



Universidad del Azuay

Maestría en Sistemas Vehiculares

**OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA POR MEDIO DE
LA MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ECU
BASADO EN MODELOS MATEMÁTICOS**

AUTORES:

LUIS ALBERTO ROMO VÉLEZ; ÁLVARO DANIEL RODRÍGUEZ CUENCA

DIRECTOR

DANIEL ITURRALDE PIEDRA

**Cuenca, Ecuador
2016**

DERECHOS DE AUTOR

CERTIFICADO

PHD, Ing. Daniel Iturralde
DIRECTOR DE TESIS

Certifica:

Que el presente trabajo de investigación realizada por los estudiantes: Luis Alberto Romo Vélez y Álvaro Daniel Rodríguez Cuenca, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, ajustándose a las normas establecidas por la Universidad del Azuay; por lo que autorizo su presentación.

Cuenca, 08 de junio de 2016

f).....
Director
C.I.:

AUTORÍA

Nosotros, Luis Alberto Romo Vélez y Álvaro Daniel Rodríguez Cuenca, como autores del presente trabajo de investigación, hemos respetando los derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía; por lo tanto, este trabajo es de nuestra autoría y nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico.

f).....

Luis Alberto Romo Vélez

AUTOR DE LA TESIS

C.I.: 0301529822

f).....

Álvaro Daniel Rodríguez Cuenca

AUTOR DE LA TESIS

C.I.: 0301762563

DEDICATORIA

A mis progenitores, quienes con amor y sacrificio impulsaron mis sentimientos de superación humana, académica y profesional. A Ellos mi imperecedera gratitud.

A mis hermanos, como símbolo de estímulo permanente para mis más afanados logros y anhelos.

Luis Alberto Romo Vélez

DEDICATORIA

Dedicado con todo mi cariño:

A Valeria, mi amiga y compañera en la vida, que con todo su amor y apoyo me ha ayudado a sacar adelante este proyecto.

A mis padres, que me han dado tanto y me han sabido guiar y acompañar en el camino para alcanzar siempre las metas propuestas.

A mis hermanos, porque con su ejemplo de superación me demuestran que siempre se puede llegar más lejos.

A todos ellos, por formar parte de mi vida.

Álvaro Daniel Rodríguez Cuenca

AGRADECIMIENTOS

Nuestra gratitud a la Universidad del Azuay, por permitirnos ser parte de la maestría en Sistemas Vehiculares, proveyéndonos los medios e instrumentos para cumplir nuestros anhelos académicos y profesionales.

Y, de manera muy especial, al Ing. Daniel Iturralde, distinguido catedrático de la Universidad del Azuay, quien con magistral conocimiento y amplia calidad humana, dirigió este trabajo investigativo de tesis.

RESUMEN

OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ECU BASADO EN MODELOS MATEMÁTICOS

El presente trabajo investigativo tiene por objeto mejorar el rendimiento de un motor de combustión interna a través de la reprogramación de la Unidad de Control Electrónica a partir de la concepción generada por los fabricantes de motores, quienes, en su mayoría, restringen la gestión electrónica de un motor que, generalmente, luego es utilizado para desarrollar un nuevo modelo de vehículo, ocupando el mismo diseño mecánico de dicho motor.

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo investigativo se diseñará una metodología basada en “superficies de respuesta”, que a través de técnicas de optimización, efectivizará el encendido y el combustible inyectado en el motor. La aludida metodología consistirá en tres (3) etapas, a saber: a) una recopilación de los trabajos efectuados sobre el tema; b) una reprogramación sobre los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica, apoyada en diseños experimentales; y, c) una validación de los resultados obtenidos en el laboratorio de motores, utilizando un banco dinamométrico de rodillos.

Una vez desarrollada la metodología, misma que devendrá de un acucioso estudio y análisis teórico y práctico de sus postulados, alcance y beneficio, el resultado final será la optimización del funcionamiento de un motor de combustión interna por medio de la modificación de los parámetros de la Unidad de Control Electrónico basado en modelos matemáticos.

PALABRAS CLAVES

Reprogramación, Motor de combustión interna, Unidad de control electrónica, Mapas cartográficos, Banco dinamométrico de rodillos.

**OPTIMIZATION OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE
PERFORMANCE THROUGH MODIFICATION OF ECU PARAMETERS
BASED ON MATHEMATICAL MODELS**

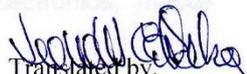
ABSTRACT

This research work aims to improve the performance of an internal combustion engine through the reprogramming of the Electronic Control Unit. This is based on the conception generated by engine manufacturers, who generally restrict the electronic management of an engine, which is then used to develop a new vehicle model, using the same mechanical design of that engine. In order to achieve the objective of this research work, a methodology based on "response surface" will be designed. This is done through optimization techniques to carry out the ignition and fuel injected into the engine. This methodology will consist of three (3) stages, namely: a) a compilation of work done on the subject; b) reprogramming of the Electronic Control Unit on cartographic maps, and supported by experimental designs; and, c) validation of the results obtained in the engines laboratory using a roller dynamometer test bench.

The methodology will be developed after a meticulous study and theoretical and practical analysis of its principles, scope and benefits. The final result will be the optimization of the internal combustion engine performance by modifying the parameters of the Electronic Control Unit on the basis of mathematical models.

KEYWORDS: Reprogramming, Internal Combustion Engine, Electronic Control Unit, Cartographic Maps, Roller Dynamometer Test Bench.




Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRELIMINARES

Carátula.....	<i>i</i>
Certificado del Director de la Tesis.....	<i>ii</i>
Declaración de la Autoría.....	<i>iii</i>
Dedicatoria.....	<i>iv</i>
Agradecimientos.....	<i>vi</i>
Resumen.....	<i>vii</i>
Abstract.....	<i>viii</i>
Índice de contenidos.....	<i>ix</i>
Índice de tablas.....	<i>xiii</i>
Índice de figuras.....	<i>xiv</i>
Índice de anexos.....	<i>xviii</i>
Glosario.....	<i>xix</i>

CONTENIDO DE LA TESIS

Introducción.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	4
Metodología.....	4

Capítulo 1

Estado del arte

1.1	Gestión electrónica en un motor de combustión interna.....	5
1.2	Sistemas de control aplicados en la optimización de la gestión electrónica de motores.....	6
1.2.1	Sistema de control PID.....	6
1.2.1.1	Sistema Escher, aplicando control PID.....	8
1.2.2	Sistema de control adaptativo e inteligente.....	19
1.2.2.1	Algoritmos genéticos para la optimización.....	19

Capítulo 2

Modificación de los parámetros de la Unidad de Control Electrónica

2.1	Diseño de experimentos.....	27
2.1.1	Planeación y realización del diseño experimental.....	28
2.1.2	Análisis.....	29
2.1.3	Interpretación.....	29
2.1.4	Conclusiones finales.....	30
2.2	Clasificación y selección de los diseños experimentales.....	30
2.3	Diseños factoriales 2^K	31
2.3.1	Planeación del experimento.....	32
2.3.1.1	Objetivos.....	38
2.3.1.2	Restricciones	38
2.3.1.3	Proceso de modificación de los parámetros de la Unidad de Control Electrónica.....	40
2.3.1.4	Procedimiento de ensayos.....	44
2.3.1.5	Metodología para la medición de potencia en el banco dinamométrico.....	46
2.3.1.6	Metodología para la medición del consumo de combustible en el banco dinamométrico.....	47

2.3.2	Plan experimental – respuestas.....	50
2.3.3	Elementos de inferencia estadística.....	52
2.3.3.1	Tamaño de la muestra para poblaciones infinitas.....	52
2.3.3.2	Calculo de la media y desviación estándar.....	52
2.3.3.3	Intervalo de confianza para una media.....	54
2.3.3.4	Pruebas de hipótesis.....	55
2.3.3.4.1	Planteamiento de la hipótesis.....	57
2.3.3.4.2	Valor P.....	58
2.3.4	Modelo matemático.....	60
2.3.4.1	Residuos del modelo.....	63
2.3.4.2	Calidad de ajuste.....	65
2.3.5	Análisis de varianza.....	69
2.3.6	Efecto principal.....	74
2.3.7	Diagrama de Pareto.....	76
2.3.8	Efecto de interacción.....	78
2.3.9	Verificación de los supuestos, validación del modelo.....	81
2.3.9.1	Normalidad.....	82
2.3.9.2	Varianza constante.....	84
2.3.9.3	Independencia.....	85

Capítulo 3

Optimización simultánea del proceso con metodología de superficie de respuesta

3.1	Metodología de superficie de respuesta.....	87
3.2	Factoriales 2^2 con punto central	88
3.3	Construcción del diseño central compuesto.....	89
3.4	Modelo de respuesta.....	90

3.4.1	Modelo para la variable respuesta, potencia.....	91
3.4.2	Modelo para la variable respuesta, consumo.....	93
3.5	Verificación de los supuestos, validación del modelo cuadrático.....	95
3.6	Optimización de las respuestas por separado.....	96
3.7	Optimización simultánea de las respuestas.....	104
 Conclusiones y trabajos futuros.....		 110
Bibliografía.....		113
Anexos.....		116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Requisitos para las variables de diseño del modelo del motor.....	23
Tabla 1.2. Requisitos para los parámetros de optimización de la simulación del motor.....	24
Tabla 2.1. Dominio experimental para la optimización de funcionamiento.....	39
Tabla 2.2. Características de la Haltech Sprint 500.....	41
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del corsa 1.4.....	42
Tabla 2.4. Características del medidor de flujo de combustible.....	49
Tabla 2.5. Diseño factorial 2^2 para la potencia.....	51
Tabla 2.6. Diseño factorial 2^2 para el consumo.....	51
Tabla 2.7. Media y desviación estándar de las muestras de potencia.....	53
Tabla 2.8. Media y desviación estándar de las muestras de consumo.....	54
Tabla 2.9. Intervalo de confianza de las muestras de potencia.....	55
Tabla 2.10. Intervalo de confianza de las muestras de consumo.....	55
Tabla 2.11. Diseño de experimentos 2^2 con 5 réplicas para la potencia.....	55
Tabla 2.12. Diseño de experimentos 2^2 con 5 réplicas para el consumo.....	56
Tabla 2.13. Valores observados predichos y residuos para la potencia.....	63
Tabla 2.14. Valores observados predichos y residuos para el consumo.....	64
Tabla 3.1. Resultados del experimento con 5 réplicas y 4 repeticiones al centro....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de bloques de un controlador PID con retroalimentación.....	7
Figura 1.2. Comunicación del sistema.....	11
Figura 1.3. Optimización del torque, variando la masa de combustible inyectada y avance al encendido.....	12
Figura 1.4. Optimización del torque, valor crítico de la presión media efectiva indicada.....	13
Figura 1.5. Optimización del torque y consumo de combustible, entradas de masa de combustible inyectada y avance al encendido.....	15
Figura 1.6. Optimización del torque y consumo de combustible, entrada de inicio a la inyección de combustible y niveles críticos en las salidas.....	16
Figura 1.7. Optimización del torque y consumo de combustible, salidas de: presión media efectiva indicada y consumo de combustible.....	17
Figura 1.8. Optimización del torque y consumo de combustible, salidas de: hidrocarburos y monóxido de carbono.....	18
Figura 1.9. Ciclo de funcionamiento del motor de 4 tiempos – carreras alternativas.....	21
Figura 1.10. Relaciones entre variables.....	25
Figura 2.1. Modelo general de un proceso o sistema.....	28
Figura 2.2. Clasificación de los diseños experimentales.....	31
Figura 2.3. Haltech Sport 500.....	41
Figura 2.4. Vehículo Corsa Wind sobre el banco dinamométrico.....	45
Figura 2.5. Verificación de la presión de los neumáticos.....	45
Figura 2.6. Configuración de valores del vehículo en el banco dinamométrico.....	46
Figura 2.7. Valor de la potencia máxima.....	47
Figura 2.8. Banco dinamométrico MAHA LPS 3000.....	48

