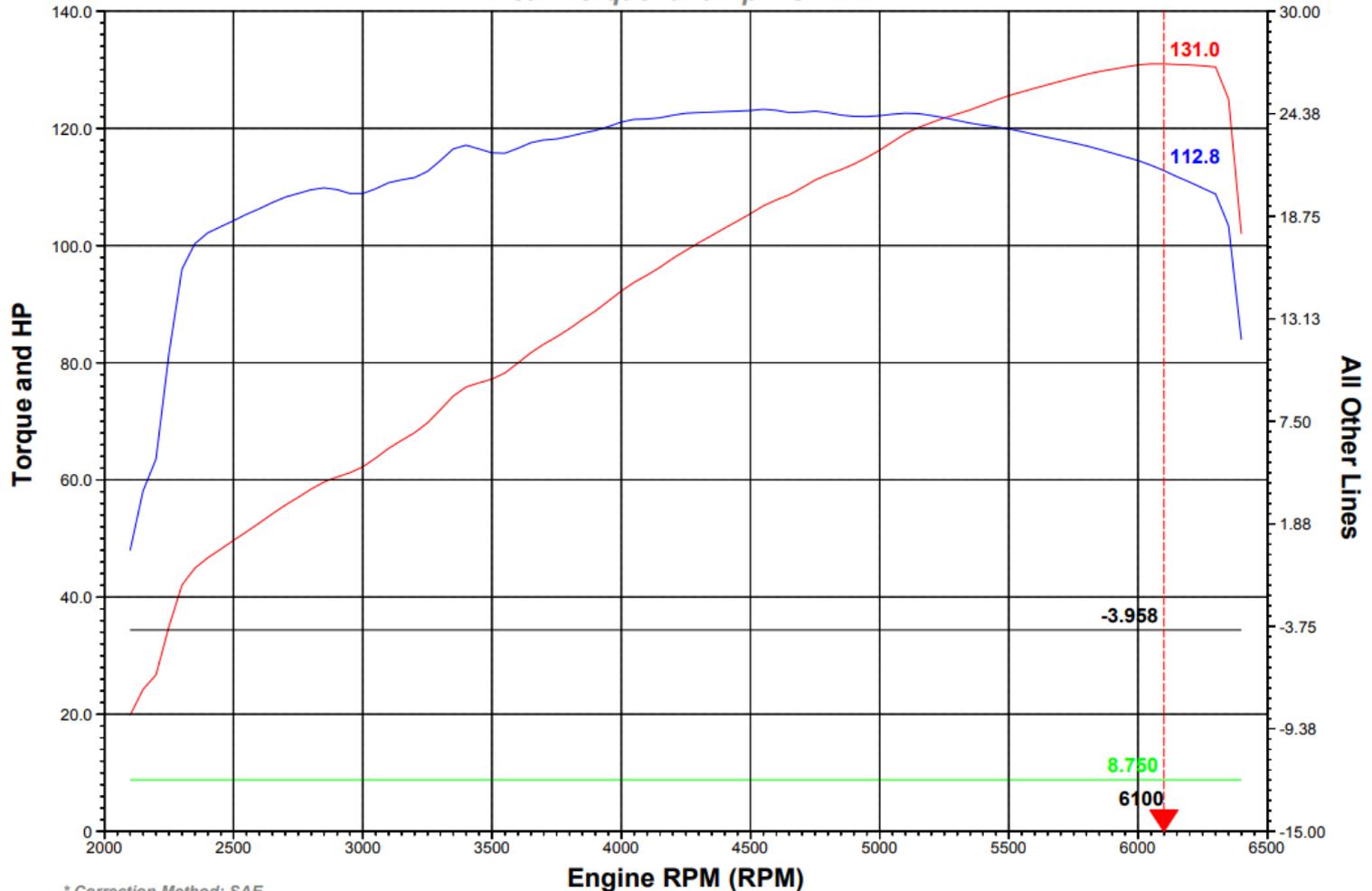
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Resultados del torque y potencia



GASOLINA

Peak Torque* and Hp* vs. RPM



* Correction Method: SAE

Peak Est. Hp: 131.0 Hp @ 6100 RPM



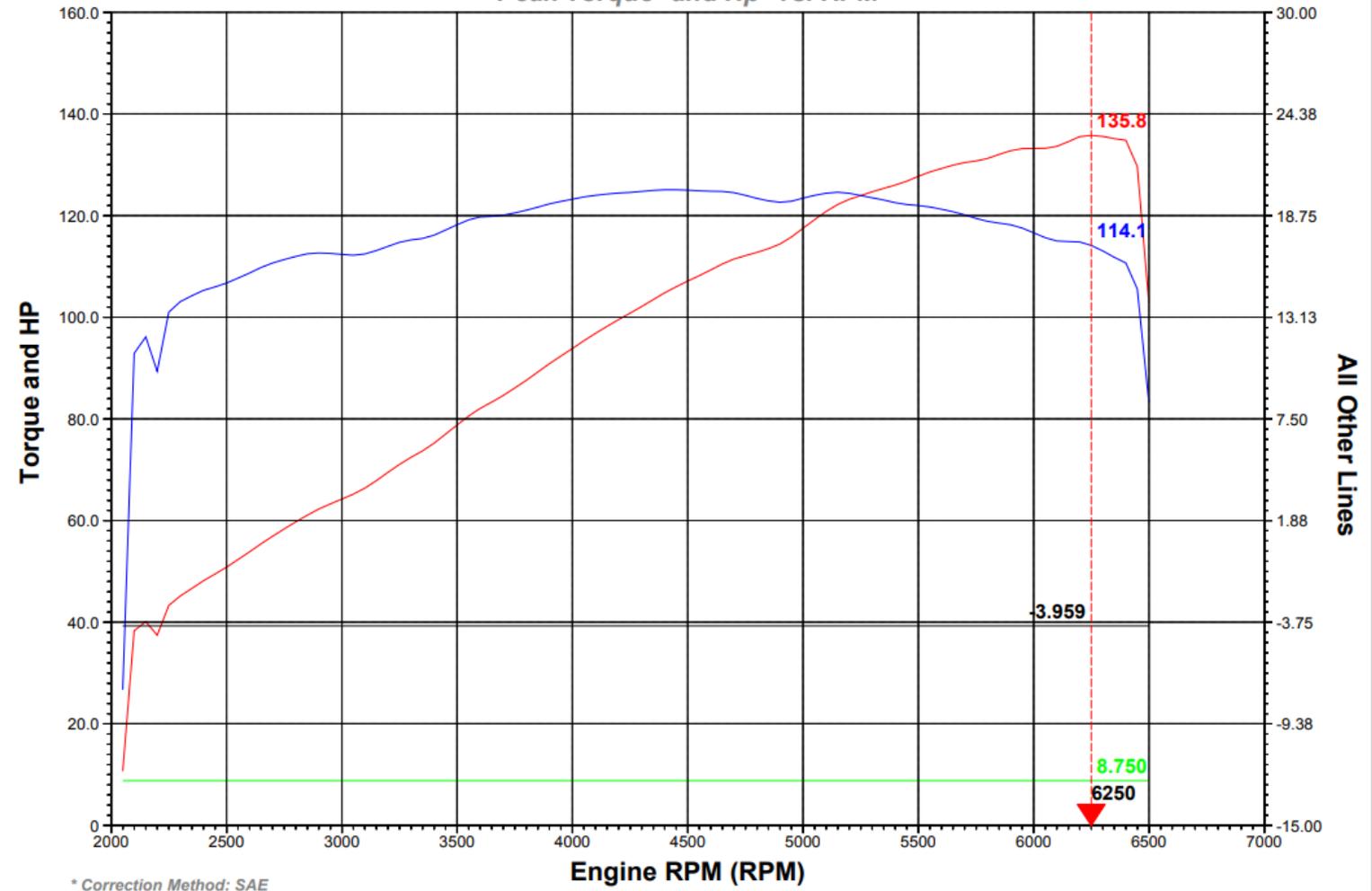
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Resultados del torque y potencia



GASOLINA + HIDROGENO

Peak Torque* and Hp* vs. RPM



* Correction Method: SAE

Peak Est. Hp: 135.8 Hp @ 6250 RPM



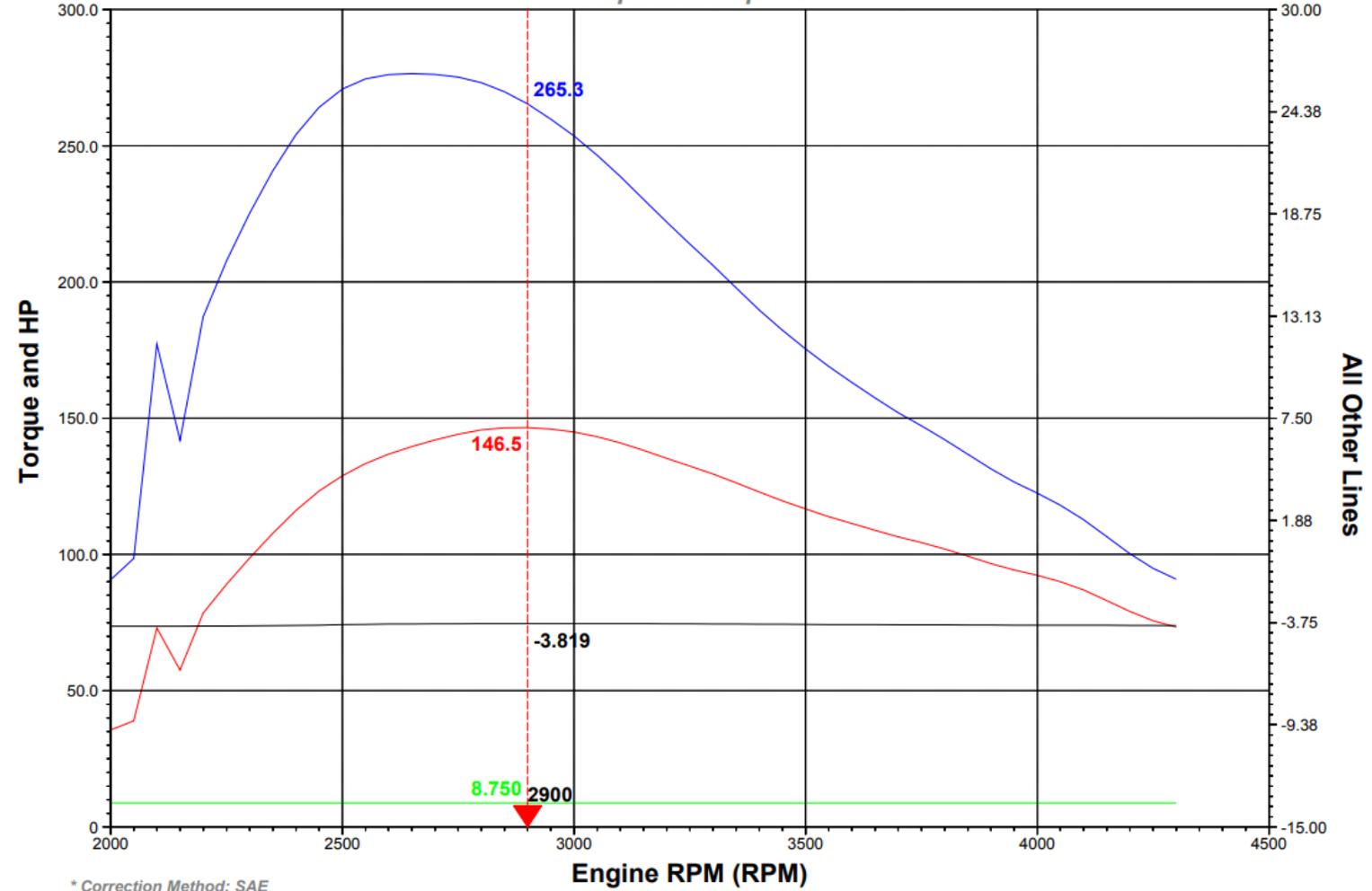
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Resultados del torque y potencia



DIESEL

Peak Torque* and Hp* vs. RPM



Peak Est. Hp: 146.5 Hp @ 2900 RPM



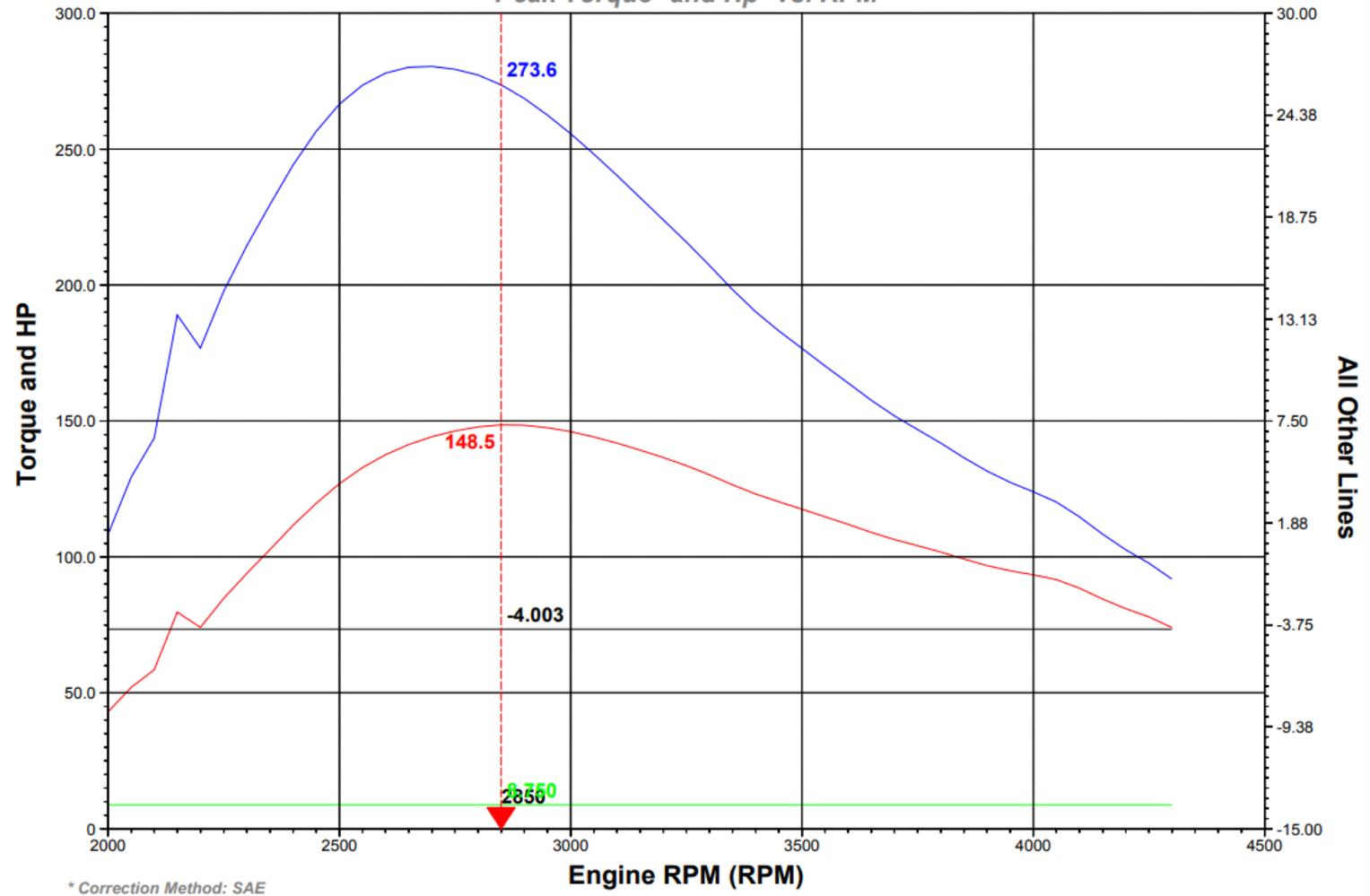
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Resultados del torque y potencia