Figura 2.9. Medidor de flujo de combustible.....	48
Figura 2.10. Diagrama de conexión del medidor de flujo de combustible.....	49
Figura 2.11. Interfaz del banco dinamométrico.....	50
Figura 2.12. Hipótesis bilateral, regiones de aceptación y de rechazo.....	59
Figura 2.13. Valor P de la hipótesis de la potencia.....	60
Figura 2.14. Valor P de la hipótesis del consumo.....	61
Figura 2.15. Comparación de los valores medidos y calculados para la potencia....	64
Figura 2.16. Comparación de los valores medidos y calculados para el consumo...	65
Figura 2.17. Análisis de regresión para el modelo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$	67
Figura 2.18. Análisis de regresión del modelo de la potencia.....	67
Figura 2.19. Análisis de regresión del modelo del consumo.....	68
Figura 2.20. Representación de los efectos de los tratamientos.....	69
Figura 2.21. Análisis de varianza para la potencia.....	73
Figura 2.22. Análisis de varianza para el consumo.....	73
Figura 2.23. Representación de efectos principales para la potencia.....	75
Figura 2.24. Representación de efectos principales para el consumo.....	75
Figura 2.25. Pareto de efectos principales de la potencia.....	77
Figura 2.26. Pareto de efectos principales del consumo.....	78
Figura 2.27. Representación de interacción de los factores para la potencia.....	79
Figura 2.28. Gráfica de cubos y variable de respuesta para la potencia.....	80
Figura 2.29. Representación de interacción de los factores para el consumo.....	81
Figura 2.30. Gráfica de residuos vs porcentaje acumulado para la potencia.....	83
Figura 2.31. Gráfica de residuos vs porcentaje acumulado para el consumo.....	83
Figura 2.32. Gráfica de predichos vs residuos para la potencia.....	84
Figura 2.33. Gráfica de predichos vs residuos para el consumo.....	85
Figura 2.34. Gráfica de orden de corrida vs residuos para la potencia.....	86
Figura 2.35. Gráfica de orden de corrida vs residuos para el consumo.....	86

Figura 3.1. Gráfica del diseño central compuesto.....	88
Figura 3.2. Análisis de varianza con diseño central compuesto de la potencia con todos los términos.....	91
Figura 3.3. Análisis de varianza con diseño central compuesto de la potencia con términos significativos.....	92
Figura 3.4. Análisis de varianza con diseño central compuesto del consumo con todos los términos.....	93
Figura 3.5. Análisis de varianza con diseño central compuesto del consumo con términos significativos.....	94
Figura 3.6. Gráfica de verificación de supuestos para la potencia.....	95
Figura 3.7. Gráfica de verificación de supuestos para el consumo.....	96
Figura 3.8. Mejor tratamiento y punto óptimo.....	97
Figura 3.9. Configuración para la maximización de la potencia.....	98
Figura 3.10. Valores de las variables independientes para la optimización de la potencia.....	99
Figura 3.11. Superficie de respuesta de la potencia en tres dimensiones.....	99
Figura 3.12. Contorno de la variable dependiente potencia.....	100
Figura 3.13. Parámetros de optimización de la variable dependiente potencia.....	100
Figura 3.14. Configuración para la minimización del consumo.....	101
Figura 3.15. Valores de las variables independientes para la optimización del consumo.....	101
Figura 3.16. Superficie de respuesta del consumo en tres dimensiones.....	102
Figura 3.17. Contorno de la variable dependiente consumo.....	103
Figura 3.18. Parámetros de optimización de la variable dependiente consumo.....	103
Figura 3.19. Parámetros de optimización simultánea para las variables de salida..	104
Figura 3.20. Optimización de respuesta de la potencia y el consumo.....	105
Figura 3.21. Reprogramación del tiempo de inyección para la optimización simultánea.....	106
Figura 3.22. Mapa cartográfico del tiempo de inyección para la optimización simultánea.....	106

Figura 3.23. Reprogramación del adelanto al encendido para la optimización simultánea.....	107
Figura 3.24. Mapa cartográfico del adelanto al encendido para la optimización simultánea.....	107
Figura 3.25. Curva de potencia y torque del motor con optimización simultánea....	108
Figura 3.26. Curva de consumo del motor con optimización simultánea.....	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A-1. Muestras de potencia del motor.....	116
Anexo A-2. Muestras de consumo del motor.....	161
Anexo A-3. Muestras de potencia del motor optimizado.....	184
Anexo A-4. Muestras de consumo del motor optimizado.....	189

GLOSARIO

ABREVIATURAS

ECU	Unidad de Control Electrónica.
PID	Proporcional – Integral – Derivativo.
IMEP	Presión Media Efectiva Indicada.
IMF	Masa de Combustible Inyectada.
SOI	Comienzo de la Inyección.
SFC	Consumo Específico de Combustible.
EO	Apertura de la Válvula de Escape.
IO	Apertura de la Válvula de Admisión.
TDC	Punto muerto superior
CE	Cierre de Válvula de Escape.
BDC	Punto muerto inferior.
IC	Cierre de la Válvula de Admisión.
IP	Punto de Encendido.

OPTIMIZACION DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ECU BASADO EN MODELOS MATEMATICOS

INTRODUCCIÓN

Esta investigación pretende mejorar el rendimiento y las prestaciones de un motor de combustión interna, a partir de la reprogramación de la Unidad de Control Electrónica; dicha reprogramación se encuentra basada en “diseños experimentales” y en metodología de “superficie de respuesta”. Una de las estrategias comerciales de los fabricantes de motores es la de restringir el desempeño electrónico efectivo de los motores, con el afán de comercializar su mejor funcionamiento para venideros prospectos vehiculares. Es por ello que, a través de la reprogramación del sistema de control electrónico del motor, es posible optimizar el funcionamiento del mismo.

En la actualidad, los sistemas de control electrónicos que comandan el funcionamiento de un vehículo tienen una intervención cada vez más importante en el sector automotriz, convirtiéndose en parte fundamental e integral de operaciones tales como:

- El control del motor para minimizar las emisiones del escape y maximizar el ahorro de combustible.
- Control del sistema de transmisión.
- Control del movimiento del vehículo.
- Seguridad y confort.
- Instrumentación para medir parámetros de rendimiento del vehículo y diagnosticar fallas del sistema de abordo.
- Navegación y comunicación.

Así, los Sistemas de Control Electrónico se convierten en pilar trascendental para la ciencia de la ingeniería, toda vez que, su avanzada tecnología permite alcanzar mejores resultados de desempeño en sus elementos controlados. Por lo tanto, dichos sistemas, en su gran mayoría, presentan una serie de ventajas que, desde un ejercicio de costo-beneficio, resultan más efectivos, siempre y cuando sean aprovechados mediante mecanismos que alcancen obtener de sí su mayor capacidad y desarrollo.

Desde la perspectiva planteada en líneas anteriores, y al tenor del objetivo propuesto en el presente trabajo de investigación, se sostiene que un motor puede alcanzar mayores parámetros de desempeño, a través de una metodología que impele un mejor desarrollo o funcionamiento. ¿Cómo lograr lo anterior?...

La Unidad de Control Electrónica, que es una etapa del sistema de control electrónico, administra el funcionamiento de un motor, supervisando el encendido y el combustible inyectado en cantidades exactas y precisas. Estos parámetros de control forman parte de los sistemas de inyección, cuya función es variar la sincronización de ignición e inyección, según las condiciones en las que se encuentra el motor o según los requerimientos del conductor.

Es importante señalar que en los vehículos modernos se pueden desarrollar programaciones y reprogramaciones de dicha Unidad de Control Electrónica del motor por medio de la modificación de mapas cartográficos con datos encriptados para optimizar el funcionamiento del motor. La optimización de la gestión electrónica del vehículo consiste, entonces, en la reprogramación de la Unidad de Control Electrónica del motor, con el fin de mejorar su eficiencia, permitiendo el aumento de la potencia del valor original del vehículo, sin superar los límites mecánicos establecidos por el fabricante.

Ergo, el tema propuesto, toma relevancia cuando la optimización de un motor depende de la aplicación de una adecuada metodología que genere sostenibles y efectivos resultados, la misma que será diseñada y explicada en los diferentes capítulos desarrollados a lo largo del presente trabajo investigativo.

Esta tesis contiene tres (3) capítulos, distribuidos y desarrollados de la siguiente forma:

El primer capítulo contiene el sustento teórico del funcionamiento de varios optimizadores de control electrónico, a fin de explicar y comprender su comportamiento de gestión electrónica, que servirá de fundamento para la elaboración de la nueva metodología de optimización del rendimiento del motor de un vehículo. En este apartado se sistematizan las características, función y finalidad de los optimizadores automáticos, con el objetivo de dar a conocer como actualmente los fabricantes de vehículos realizan las calibraciones de sus motores por medio de la gestión electrónica presente en los mismos.

El segundo capítulo contiene una descripción acerca de los diseños experimentales factoriales y de los elementos de inferencia estadística, con el objeto de extraer un modelo matemático de los factores de salida del proceso (la potencia y consumo de combustible del motor) en función de las variables de entrada del proceso (adelanto al encendido y tiempo de inyección). De esta manera se define claramente el comportamiento del motor de combustión interna para su posterior optimización.

El tercer capítulo hace relación a la optimización alcanzada en el proceso a través de la metodología de “superficie de respuesta”; es decir, se demuestra el incremento de la potencia con el mínimo tiempo de inyección. En consecuencia, se caracteriza un modelo matemático de segundo orden, debidamente comprobado y validado.

Finalmente, se exponen las conclusiones arribadas que, en lo fundamental, demuestran la posibilidad de optimizar el funcionamiento del motor a través de la modificación de parámetros de la Unidad de Control Electrónica, basado en modelos matemáticos y la metodología de “superficie de respuesta”, principalmente.

Objetivo General

Optimizar el funcionamiento de un motor de combustión interna por medio de la modificación de parámetros de la ECU basado en modelos matemáticos.

Objetivos Específicos

- Analizar la información referente a los optimizadores automáticos, utilizado por los fabricantes de motores.
- Modificar los parámetros de los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica del vehículo basados en “diseño experimentales” y metodología de “superficie de respuesta”.
- Verificar el comportamiento del motor de combustión interna en un banco dinamométrico de rodillos, antes y después de la reprogramación de los mapas.

- Obtener conclusiones y recomendaciones concernientes a la reprogramación la Unidad de Control Electrónica del vehículo.

Hipótesis

Se desarrolla una metodología que mediante la variación de los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica se optimiza el rendimiento del motor y de esta manera se obtiene mayores prestaciones para el vehículo.