DIESEL + HIDROGENO

Peak Torque* and Hp* vs. RPM



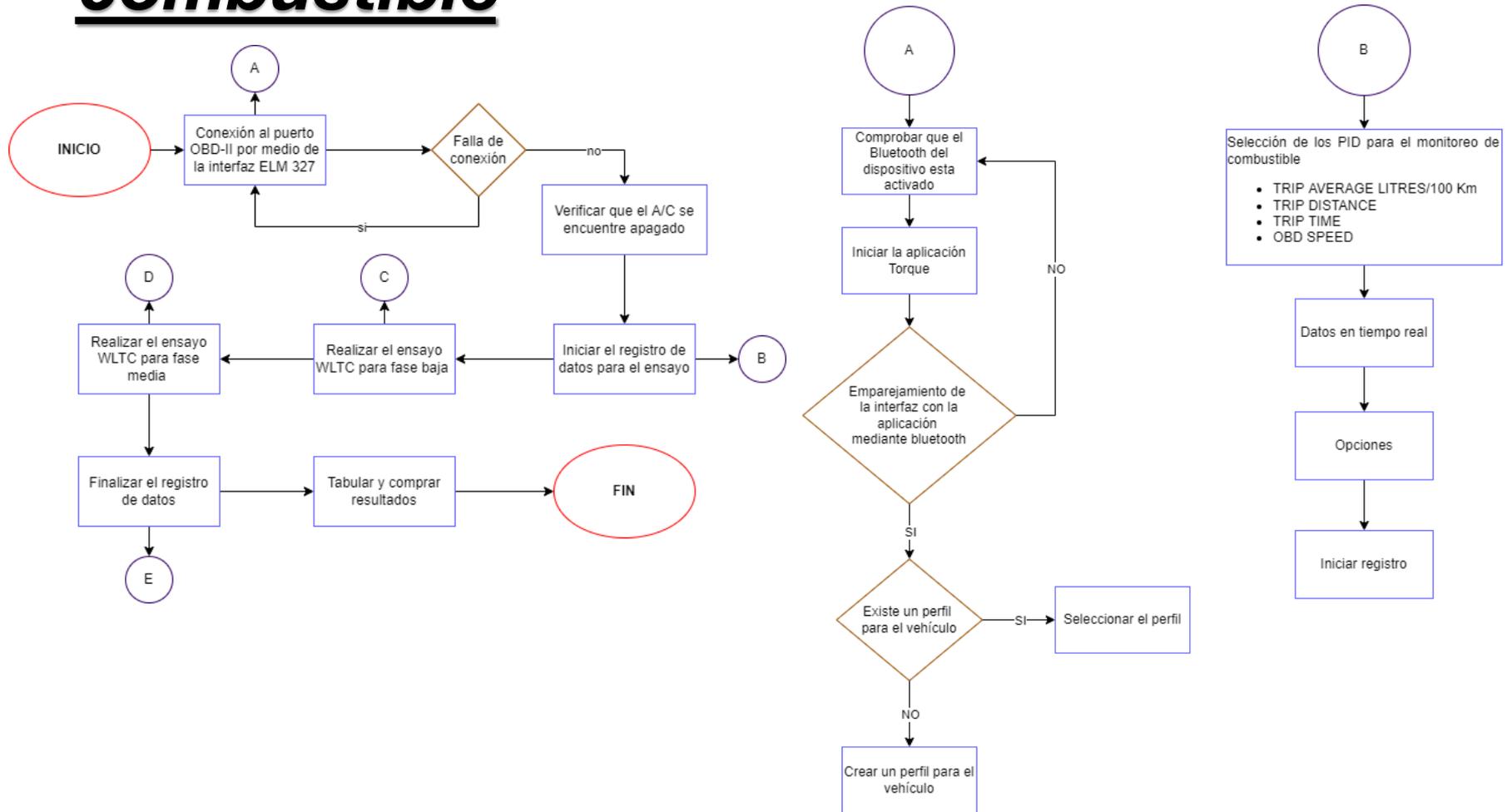
* Correction Method: SAE

Peak Est. Hp: 148.5 Hp @ 2850 RPM

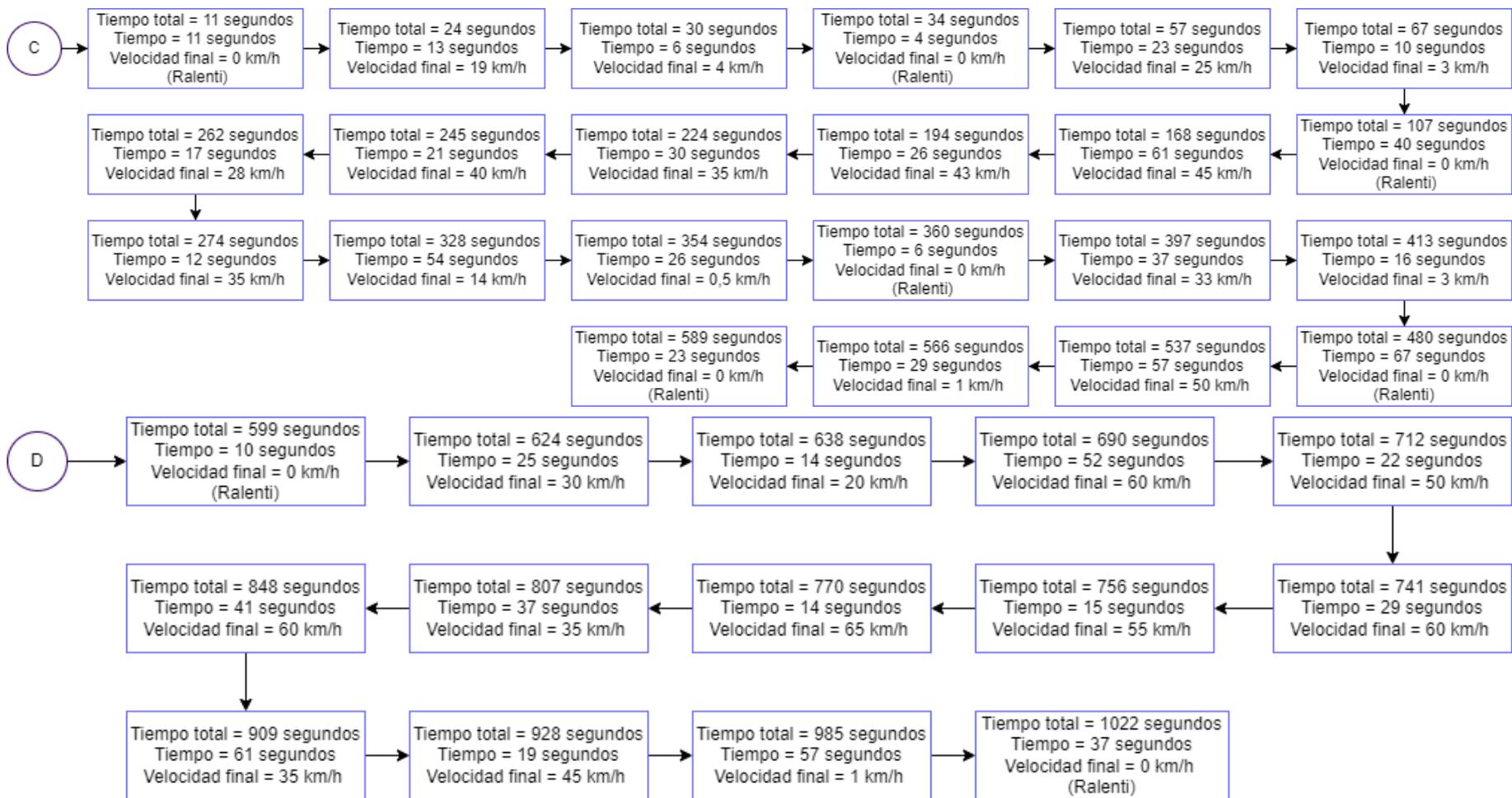


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

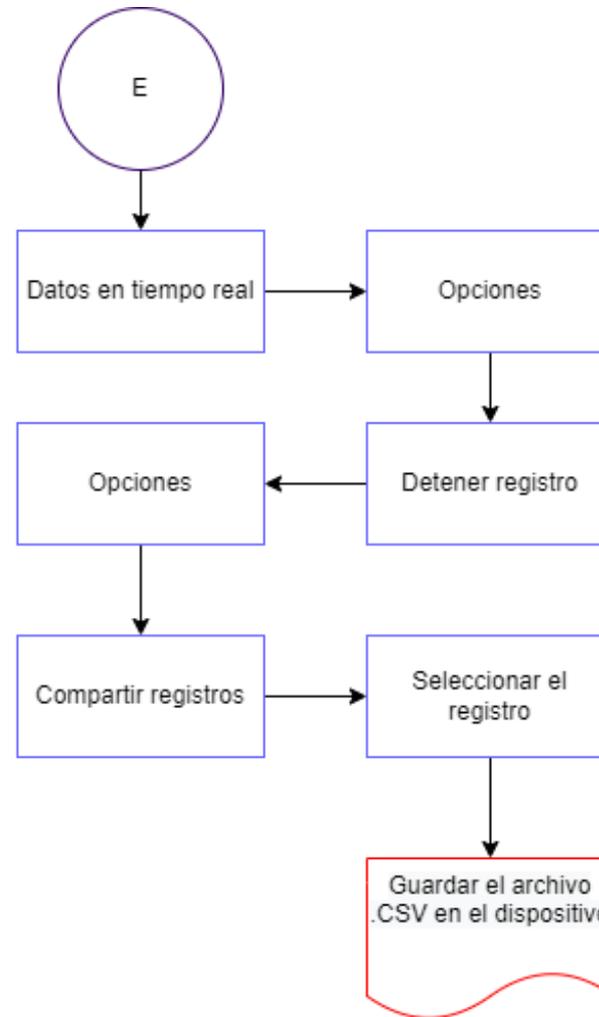
Protocolo prueba consumo de combustible



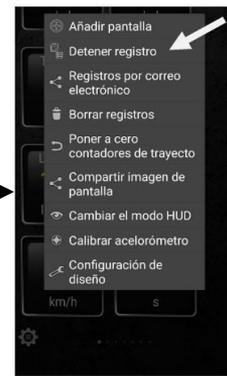
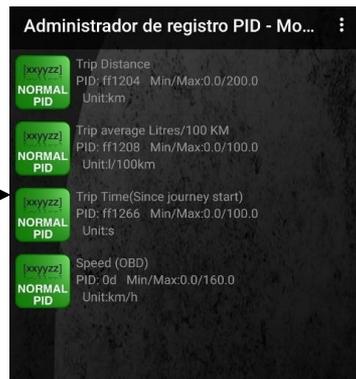
Protocolo prueba consumo de combustible



Protocolo prueba consumo de combustible



Ensayo consumo de combustible



| | A | B | C | D | E |
|----|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---|
| | Trip Distance(km) | Trip average Litres/100 KM(1/200km) | Trip Time(Since journey start(s)) | Speed (km/h)(km/h) | |
| 1 | 0.00000000 | 7.80580492 | 0 | 0 | |
| 2 | 0.00000000 | 7.80580492 | 0 | 0 | |
| 3 | 0.00000000 | 7.80580492 | 0 | 0 | |
| 4 | 0.00001972 | 7.80580492 | 0.07 | 1 | |
| 5 | 0.00005883 | 7.80580492 | 1.051 | 0 | |
| 6 | 0.00005883 | 7.80580492 | 2.079 | 0 | |
| 7 | 0.00005883 | 7.80580492 | 3.0720003 | 0 | |
| 8 | 0.00005883 | 7.80580492 | 4.0599997 | 0 | |
| 9 | 0.00005883 | 7.80580492 | 5.0599994 | 0 | |