Metodología

- **Método analítico:** Confirmación del perfecto estado de la electrónica y realización de una copia de seguridad de los datos de la Unidad de Control Electrónica. Se adquiere el comportamiento inicial de la potencia del motor de combustión interna.
- **Método de la modelación.** Utilización de modelos matemáticos que permitan, a través de las diferentes condiciones de entrada, predecir los resultados de salida y de esta manera efectuar cambios necesarios en los mapas cartográficos, basado en la optimización con metodología de superficie de respuesta, que permitan mejorar el funcionamiento del motor de combustión interna.
- **Método científico – experimental:** Comprobación práctica, por medio de un dinamómetro de rodillos, del correcto funcionamiento de los parámetros modificados en los mapas cartográficos de la Unidad de Control para la generación de una optimización del funcionamiento del motor.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará una revisión bibliográfica de la gestión electrónica presente en el motor de combustión interna y de varios optimizadores de control electrónico con el objetivo de citar y comprender la funcionabilidad de cada uno de éstos, a fin de entender su importancia y alcance. Cabe señalar que dichos optimizadores de control trabajan de manera independiente aunque poseen una misma función: *la optimización de un motor*.

1.1 Gestión electrónica en un motor de combustión interna

En la actualidad, el diseño del motor de combustión interna se encuentra influenciado electrónicamente por un sin número de parámetros de control; situación que, desde luego, complica las tareas de regulación asignadas a la Unidad de Control Electrónica. Esta situación se complica aún más cuando se pretende maximizar la potencia de un motor, reduciendo paralelamente el consumo de combustible inyectado (Sun, 2009).

Es importante señalar que los fabricantes de motores deben homologar los vehículos antes de venderlos; es decir, tienen que comprobar y verificar que éstos cumplan con las diferentes normativas técnicas vigentes para su expendio. Debido a que los vehículos están sujetos a todo tipo de regulaciones con respecto a la seguridad activa y pasiva, el medio ambiente, la industria manufacturera, etc., hace imperiosa la necesidad de someterlos a una estricta revisión; así, por ejemplo, con el objetivo de mejorar la calidad del aire en Europa, las emisiones de gases contaminantes tienen límites por normativa, que en varias ocasiones se redujeron gradualmente en la última década, pasando desde la Euro de 1993 hasta la Euro V, que actualmente es la que se encuentra vigente. En consecuencia, las últimas regulaciones concernientes a la cantidad de emisiones contaminantes provenientes de un motor hacia el ambiente obligan a los fabricantes a mejorar los procesos de fabricación de sus vehículos, quienes bajo este emprendimiento realizan varias actividades tendientes a cumplir con dicho objetivo, que de manera breve se exponen de la siguiente forma:

Por una parte, los actuadores presentes en el vehículo son controlados por la Unidad de Control Electrónica, la misma que es conocida por sus siglas en inglés ECU, a través de estrategias de control almacenadas en su memoria. Por otra parte, los técnicos de las industrias manufactureras deben sincronizar una gran cantidad de parámetros de la ECU para cumplir con todas las normativas vigentes, provocando un aumento considerable en el trabajo de calibración y verificación de los motores. (Boes, 2012).

En este contexto, los fabricantes de vehículos y proveedores de motores deben innovar constantemente sus procesos de producción para reducir el tiempo y costo en el desarrollo de sus vehículos. Por lo tanto, los nuevos enfoques tales como el diseño de experimentos o calibración automática se están convirtiendo en actividades esenciales para mantener la competitividad automotriz (Boes, 2012).

1.2 Sistemas de control aplicados en optimización de la gestión electrónica de motores

Los sistemas de control electrónicos, que se aplican para la optimización del rendimiento de un motor de combustión interna, pueden ser definidos como el modificador de las entradas de un motor con el fin de obtener efectos deseados en las salidas del mismo. Entre los sistemas de control más conocidos se encuentran los siguientes: los sistemas de control PID, sistemas de control adaptativo, y los sistemas de control inteligente.

1.2.1 Sistema de control PID

La función Proporcional – Integral – Derivativo, la misma que es identificada con las siglas PID, es un mecanismo de control por retroalimentación¹ que calcula la diferencia o error entre un valor medido y un valor deseado.

El control PID mantiene tres valores diferentes: a) el proporcional, b) el integral, y, c) el derivativo. El *valor proporcional* depende del error actual; el *valor integral* depende de los errores pasados; y, el *valor derivativo* es una predicción de errores futuros. La suma de estos tres valores es usada para controlar y ajustar

¹ Es un mecanismo por el cual una cierta proporción de la salida de un sistema se dirige a la entrada. También denominado “feedback”.

continuamente un proceso dinámico (figura 1.1), hasta alcanzar un valor deseado a la salida del proceso o del motor en el menor tiempo posible (K. J. ANSTROM, 1998).

Fuente: Elaboración propia

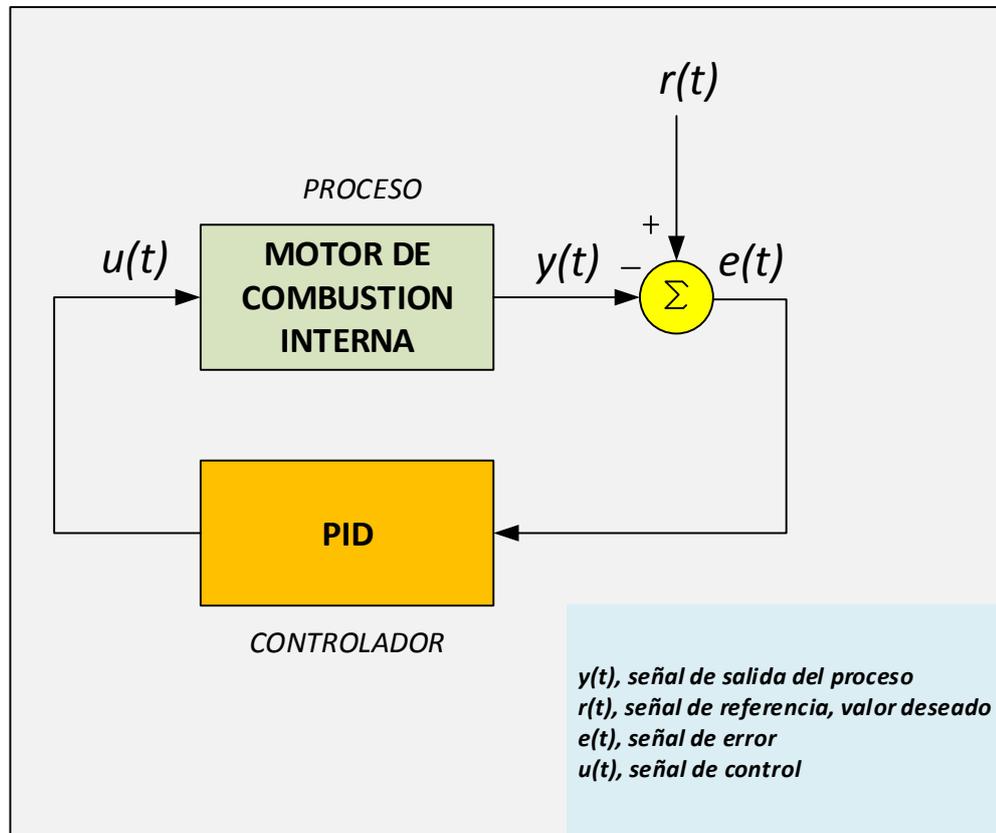


Figura 1.1. Diagrama de bloques de un controlador PID con retroalimentación

Valor Proporcional

El valor proporcional consiste en el producto entre la constante proporcional y la señal de error, cuyo objetivo es que dicho error se aproxime a cero cuando se encuentre en estado estacionario. La fórmula del valor proporcional está dada por:

$$P_{sal} = Kp \times e(t) \tag{1.1}$$

Donde:

P_{sal} , salida del controlador proporcional.

Kp , ganancia proporcional.

$e(t)$, error del proceso.

Valor Integral

El valor integral tiene como objeto disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el valor proporcional. Un pequeño error positivo siempre producirá un incremento en la señal de control y un error negativo siempre dará una señal decreciente, sin importar cuán pequeño sea el error. La fórmula del valor integral está dada por:

$$I_{sal} = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (1.2)$$

Donde:

I_{sal} , salida del controlador integral

Ki , ganancia integral

$e(t)$, error del proceso

Valor Derivativo

El valor derivativo se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error. Si el error es constante, únicamente actúan los valores proporcional e integral. El propósito del valor derivativo es mantener el error al mínimo, corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad con la que se produce, evitando de esta manera que el error se incremente. La fórmula del valor derivativo está dada por:

$$D_{sal} = Kd \frac{de}{dt} \quad (1.3)$$

Donde:

D_{sal} , salida del controlador derivativo.

Kd , ganancia derivativo.

$e(t)$, error del proceso.

1.2.1.1 Sistema ESCHER, aplicando control PID

Un tipo de controlador PID es Escher, cuyo sistema es poderoso, ya que, dependiendo de la cantidad de parámetros a modificar y del número de respuestas

que serán optimizadas, alcanza a afinar y a calibrar, en pocos minutos, los motores de combustión interna. Escher es un sistema que requiere poca configuración, debido a que, quien lo utiliza, únicamente selecciona los valores límites que el proceso debe cumplir y los parámetros a ser optimizados, se evita de esta manera largas secuencias de prueba y tediosos procesamientos de los datos adquiridos. (Boes, 2012).

El proceso de calibración convencional de una ECU implica elegir los puntos de funcionamiento del motor, dentro de sus mapas cartográficos, como primera fase. Posteriormente, continúa una búsqueda completa de los parámetros de calibración para cada punto de funcionamiento seleccionado, con el fin de obtener datos sobre el motor, que más tarde serán procesados con el objeto de encontrar los parámetros óptimos. Este paso demanda una gran cantidad de pruebas, ya que el espacio combinatorio de los parámetros es enorme y la búsqueda de lo óptimo es una tarea difícil. Entonces, Escher es considerada como una herramienta poderosa, toda vez que abrevia todo lo anterior y lo hace de manera automática y efectiva.

Por lo expuesto, para mejorar el rendimiento del motor y cumplir con las diferentes normativas vigentes de cada región, que sobre la materia regulan, los técnicos e ingenieros de las industrias manufactureras de motores que utilizan Escher deben cumplir con tres (3) pasos para su correcta y efectiva aplicación y funcionamiento, a saber:

PRIMER PASO: se debe cumplir con los siguientes procedimientos: a) definición de los factores de salida del proceso a ser optimizados, b) precisión de los valores límites que deben cumplir los gases contaminantes; y, c) encuentro del área de búsqueda para la optimización dentro de los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica.

SEGUNDO PASO: activación de la secuencia de prueba del motor con la ayuda del “software de control”, que actúa de manera autónoma, pues no requiere la intervención humana para progresar con dicha secuencia.

TERCER PASO: análisis de los datos adquiridos por el software de control, efectuada por los ingenieros de las industrias manufactureras, quienes seleccionan el ajuste óptimo, basados en las especificaciones planteadas en el primer paso arriba

expuesto. Cabe señalar que esta secuencia de prueba se repite un número de veces igual al número de factores a ser optimizados (Noel, 2012).