| 10 | 0.00005883 | 7.80580492 | 6.0749991 | 0 | |
| 11 | 0.00005883 | 7.80580492 | 7.0749991 | 0 | |
| 12 | 0.00005883 | 7.80580492 | 8.0430002 | 0 | |
| 13 | 0.00005883 | 7.80580492 | 9.0620007 | 0 | |
| 14 | 0.00005883 | 7.80580492 | 10.0020007 | 0 | |
| 15 | 0.00048111 | 7.80580492 | 11.0529994 | 5 | |
| 16 | 0.00219236 | 7.80580492 | 12.0699973 | 10 | |
| 17 | 0.00605881 | 48.0239402 | 13.0599999 | 14 | |
| 18 | 0.01023306 | 40.7047684 | 14.0469997 | 18 | |
| 19 | 0.01433972 | 24.36406136 | 15.0799961 | 18 | |
| 20 | 0.01822881 | 21.38845187 | 16.0599961 | 18 | |
| 21 | 0.02300569 | 21.7129879 | 17.0799911 | 18 | |
| 22 | 0.02899056 | 21.80695817 | 18.0699998 | 20 | |
| 23 | 0.03498097 | 20.7038879 | 19.0799999 | 21 | |
| 24 | 0.03998833 | 18.88372993 | 20.0630003 | 20 | |
| 25 | 0.04511211 | 16.6081335 | 21.0000004 | 19 | |
| 26 | 0.0488918 | 15.89757061 | 22.079994 | 18 | |
| 27 | 0.05472417 | 15.26716083 | 23.0439962 | 18 | |
| 28 | 0.05988778 | 14.79074993 | 24.0499979 | 18 | |
| 29 | 0.06490278 | 13.96164408 | 25.0600004 | 18 | |
| 30 | 0.06780077 | 13.64800375 | 26.0699973 | 15 | |

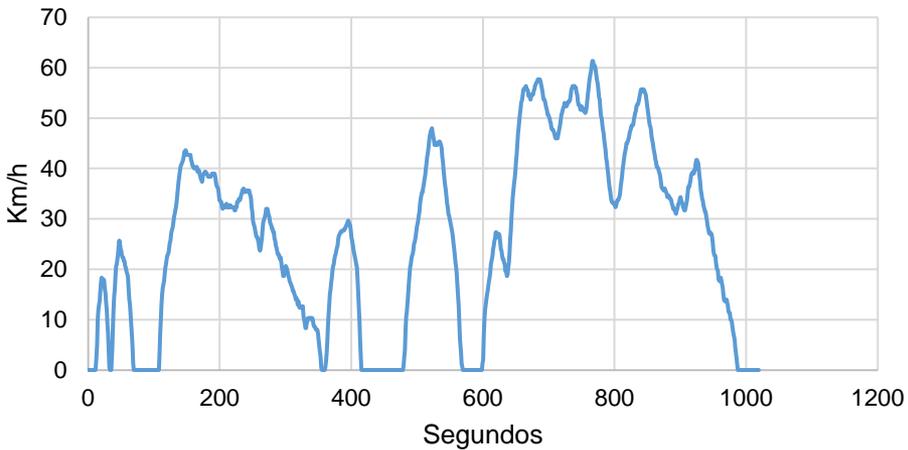


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

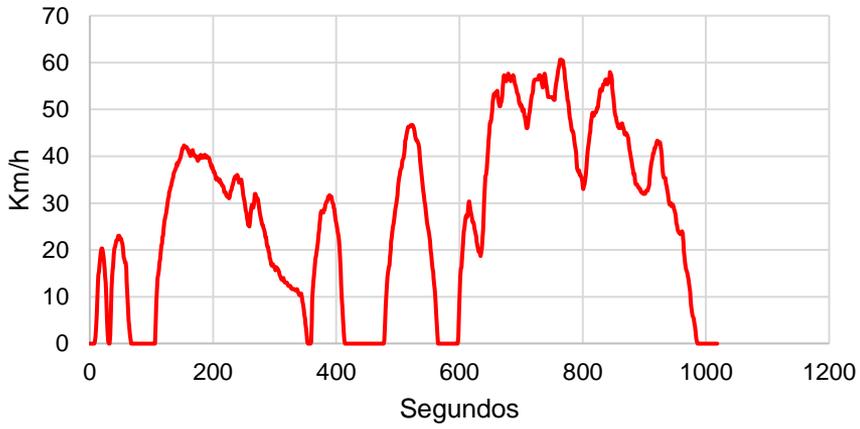
Resultados del consumo de combustible



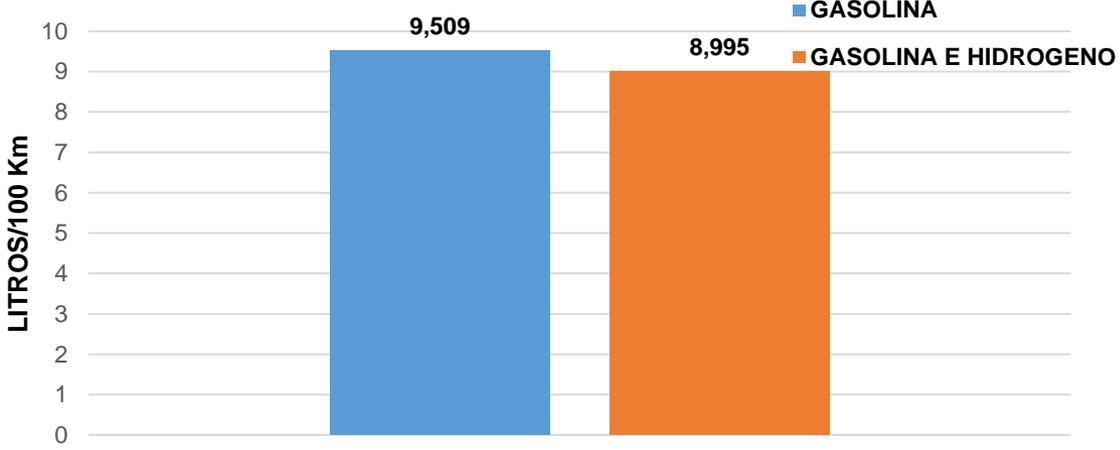
WLTC GASOLINA



WLTC GASOLINA + HIDROGENO



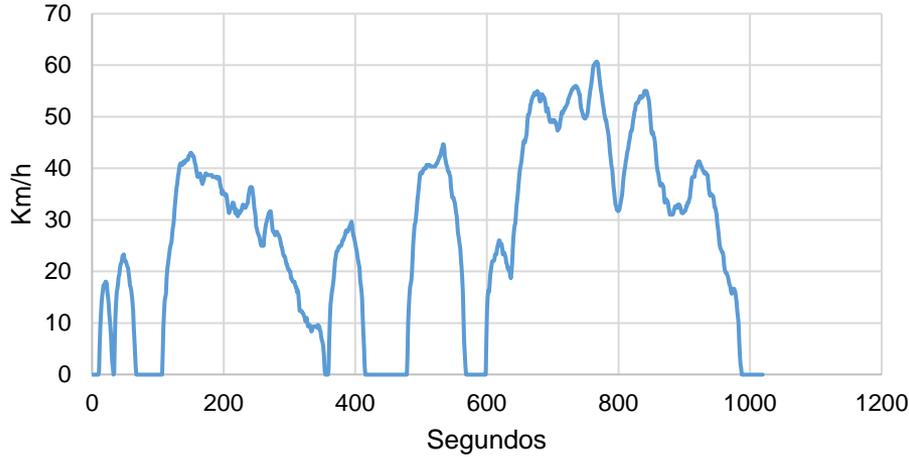
CONSUMO PROMEDIO DEL VIAJE