Optimización del torque con Escher

La gestión electrónica de control del motor tiene como propósito incrementar al máximo la eficiencia y rendimiento del motor; teniendo presente que la eficiencia es la relación entre la potencia útil, que entrega el motor, y la cantidad de energía total empleada para el funcionamiento del mismo. El proceso de medición de la potencia implica un trabajo por unidad de tiempo, que representa el torque multiplicado por la velocidad angular. Es decir, el torque tiene la cualidad de generar potencia y se define como *la tendencia que tiene la fuerza a hacer girar un cuerpo sobre el que actúa* (Stotsky, 2009). Por lo expuesto, el torque es uno de los factores de salida con mayor influencia sobre la eficiencia y rendimiento de un motor.

La optimización del torque con Escher, para el ejemplo, es aplicado en un motor real monocilíndrico de 125cc a gasolina. Para esta prueba se accede a la Unidad de Control Electrónica por medio de un software llamado ControlDesk. Escher y ControlDesk se procesan en diferentes computadoras, y se comunican a través de un protocolo llamado MCD – 3; esto permite a Escher leer y escribir sobre los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica. La masa de combustible inyectado, el adelanto al encendido y el inicio a la inyección son gestionados por la Unidad de Control Electrónica; sin embargo, Escher tiene el control absoluto sobre la Unidad. Finalmente, un analizador de gases se encuentra conectado en el sistema de escape y envía sus datos a Escher, a través de un puerto serial. La figura 1.2 muestra la comunicación entre los distintos sistemas.

Es esta prueba, el punto de funcionamiento es de 5000 rpm y 870 mbar de presión en el colector de admisión. El objetivo es maximizar la “presión media efectiva indicada”, registrada por sus siglas IMEP, controlando, paralelamente, la “masa de combustible inyectada”, identificada por sus siglas IMF, y el avance del encendido. En la figura 1.3 se observa las curvas que definen las variables de entrada y la variable de salida.

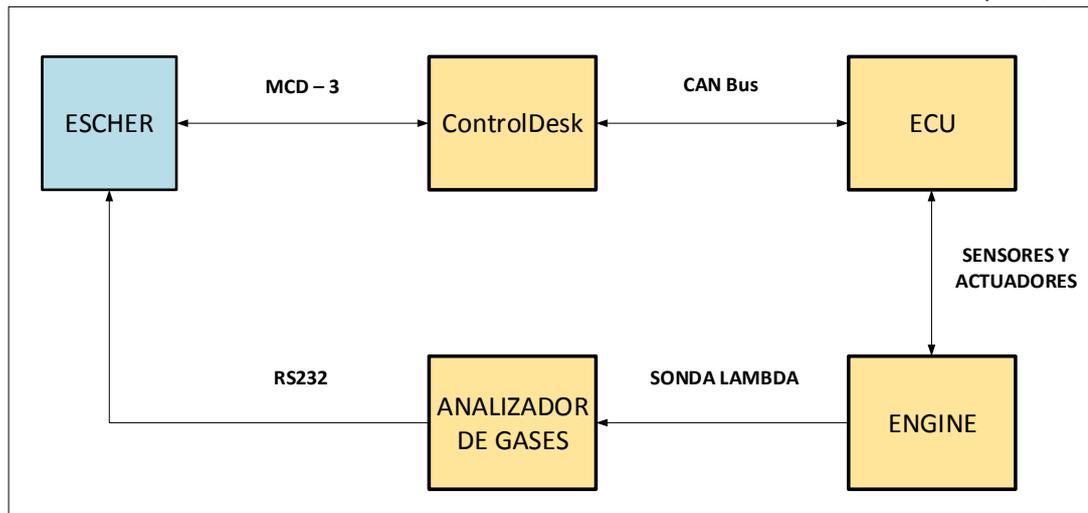


Figura 1.2. Comunicación del sistema

Al analizar la figura 1.3 se observa que la variable de salida IMEP está en función de un valor crítico, cuyo nivel y rango se detalla en la figura 1.4. Al comenzar la prueba de optimización del torque, Escher no posee ninguna referencia en relación al funcionamiento del proceso, que en este caso es el motor monocilíndrico; sin embargo, a medida que progresa la secuencia de prueba, Escher empieza a reconocer el funcionamiento del proceso a partir de sus acciones y observaciones. Al inicio, Escher disminuye las dos variables de entradas controladas, lo cual conduce a un aumento del nivel crítico del IMEP, mientras el valor de IMEP decrece, siendo esto un error. Entonces, Escher reacciona ante esta situación y toma como primera acción el aumento del IMF y, posteriormente, incrementa el avance al encendido. Estas operaciones conllevan al final de la secuencia de prueba a que los valores de IMEP sean maximizados, logrando así el objetivo planteado en esta prueba. (Boes, 2012).

Se deja claro que en el tema anterior se demostró el alcance de la maximización de los valores del torque del motor. En este apartado se demostrará la posibilidad de maximizar más parámetros, tales como: el torque, el consumo de combustible y los gases contaminantes, simultáneamente.

Con los sistemas de control electrónicos se pretende optimizar el funcionamiento del motor de combustión interna de tal manera que permita maximizar la potencia de un motor reduciendo paralelamente el consumo de combustible inyectado, y además manteniendo los valores límites de los gases contaminantes dentro de los parámetros establecidos por las normativas técnicas.

Escher, permite lo antes mencionado de manera autónoma y en el menor tiempo posible.

Fuente: (Boes, 2012)

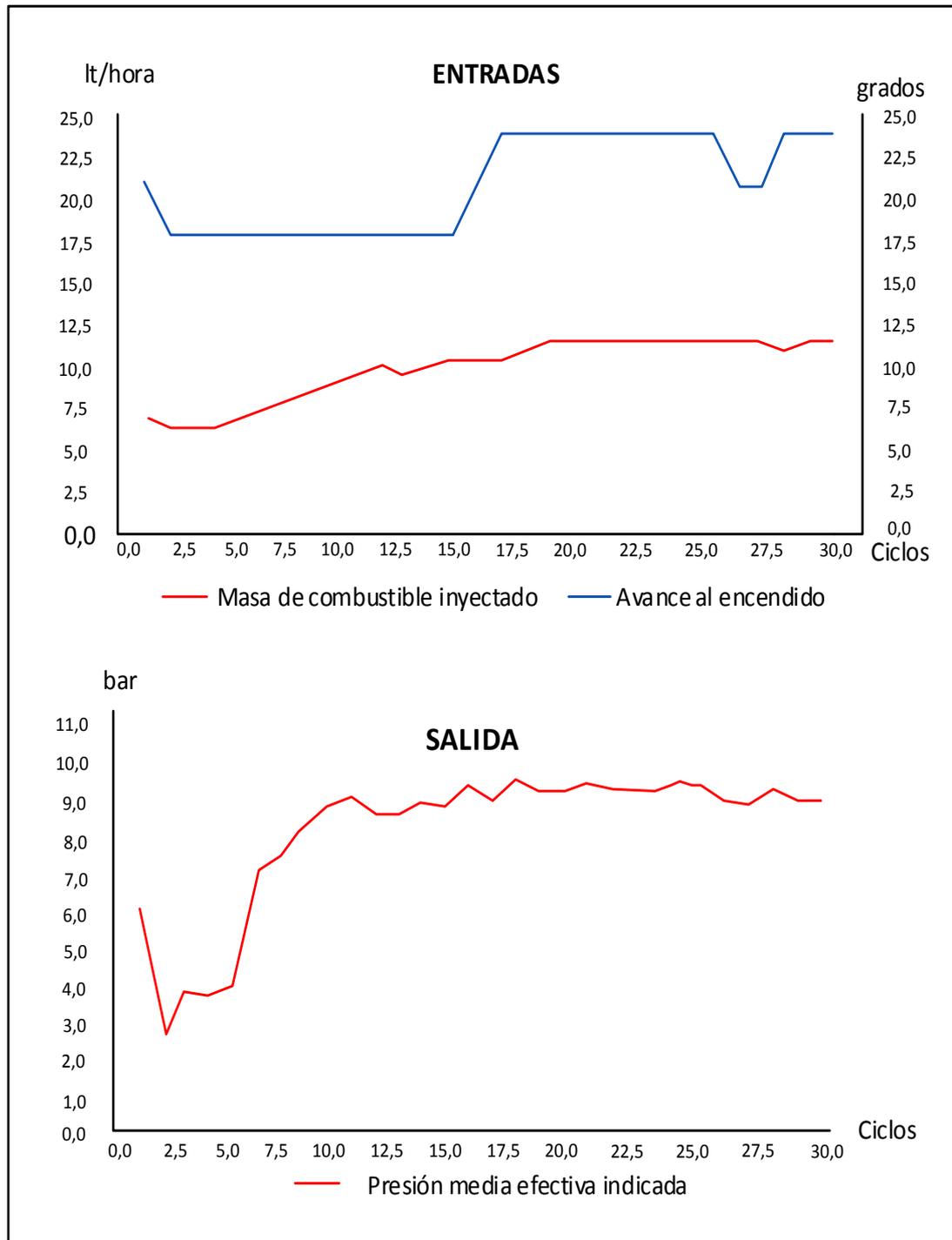


Figura 1.3. Optimización del torque, variando la masa de combustible inyectada y avance al encendido.

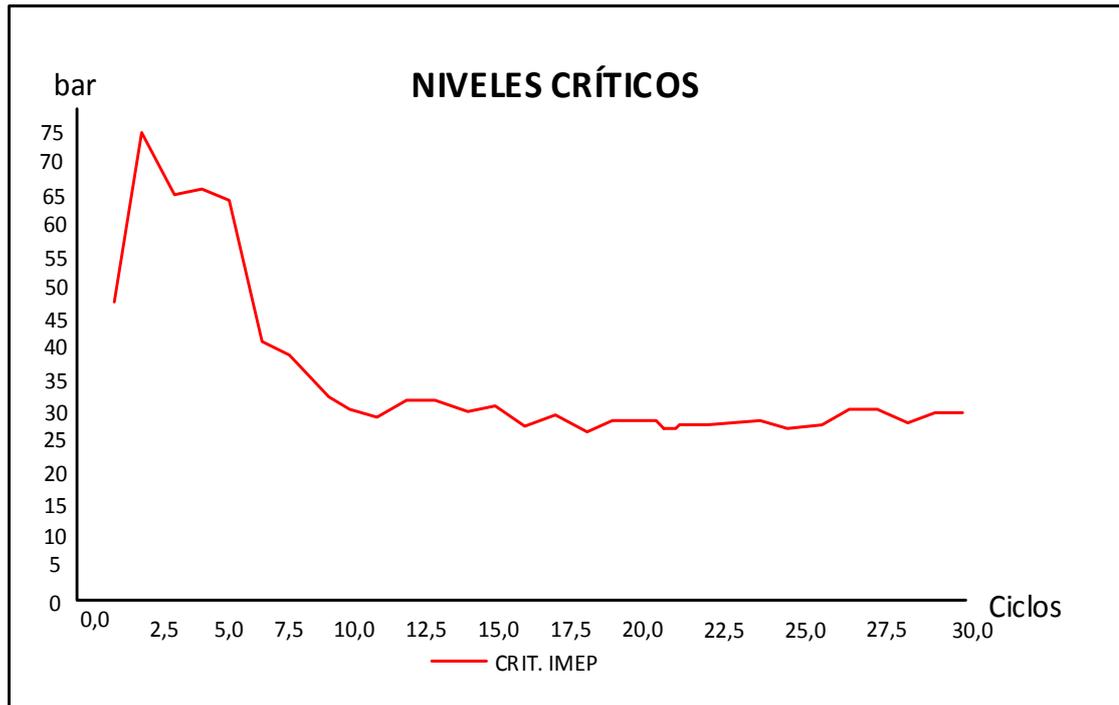


Figura 1.4. Optimización del torque, valor crítico de la presión media efectiva indicada.