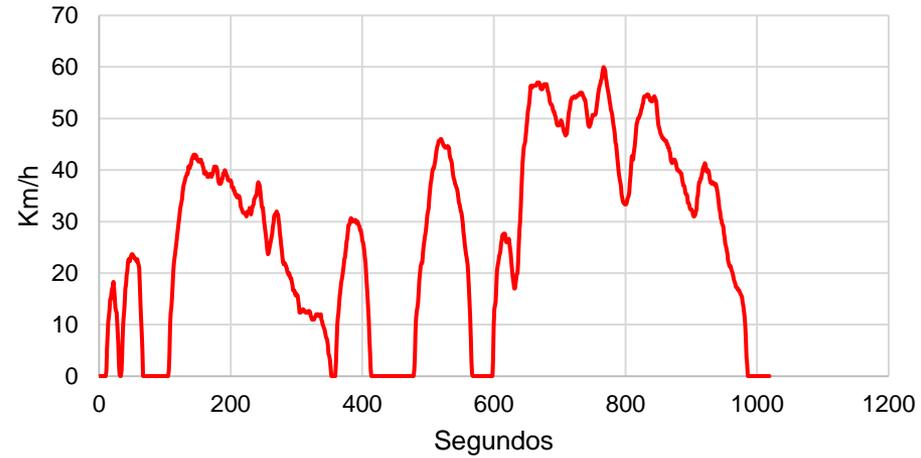
Resultados del consumo de combustible



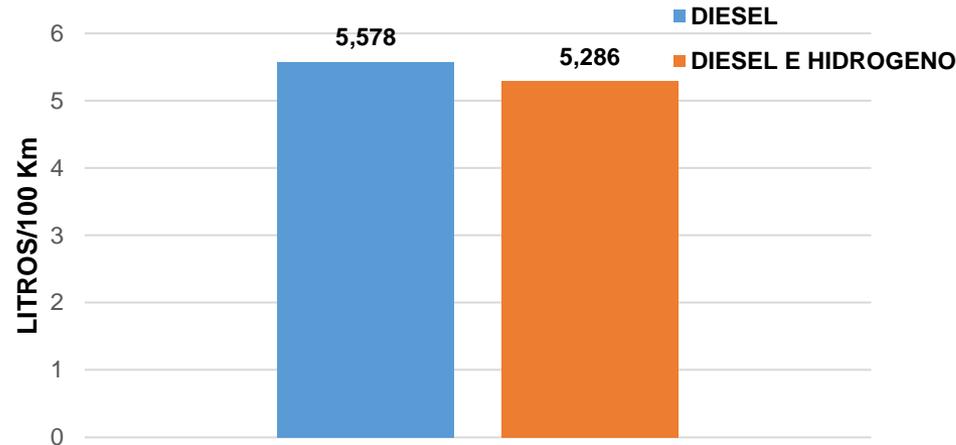
WLTC DIESEL



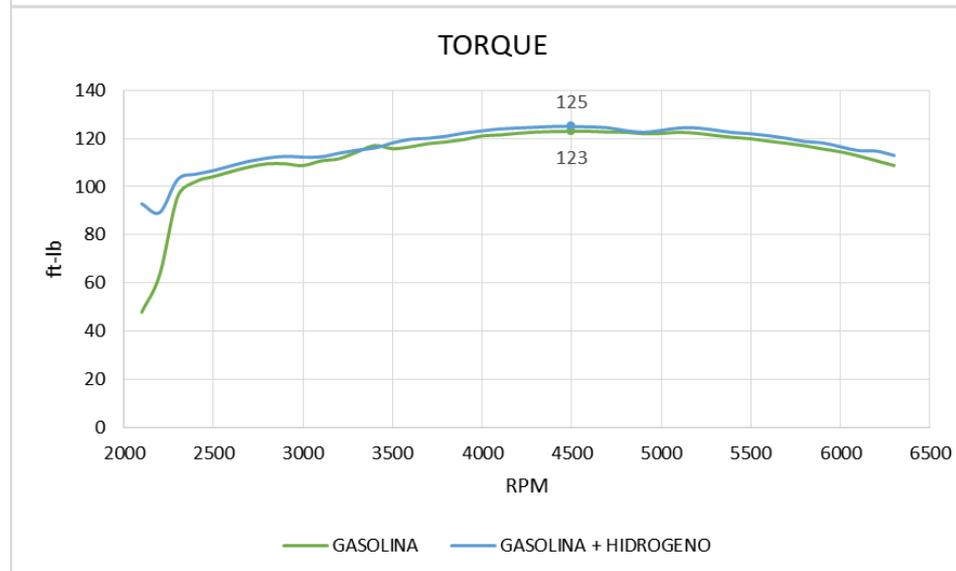
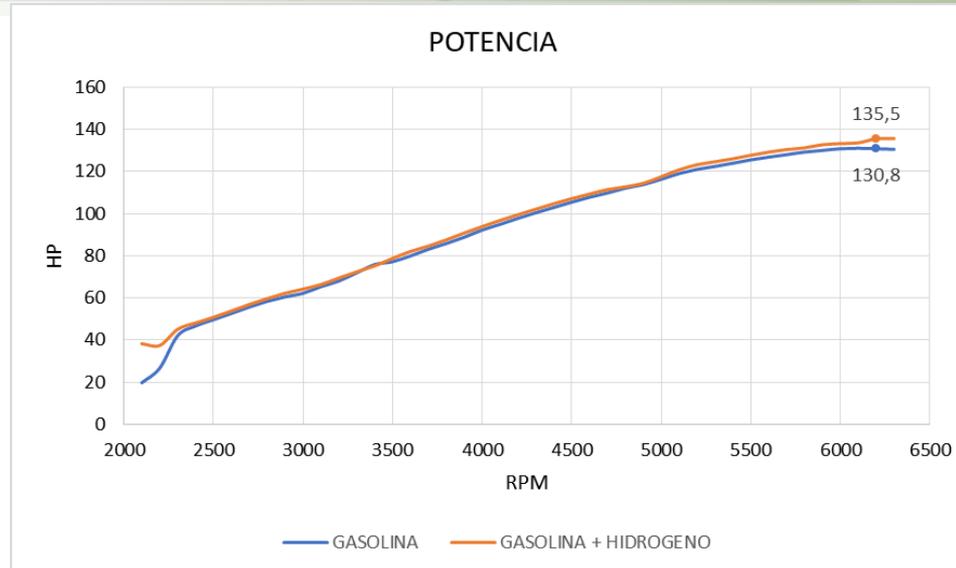
WLTC DIESEL + HIDROGENO



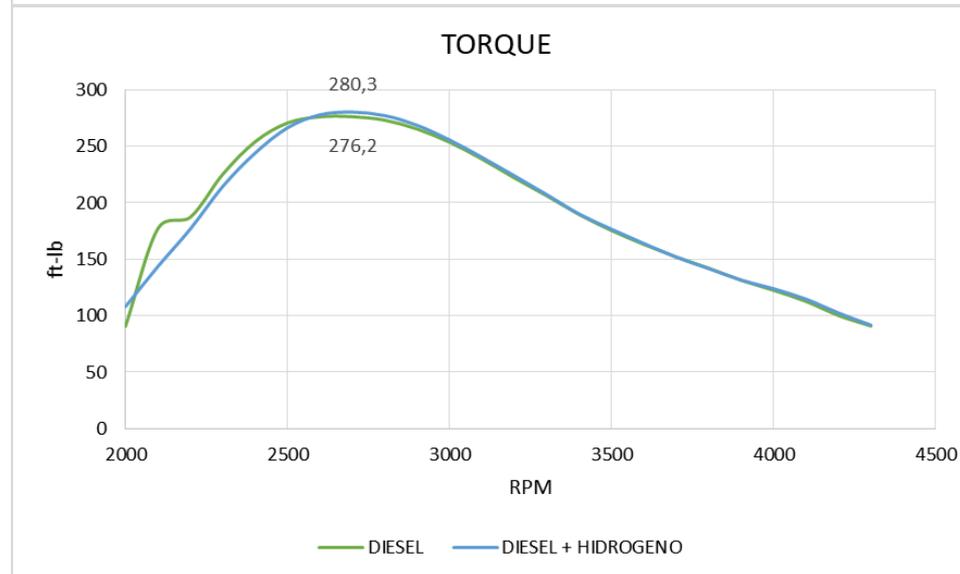
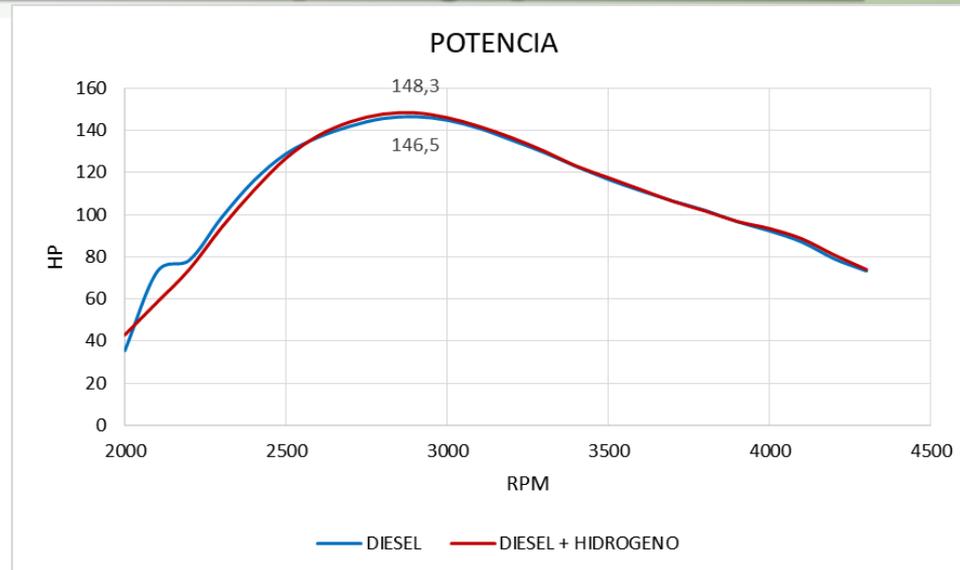
CONSUMO PROMEDIO DEL VIAJE