Para la optimización del torque y el consumo de combustible, evitando sobrepasar los límites de gases contaminantes del motor, Escher controla las variables de entrada: el adelanto al encendido y el “comienzo de la inyección”, este último conocido por las siglas SOI. El objetivo es maximizar el IMEP, minimizando el “consumo específico de combustible”, identificado por las siglas SFC, y verificando los límites máximos de hidrocarburos (HC), los mismos que deben estar por debajo de 500 ppm, y de monóxido de carbono (CO), que a su vez debe estar por debajo del 3%. El área de búsqueda de la secuencia de prueba se efectúa en el punto de funcionamiento de 2500 rpm y 750 mbar en el colector de admisión.

En la figura 1.5 se muestran los parámetros de entrada modificados por Escher, masa de combustible inyectado y avance al encendido; mientras que en la figura 1.6 se detalla la variable de entrada, inicio de la inyección de combustible y los niveles críticos de: presión media efectiva indicada, consumo de combustible, monóxido de carbono e hidrocarburos. Los niveles críticos son valores configurados en función de los requerimientos de la casa fabricante del motor y de la normativa vigente para cada país.

En la figura 1.7 se muestran las variables de salida: presión media efectiva indicada, y consumo de combustible; mientras que en la figura 1.8 se detalla las variables de salida: hidrocarburos y monóxido de carbono, con sus respectivos niveles críticos. Los niveles críticos son valores configurados en función de los requerimientos de la casa fabricante del motor y de la normativa vigente para cada país. Al iniciar la secuencia de prueba el nivel crítico de la IMEP está asociado con un alto consumo de combustible del motor, como se aprecia en la figura 1.7, situación que será regulada por Escher, cuya función comienza precisamente por reducir esta acción. Así, Escher incrementa la IMF y el avance al encendido, disminuyendo paralelamente el SOI. Lo anterior reduce efectivamente la SFC y también aumenta la IMEP; sin embargo, como efecto secundario, existe un incremento de los gases contaminantes, pues el monóxido de carbono supera el límite máximo, como se puede observar en la figura 1.8.

Por lo tanto, Escher tiene un nuevo desafío que consiste en reducir el monóxido de carbono a valores establecidos por la normativa vigente, desde luego, sin que los otros factores se vean afectados. Después de varias oscilaciones del sistema de control, Escher encuentra un valor para cada uno de los parámetros de entrada (IMF, avance al encendido, y SOI) que maximiza la IMEP, minimiza el SFC, y mantiene los hidrocarburos y el monóxido de carbono por debajo de sus límites máximos.

Es importante señalar que lo anterior es posible, toda vez que, Escher es un controlador de tipo “caja negra”², consecuentemente es un sistema cuyas propiedades son fácilmente aplicables a cualquier vehículo. Pero ¿cuál es el principio básico del controlador Escher? el sistema memoriza el estado del proceso, lo cual significa que cuando se aplica una acción en la entrada del controlador, se observan las reacciones del proceso en las salidas del mismo. Ergo, Escher usará dicha información para decidir si esta acción fue la correcta o no, en cuanto se refiere al comportamiento del motor; dicho comportamiento está basado en las configuraciones iniciales definido por los técnicos que supervisan la calibración. La calidad del control de este proceso mejora con el tiempo (al comienzo el controlador no sabe nada acerca del proceso, pero aprende continuamente de las acciones para controlar el motor).

² Aquel elemento que es estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno.

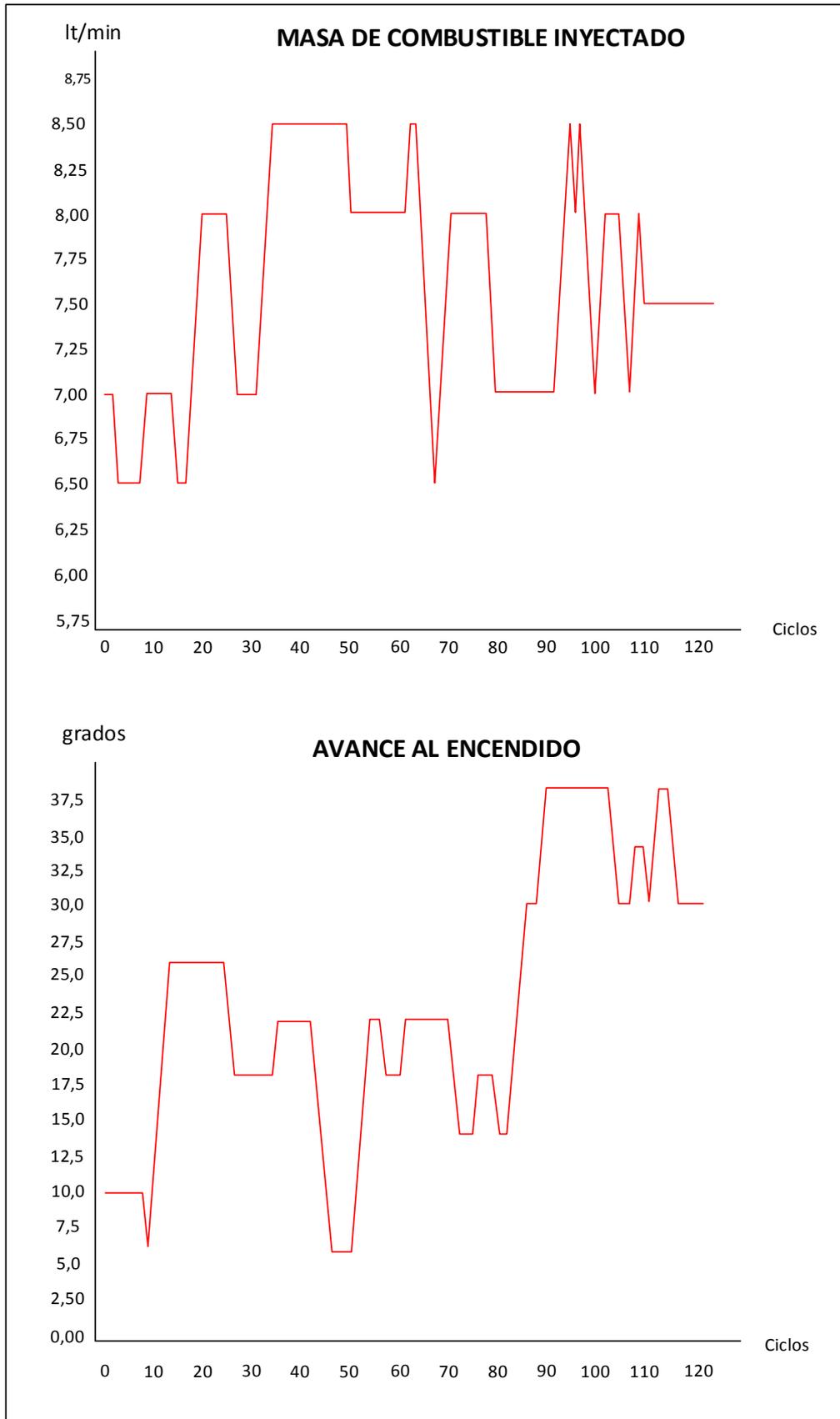


Figura 1.5. Optimización del torque y consumo de combustible, entradas de masa de combustible inyectada y avance al encendido.

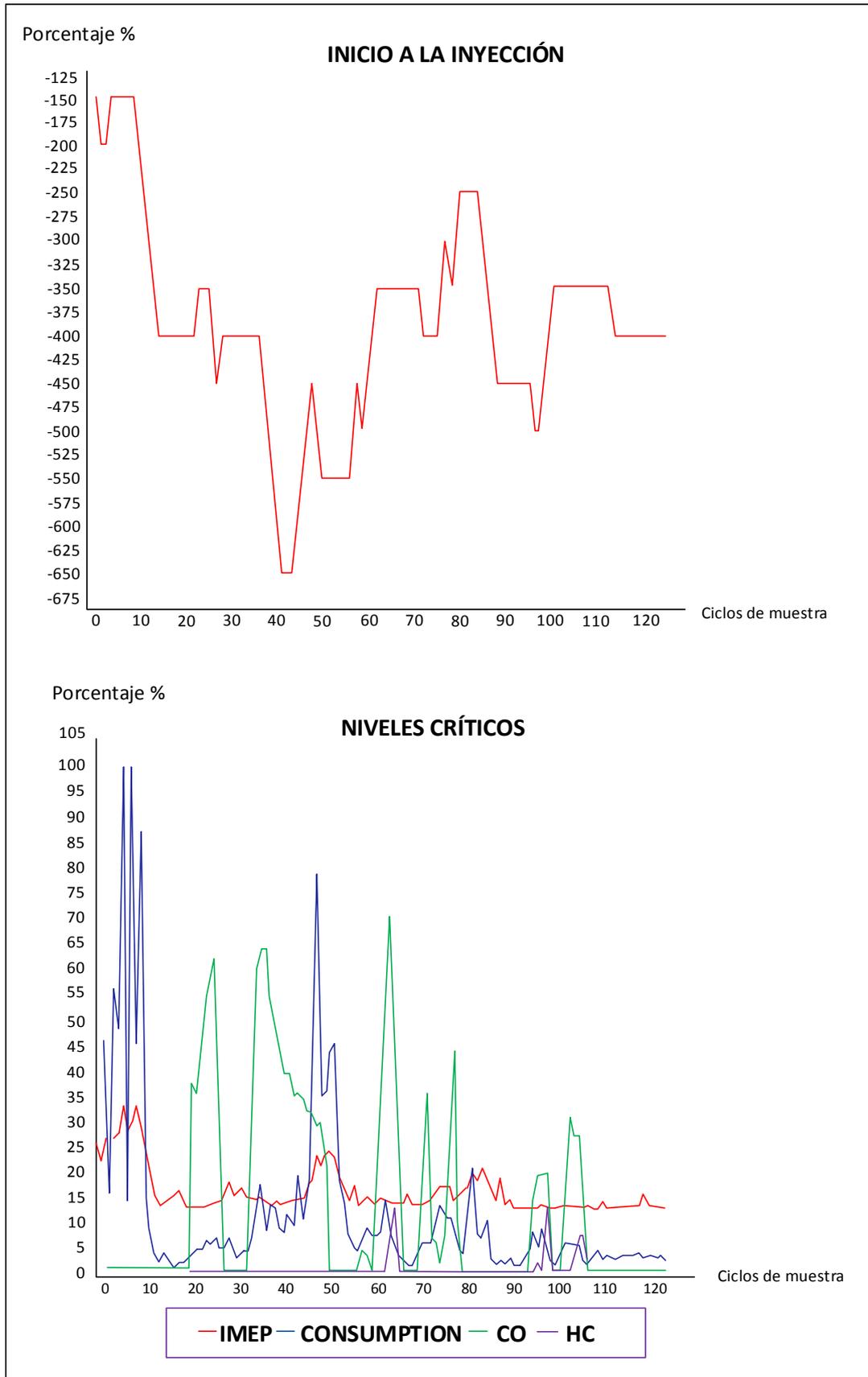


Figura 1.6. Optimización del torque y consumo de combustible, entrada de inicio a la inyección de combustible y niveles críticos en las salidas.

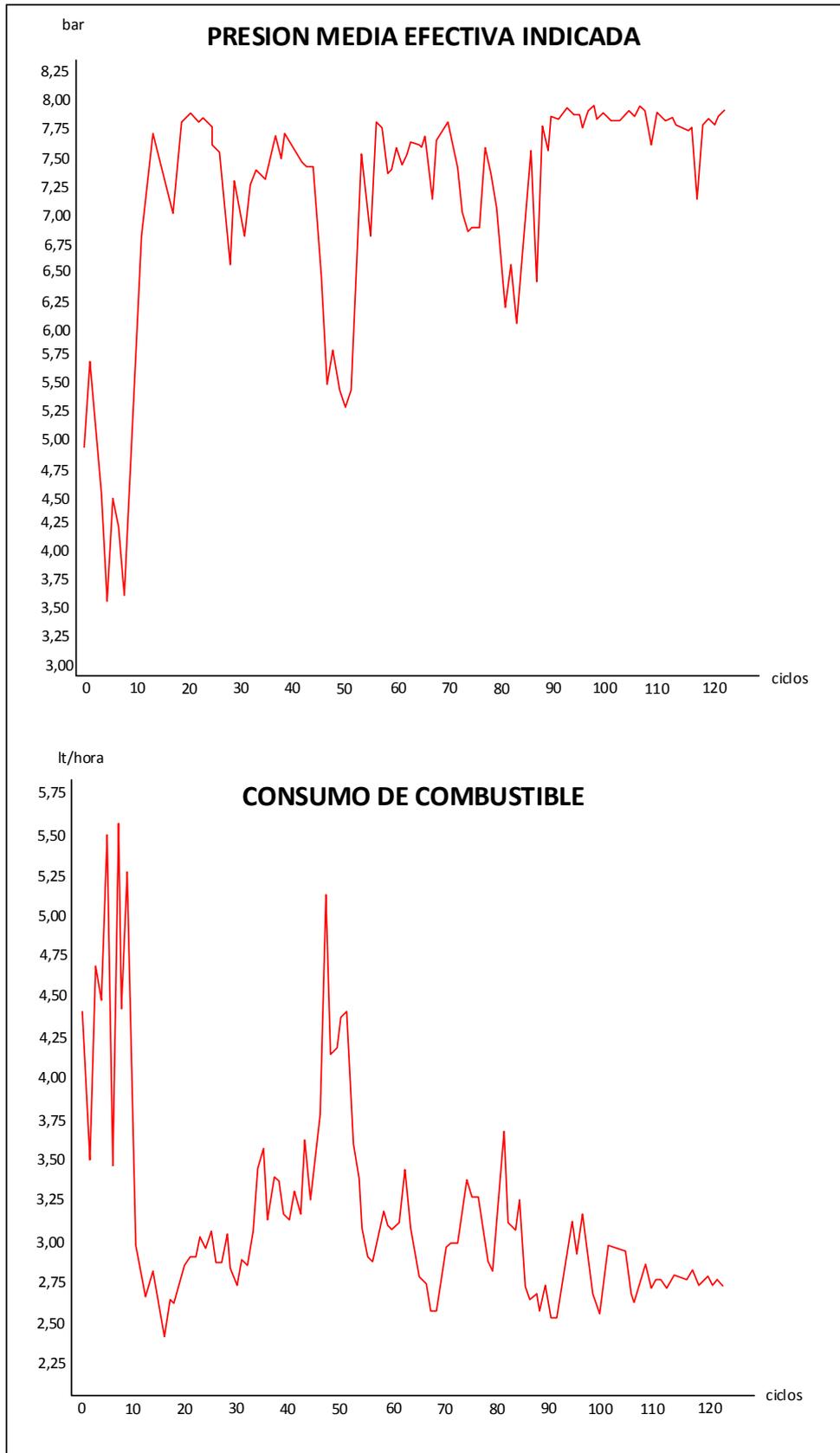


Figura 1.7. Optimización del torque y consumo de combustible, salidas de: presión media efectiva indicada y consumo de combustible.

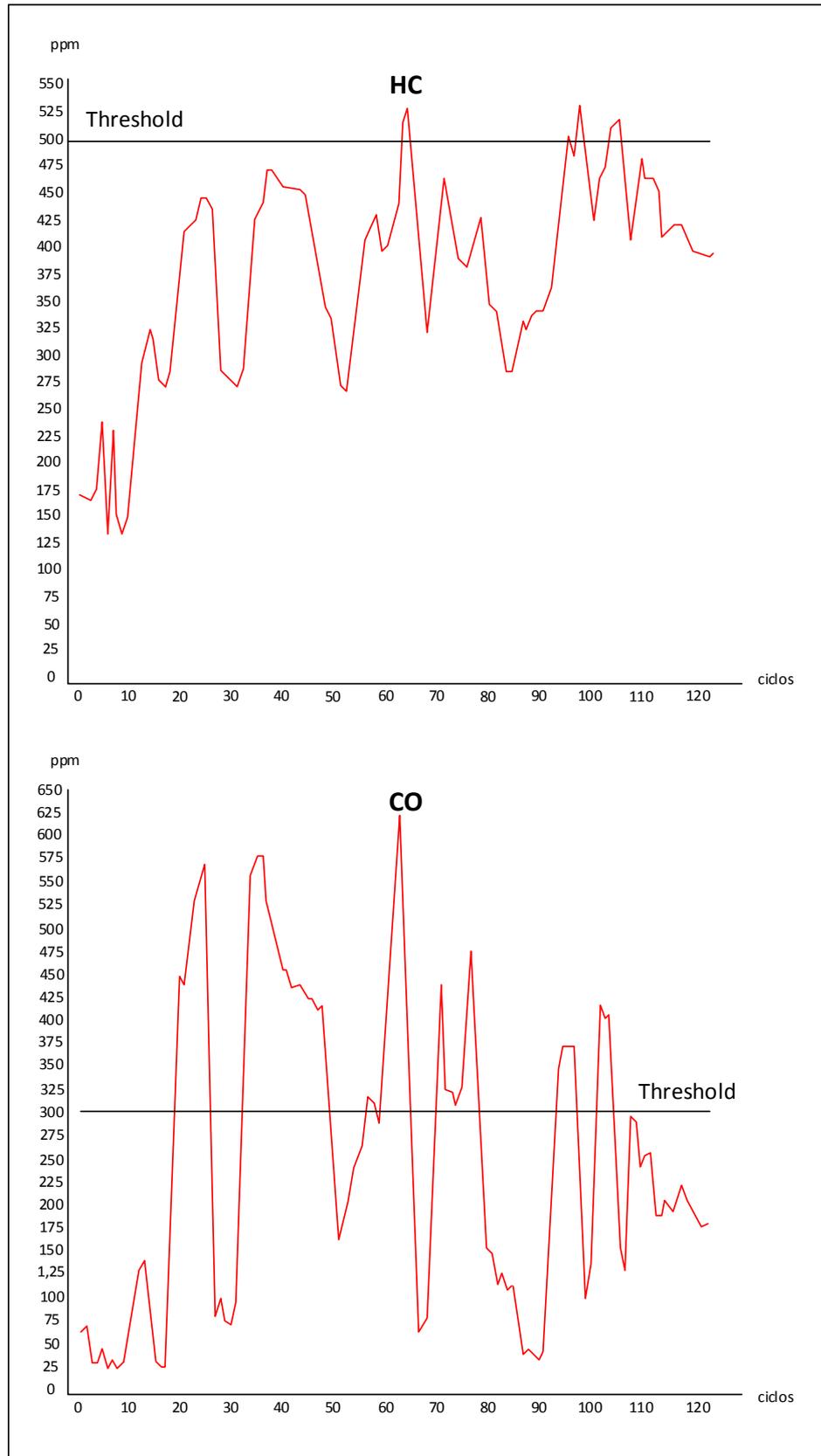


Figura 1.8. Optimización del torque y consumo de combustible, salidas de: hidrocarburos y monóxido de carbono.

Se deja claro que el sistema Escher, a través del circuito de procedimiento detallado anteriormente, se encuentra en continuo auto aprendizaje; es decir, que la información generada, a través de las entradas y salidas del sistema Escher, es memorizada por éste, generando un acopio de datos que será usado, posteriormente, para la calibración automática de la ECU. Esta herramienta permite encontrar ajustes óptimos, en un periodo relativamente pequeño, sin configurar una gran cantidad de parámetros en la práctica y sin tener un conocimiento detallado del sistema (Boes, 2012).

1.2.2 Sistemas de control adaptativo e inteligente

El término adaptativo hace relación a la función de modificar el comportamiento del sistema, de acuerdo a las nuevas circunstancias presentadas dentro del proceso que será optimizado. Para profundizar el concepto, un controlador adaptativo es en definitiva un regulador que puede modificar el comportamiento del sistema en respuesta a cambios en la dinámica del mismo; sin embargo, existen muchas definiciones de control adaptativo, siendo una de las más aceptadas, como un tipo especial de control no lineal en el que el estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo, que evolucionan a diferente velocidad: 1) la escala lenta, que corresponde a los cambios de los parámetros y, por consiguiente, a la velocidad con la cual los parámetros del regulador son modificados; y, 2) la escala rápida, que corresponde a la dinámica del bucle ordinario de realimentación (Rubio, 1996)

1.2.2.1 Algoritmos genéticos para la optimización

Un tipo de controlador adaptativo son los algoritmos genéticos, cuyo principio de funcionamiento puede ser utilizado para la optimización de los motores de combustión interna a través de tareas de simulación. Las acciones de simulación permitirán a la vez procedimientos prácticos y manipulaciones directas sobre un motor real; además por medio de algoritmos genéticos es posible generar modelos matemáticos que definan el comportamiento del motor.

El objetivo de desarrollar y calibrar una Unidad de Control Electrónica del motor es proporcionar ajustes optimizados para las variables de control en un punto específico de trabajo. Debido a la gran complejidad de esta tarea, los enfoques de optimización convencionales implican una rigurosa búsqueda de los parámetros óptimos del motor; por lo tanto, no son del todo recomendables actualmente en la

industria manufacturera de motores, por razones de: tiempo, dinero, recursos, entre otros. Por ello, dentro de esta realidad, para reducir recursos y alcanzar mejores resultados de optimización, aparecen técnicas basadas en algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos permiten una *simulación* completa del motor; es decir, a través de algoritmos genéticos se evitaría la presencia física del motor sobre un banco de pruebas, para la comprobación de su funcionamiento y optimización. Además, los resultados recogidos durante el proceso de optimización pueden ser utilizados para desarrollar un modelo matemático del motor.