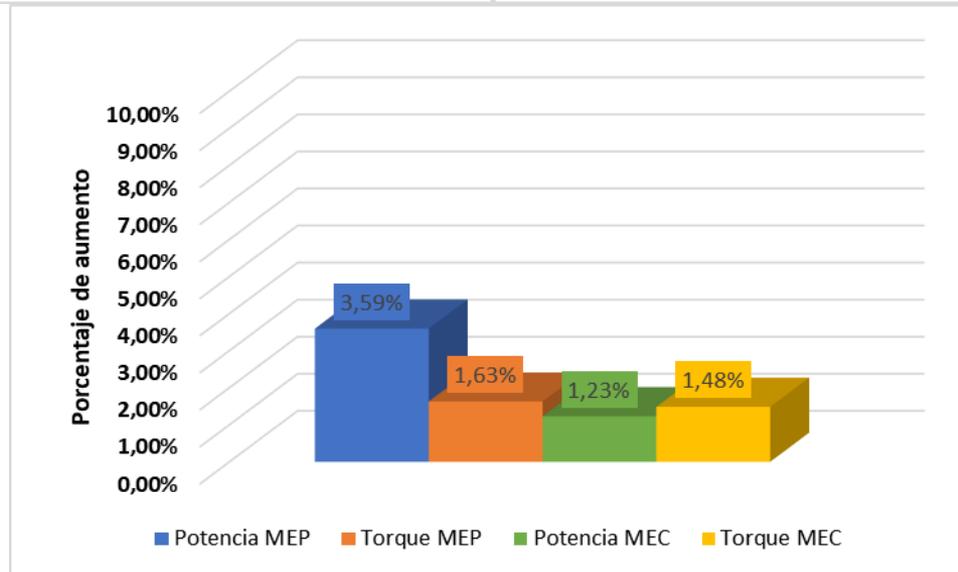
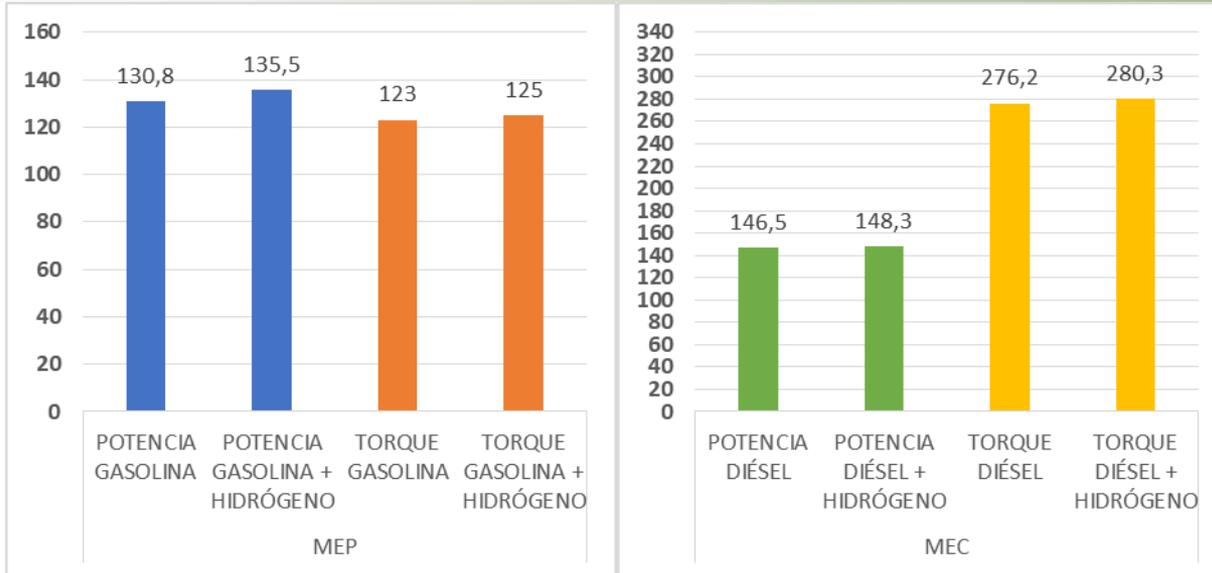
Análisis de torque y potencia



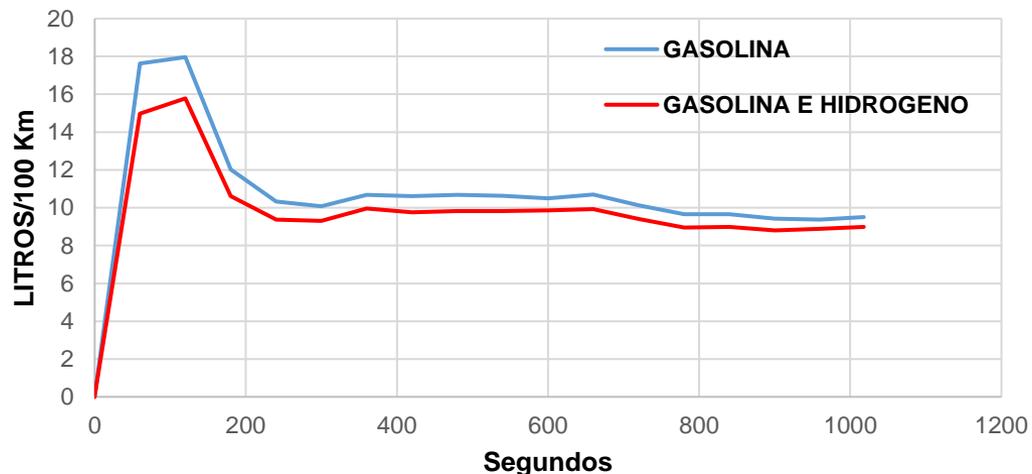
Análisis de torque y potencia



Análisis de torque y potencia



PROMEDIO DE VIAJE VS TIEMPO



En 25 000 Km se va a ahorrar 34,016 galones de combustible mismos que representan un valor de 81,64 USD

| Parámetro | Gasolina | Gasolina e hidrógeno |
|------------------------------|----------|----------------------|
| Distancia recorrida (Km) | 7,568 | 7,520 |
| Promedio de viaje (l/100 Km) | 9,509 | 8,994 |