Por lo expuesto, se puede concluir diciendo que la optimización del motor, a través de modelos matemáticos, consiste en la búsqueda de un mínimo y un máximo, lo cual redundaría en el alcance de mayores beneficios de rendimiento del motor con menores costos ambientales y económicos. Cabe resaltar que los objetivos antes mencionados presentan una dificultad práctica, ya que se intenta lograr beneficios de rendimiento con menores costos, siendo esto una permanente complicación, toda vez que, fusionar positivamente calidad con austeridad no siempre es una labor sencilla. Lo anterior sucede al tratar de reducir al mínimo el consumo de combustible del motor con la maximización simultánea de la potencia. En consecuencia, en la práctica, la consecución de los objetivos antes tratados serán posibles a través de la intervención de una serie de recursos, combinaciones, parametrizaciones o compensaciones que permitan obtener un resultado óptimo (Sun, 2009).

Algoritmos genéticos para un motor de 4 tiempos

El principio de funcionamiento de un motor de cuatro tiempos se basa en cuatro movimientos alternativos del pistón en cada ciclo del motor, a saber: 1) carrera de admisión, 2) carrera de compresión, 3) carrera de combustión, y 4) carrera de escape. Todo este proceso de funcionamiento del motor puede ser calibrado a través de operaciones de ajuste y configuración del motor; por ejemplo, configuraciones en: a) la apertura de la válvula de admisión, b) el inicio de la inyección de combustible, c) el término de la inyección de combustible, y d) el inicio de la fase de combustión.

Para definir el momento de aplicación de cada una de las configuraciones antes mencionadas, el sistema de control se basa en el ángulo de giro del cigüeñal, el mismo que gira 720° para un ciclo completo de funcionamiento del motor. La figura 1.9 muestra la distribución de cada una de las acciones de configuración y los 720° de movimiento del cigüeñal.

Al analizar la figura 1.9, se observan las fases de funcionamiento del motor, que contienen cuatro carreras alternativas; comienza con la carrera de admisión, el mismo que cierra la válvula de escape (este punto es conocido por las siglas CE) y mantiene abierta la válvula de admisión. Con esta situación, el pistón aspira aire fresco en su carrera descendente y, paralelamente, el combustible es inyectado en la cámara de combustión. Esta carrera continúa hasta poco después de que el pistón llega al punto muerto inferior. En el momento que se cierra la válvula de admisión, identificado por las siglas IC, la carrera de compresión inicia y el pistón se mueve nuevamente hacia arriba hasta que llega al punto de encendido, conocido por sus siglas IP; es decir, el ciclo del motor entra en la carrera de combustión.

Fuente: (Sun, 2009)

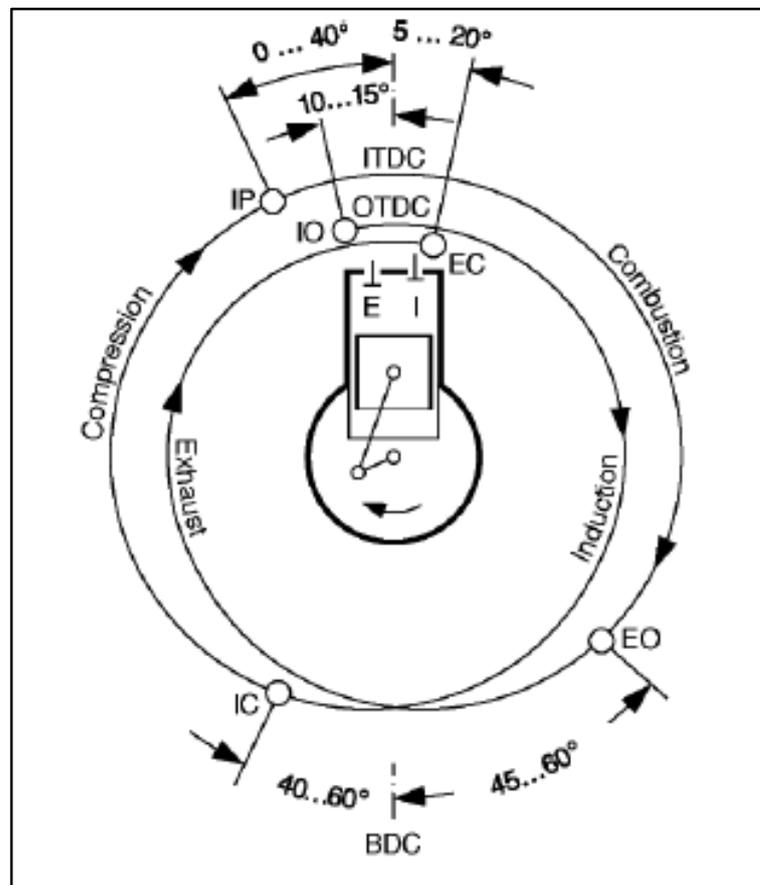


Figura 1.9. Ciclo de funcionamiento del motor de 4 tiempos – carreras alternativas

Después el pistón se mueve en carrera descendente y el motor provee de energía mecánica al cigüeñal. Cuando todo este proceso culmina, se da inicio a la carrera de escape, para lo cual se requiere que la válvula de escape se abra justo antes de que el pistón llegue al BDC, registrado como el punto muerto inferior. Luego de este punto, los gases combustionados, que se encuentran dentro del motor, son

expulsados con el movimiento ascendente del pistón hasta el punto muerto superior, identificado por las siglas PMS; sin embargo, antes de que la válvula de escape se cierre (este momento es conocido por las siglas EO) la válvula de admisión se abre (este instante es identificado por las siglas IO); es decir, comienza, nuevamente, la carrera de admisión. Esta posición del punto muerto superior del cigüeñal, identificado por las siglas TDC, es conocido como traslape de válvulas; esto es, donde se superponen las carreras de admisión y de escape.

Como se muestra en la figura 1.9, los puntos IO, IC, EO, CE, e IP son configurables y ajustables, en *simulación*, a través de algoritmos genéticos; por lo tanto, mediante el ajuste de estos parámetros, se puede alcanzar el rendimiento deseado del motor, de manera virtual. Una vez definido, virtualmente, los valores de estos parámetros se procede a transferirlos a la Unidad de Control Electrónica de un motor real, el mismo que, posteriormente, será sometido a pruebas de funcionamiento y desempeño reales, en un laboratorio de motores. (Dietsche, 2007).

Software WAVE³ como control adaptativo (Zitzler., 1999)

El principio de funcionamiento del motor de combustión interna con sus cuatro carreras alternativas puede ser simulado a través de modelos matemáticos en software WAVE, el mismo que es representado a través de una plataforma gráfica, donde la información más importante es almacenada en un archivo con extensión XML. Por medio de este archivo XML se puede modificar los parámetros del modelo del motor con el objeto de optimizar las salidas del mismo.

A continuación se presenta un caso, práctico, donde se analiza un modelo de motor de cuatro tiempos con un solo cilindro a 3500 rpm optimizado por WAVE. Existen siete variables de diseño $x_1 \dots x_7$ para optimizar dicho modelo. Estas variables se muestran en la tabla 1.1.

El proceso de combustión se inicia solo después de que se ha producido la inyección de combustible en el motor, situación que representa una condición de restricción que puede ser definida a través de la siguiente ecuación matemática:

³ A computer-aided engineering tool developed by Ricardo Ltd.

$$x_4 + x_5 < x_6 \quad (1.4)$$

Donde:

x_4 , inicio de la inyección de combustible.

x_5 , inyección de combustible.

x_6 , inicio del proceso de combustión.

Tabla 1.1. Requisitos para las variables de diseño del modelo del motor.

VARIABLE Xi	DESCRIPTION	UNIT
X1	Relación aire/combustible	-
X2	Diámetro del acelerador	milímetros [mm]
X3	Presión de combustible	bares [bar]
X4	Comienzo de la inyección	grados [gra]
X5	Duración de la inyección	grados [gra]
X6	Comienzo de la combustión	grados [gra]
X7	Apertura de la válvula de admisión	grados [gra]

Fuente: (Sun, 2009)

En la simulación se considera los valores de rendimiento que se observan en la tabla 1.2.

Los resultados del rendimiento del modelo del motor son presentados a través de procesos de simulación. Esta simulación genera un archivo de texto donde los valores de rendimiento son visualizados y almacenados.

Los tres primeros valores, y_1, y_2, y_3 se convertirán en los objetivos de optimización, y los demás son tomados como restricciones adicionales. La última columna de la tabla 1.2 muestra el valor de la prioridad para el rendimiento del motor, la misma que proporciona una referencia cuando existe algún tipo de conflicto entre valores intermedios.

Cabe señalar que la simulación es considerada como una “caja negra” la cual viene expresada de la siguiente forma:

$$\vec{y} = \vec{f}(\vec{x}) = (\vec{f}_1(\vec{x}), \vec{f}_2(\vec{x}) \dots \dots \vec{f}_m(\vec{x})), \quad m = 13 \quad (1.5)$$

Donde:

$\overrightarrow{f(x)}$, el resultado de la optimización.

Tabla 1.2. Requisitos para los parámetros de optimización de la simulación del motor.

fi	Descripción	Unidad	Objetivo	Prioridad
y1	Consumo específico de combustible	Kg/kW/h	Mínimo en [0,1]	2
y2	Presión media efectiva indicada	bar	Máximo en [0,α]	1
y3	Presión media efectiva	bar	Máximo en [0,α]	1
y4	Relación aire/combustible promedio de los cilindros	-	≈14.5 (10,5, 18,5)	3
y5	Presión máxima del primer cilindro	bar	≤ 130 (Presión)	3
y6	Tasa de incremento máxima de la presión en el cilindro	bar/kW	≤ 8	3
y7	Velocidad de la turbina	U/min	≤ 180000	1
y8	Área de la válvula de descarga de la turbina	K	in [0,400]	-
y9	Temperatura en el conducto de admisión	K	y10-y9≤180	-
y10	Temperatura en el conducto de escape	K		-
y11	Temperatura en la entrada de la turbina	K	≤1323,15K	1
y12	Temperatura en la salida de la turbina	K	≤1223,15K	-
y13	Parada del compresor	-	0	1

Fuente: (Sun, 2009)

Con la finalidad de facilitar la búsqueda de los valores que deben asignarse a las demás variables del diseño, los experimentos son efectuados de tal manera que los puntos son distribuidos de modo aleatorio y evaluados en el espacio de búsqueda. La figura 1.10 muestra las relaciones entre estas variables.

La figura 1.10 (a) demuestra que la relación entre los objetivos y_3 y y_2 tiene un incremento lineal; es decir, alcanzan el mínimo y el máximo, simultáneamente. Entonces, y_3 y y_2 pueden ser considerados como un único objetivo. Las variables y_1 y y_2 son inversamente proporcionales, y sus efectos se detallan en la figura 1.10 (b) donde se observa que no se puede obtener el óptimo valor simultáneamente para ambas variables. La relación entre x_1 y y_4 que se define figura 1.10 (c), demuestra que y_4 es una función decreciente de x_1 , definiendo el valor óptimo de y_4 en 14.5, con

este valor de y_4 , se asigna a la variable x_1 un valor aproximado de 0.683. En la figura 1.10 (d) se detalla la relación entre el objetivo y_2 y las variables x_4, x_5 y x_6 , las mismas que son distribuidas de manera irregular, es decir, que no se puede encontrar dependencias entre el factor y las variables.

Para obtener una solución óptima y que sea aplicable al motor real, se define la solución más apropiada a través de un análisis complementario y, finalmente, se valida el modelo por medio de un banco de pruebas de motor de combustión interna.