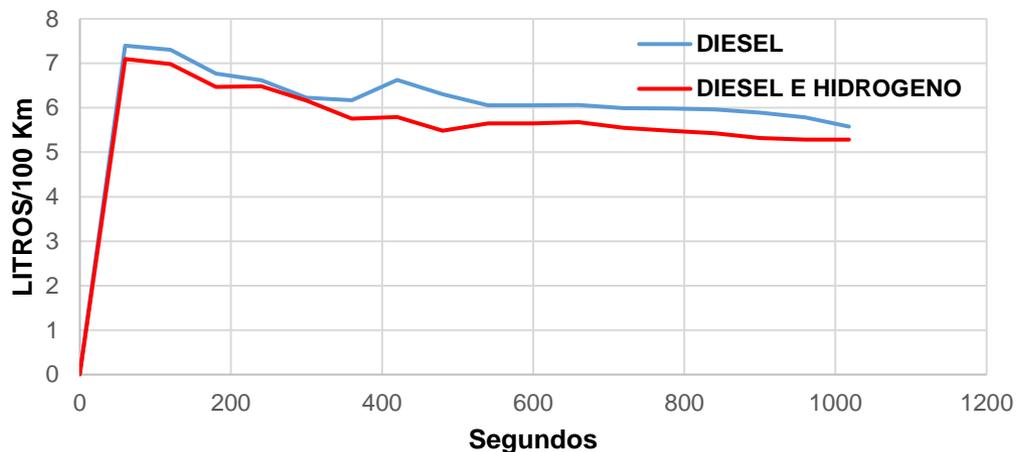
| Parámetro | Gasolina | Gasolina e hidrógeno |
|---|----------|----------------------|
| Combustible necesario para recorrer 25 000 Km (Galones) | 628,071 | 594,055 |
| Costo (USD) | 1507,37 | 1425,73 |



Análisis del consumo de combustible



PROMEDIO DE VIAJE VS TIEMPO



En 25 000 Km se va a ahorrar 19,287 galones de combustible mismos que representan un valor de 33,75 USD

| Parámetro | Diésel | Diésel e hidrógeno |
|------------------------------|--------|--------------------|
| Distancia recorrida (Km) | 7,445 | 7,514 |
| Promedio de viaje (l/100 Km) | 5,758 | 5,286 |

| Parámetro | Diésel | Diésel e hidrógeno |
|---|---------|--------------------|
| Combustible necesario para recorrer 25 000 Km (Galones) | 368,428 | 349,141 |
| Costo (USD) | 644,75 | 610,99 |



Análisis del consumo de combustible



Asumiendo el gasto inicial del kit de hidrógeno vehicular que corresponde a 350 USD, entonces:

| Vehículo | Distancia necesaria para recuperar la inversión (Km) | Promedio de recorrido anual (Km) | Tiempo necesario (años) |
|-----------------|---|---|------------------------------------|
| Gasolina | 107177,85 | 24 000 | 4,46 |
| Diésel | 259259,26 | 24 000 | 10,8 |



Se determinó la incidencia de la inyección de hidrógeno para el sistema bi-fuel en motores de encendido provocado y del sistema dual fuel para motores de encendido por compresión, obteniendo como resultado de la investigación, mejores parámetros de desempeño referidos al consumo de combustible en los motores de encendido provocado, mismo que usan el sistema bi fuel de inyección hidrógeno.



Se ejecutaron ensayos para la determinación de torque y potencia tomando como guía la normativa SAE J1349, dichos ensayos han sido realizados en los vehículos para comparar la incidencia del sistema de inyección de hidrógeno, para de esta manera poder obtener así un panorama de como este sistema va a influir a fin de determinar el antes y después.

Se desarrolló un protocolo para la determinación de la prueba de combustible, el mismo que está sustentado en los ensayos WLTC “Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure” por sus siglas en inglés, tomando como referencia a vehículos de clase 1 que contemplan a aquellos vehículos de 4 ruedas o más cuyo fin es el de transportar personas, dicho ensayo ha sido aplicado exitosamente a ambos vehículos y se lo desarrollo sin ninguna novedad.



En lo que se refiere al ahorro de combustible para motores de encendido por compresión se evidencia que a través del sistema dual fuel de hidrógeno se obtuvo una disminución del consumo de combustible del 5,23%, dicho valor es el promedio de 3 ensayos ejecutados usando el sistema dual fuel, si bien se puede tomar como un resultado favorable el tiempo promedio para poder recuperar la inversión es de aproximadamente 10,8 años, condición que estaría relacionada al bajo precio del diésel en el Ecuador, por ende la recuperación va a ser más lenta y se podría afirmar en base a los resultados obtenidos que no es viable el uso de sistemas de inyección dual fuel en vehículos diésel ya que su impacto en el tema de ahorro de combustible va a ser mínimo.



Conclusiones



Las pruebas de consumo de combustible realizadas en el vehículo con motor de encendido provocado arrojan una disminución del consumo del 5,41% con el sistema de inyección de hidrógeno bi-fuel, dicho valor no representa un ahorro inmediato si no que este se podrá ver reflejado a largo plazo, pues el tiempo para la recuperación de la inversión del kit de hidrógeno para este vehículo está en 4,46 años, menos de la mitad del tiempo requerido para vehículos con motores de encendido por compresión, es así que se puede decir que el sistema de inyección bi-fuel de hidrógeno para motores de encendido provocado podría ser viable, no para una persona normal cuyo recorrido diario es bajo si no que este se podría aprovechar en vehículos que su distancia de recorrido diario sea mucho mayor como es el caso del transporte público donde figuran taxis y camionetas de alquiler.



Conclusiones



La adición de hidrógeno a través de un sistema bi-fuel en la alimentación del vehículo con MEP, genera un aumento del 3,59% de la potencia neta, que corresponde al incremento de 4,7 Hp a la potencia máxima del vehículo. Por su parte el torque se eleva en 1,63%, aproximadamente 2,71 Nm.

La implementación del sistema Dual-fuel, diésel más hidrógeno mejora los parámetros de torque y potencia en el vehículo con MEC, teniendo un incremento del 1,23% para la potencia y 1,48% para el par motor máximo.



Se recomienda el verificar la hermeticidad de las conexiones del kit de hidrógeno vehicular con a fin de evitar que el hidrógeno generado se escape o acumule pudiendo este ocasionar algún imprevisto si llegara a detonar.

Verificar de forma constante el nivel de electrolito contenido en el burbujeador a fin de completarlo si es que se diera el caso, tomando en cuenta el no sobrepasar el límite establecido en el recipiente pues el electrolito podría viajar por las cañerías a la admisión del vehículo.

En el desarrollo de los ensayos de consumo de combustible se debe de tener especial cuidado con los implementos que se lleven a bordo en el vehículo, ya que si se llegara a cargar más el vehículo durante el desarrollo se obtendrían valores distintos pues el peso neto ha cambiado y será necesario el uso de más combustible para su desplazamiento.



Previo a los ensayos de torque y potencia el vehículo a ser analizado deberá de estar puesto a punto a fin de evitar resultados erróneos a causa de un deficiente mantenimiento, de igual forma el vehículo deberá estar alineado previo a la realización de los ensayos.

Se deberá de revisar que los anclajes de sujeción hacia el vehículo sean correctos, antes de iniciar con los ensayos de torque y potencia a fin de prevenir accidentes.

Durante el transcurso de los ensayos de consumo de combustible tener muy en cuenta de no sobrepasar la velocidad y tiempo indicados a fin de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