Fuente: (Sun, 2009)

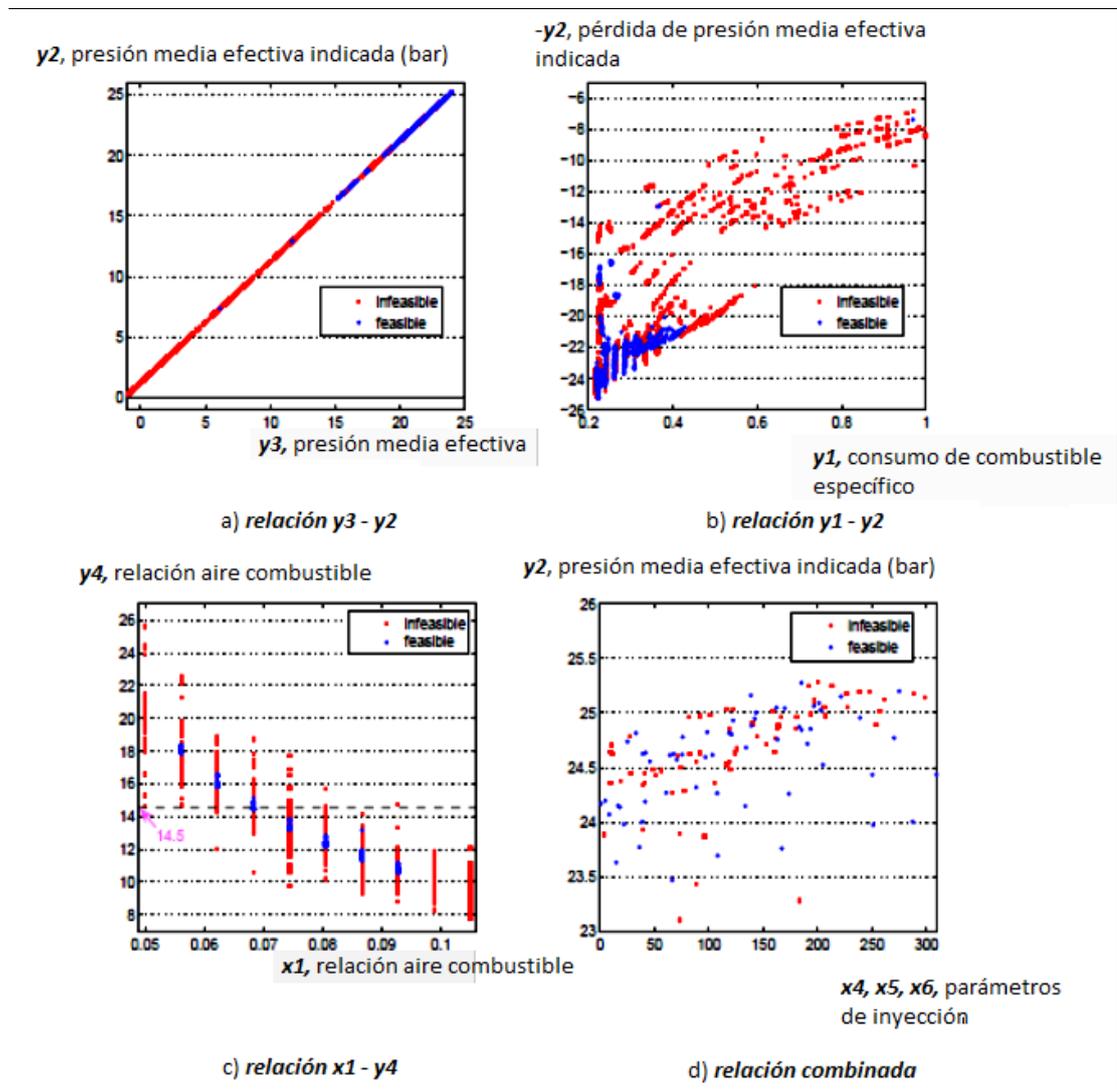


Figura 1.10. Relaciones entre variables.

¿Cuál es el futuro de algoritmos genéticos aplicados en la optimización de un motor de combustión interna? Es posible aumentar el número de configuraciones con la finalidad de alcanzar un proceso de optimización más eficiente del motor, aplicando algoritmos genéticos y, de esta manera, reduciendo el número de soluciones no factibles. Además, al aplicar una combinación de algoritmos genéticos con otras técnicas de optimización, las cuales pueden ser adoptadas con la finalidad de alcanzar rendimientos más eficientes del motor a través de estos enfoques híbridos. En conclusión, la aplicación de algoritmos genéticos aplicados en tareas de optimización permitirá proporcionar resultados de optimización automatizados e interfaces de modelos de motores arbitrarios con otras capacidades estadísticas.

CAPÍTULO II

MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICA

En este capítulo se obtiene el modelo matemático de los factores de salida del proceso o motor (potencia y consumo de combustible). El objetivo es la optimización del motor, mediante la aplicación de diseños experimentales factoriales y de los elementos de inferencia estadística. Es decir, en este apartado se describen los momentos que llevan a la modificación de los parámetros intervinientes de la unidad de control electrónica para la optimización del motor, como fin ulterior.

2.1 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos, o también conocido como diseño experimental, permite determinar qué pruebas se deben realizar y de qué manera hay que hacerlo para obtener los datos que, analizados estadísticamente, proporcionarán evidencias objetivas que permitirán responder las interrogantes planteadas y, de esa manera, clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr consecuentes mejorías.

Ergo, los experimentos se usan para estudiar el desempeño de procesos y sistemas. El proceso o sistema puede representarse con el modelo ilustrado en la figura 2.1.

Algunas variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p , son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_p , son no controlables. Los objetivos del experimento podrían comprender los siguientes:

1. Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia sobre la respuesta y .
2. Determinar cuál es el ajuste de las variables x que tienen mayor influencia para que la salida y esté casi siempre cerca del valor nominal deseado.
3. Determinar cuál es el ajuste de las variables x que tiene mayor influencia para que la variabilidad de la salida y sea reducida.

- Determinar cuál es el ajuste de las variables x que tiene mayor influencia para que los efectos de las variable no controlables z_1, z_2, \dots, z_p , sean mínimas.

Fuente: (MONTGOMERY, 2004)

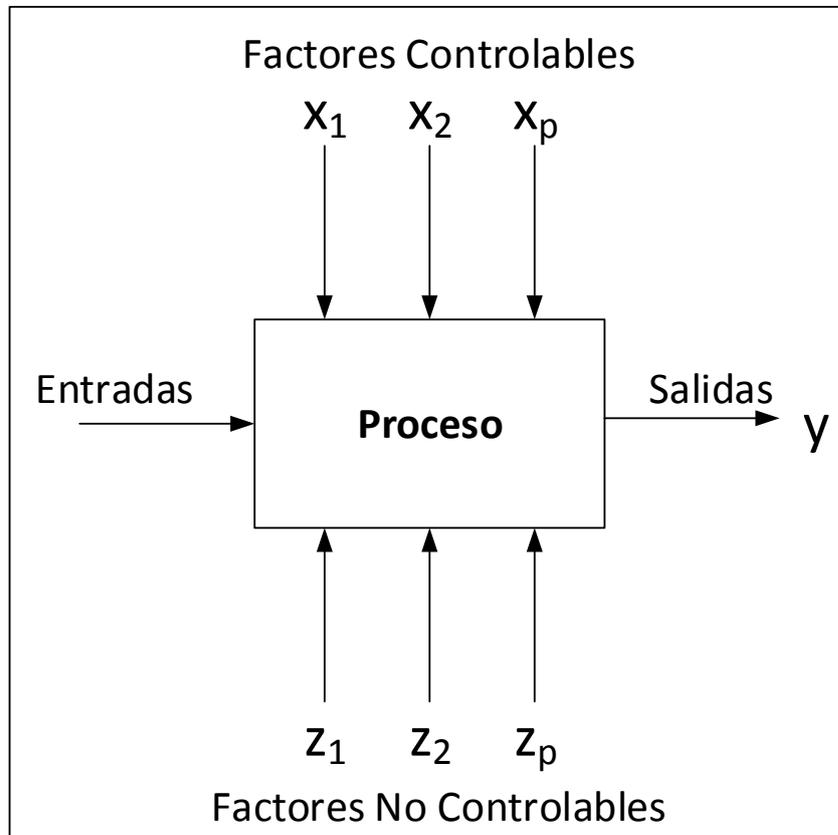


Figura 2.1. Modelo general de un proceso o sistema.

Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir qué pruebas o tratamientos se van a realizar, así como cuántas repeticiones de cada uno se requieren, para obtener la máxima información con el mínimo costo posible. Cabe señalar que cada modificación, prueba o tratamiento serán manipulados en función de la matriz de diseño experimental, a fin de lograr coherencia en cada acción empírica realizada. (MONTGOMERY, 2004)

2.1.1 Planeación y realización del diseño experimental

- **Entender y delimitar el problema u objeto de estudio.** En la etapa de planeación se deben hacer investigaciones preliminares que conduzcan a entender y delimitar el problema u objeto de estudio, de tal forma que quede claro qué se va a estudiar.

- **Elegir la(s) variable(s) de respuesta que será(n) medida(s) en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable.** La elección de esta(s) variable(es) es importante, ya que en ella se refleja el resultado de las pruebas; por ello, se deben elegir aquellas que mejor reflejen el problema o que caractericen al objeto de estudio.
- **Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta.** No se trata de que el experimentador tenga que saber *a priori* qué factores influyen en el resultado final, puesto que el experimento es precisamente para ello, pero sí que utilice toda la información disponible para incluir aquellos que se considera que tienen un mayor efecto.
- **Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento.** Este paso también implica determinar cuántas repeticiones se harán para cada tratamiento, tomando en cuenta el tiempo, el costo y la precisión deseada.
- **Realizar el experimento.** Seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior.

2.1.2 Análisis

Se recurre a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos de las muestras (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (a nivel proceso).

2.1.3 Interpretación

Con el respaldo del análisis estadístico, se debe analizar con detalle lo que ha pasado en el experimento: desde contrastar las suposiciones iniciales con los resultados del experimento hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron; verificar “supuestos” y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.

2.1.4 Conclusiones finales

Para concluir el estudio experimental se recomienda decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan. (GUTIERREZ PULIDO, 2012)

2.2 Clasificación y selección de los diseños experimentales

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental, en el sentido de que cuando cambian por lo general nos llevan a cambiar de diseño, son:

- El objetivo del experimento.
- El número de factores a estudiar.
- El número de niveles que se prueban en cada factor.
- Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

El objetivo del experimento se utiliza como un criterio general de clasificación de los diseños experimentales, mientras que los otros cuatro puntos son útiles para subclasificarlos. En este sentido, de acuerdo con su objetivo y sin pretender ser exhaustivos, los diseños se pueden clasificar como:

- Diseños para comparar dos o más tratamientos.
- Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s).
- Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
- Diseños para la optimización de una mezcla.
- Diseños para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables.

En la figura 2.2 se muestra la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo. Dentro de cada rama se pueden clasificar de acuerdo al número de factores, al tipo de efectos que se pretende estudiar y según las restricciones existentes. (HUMBERTO, 2008)

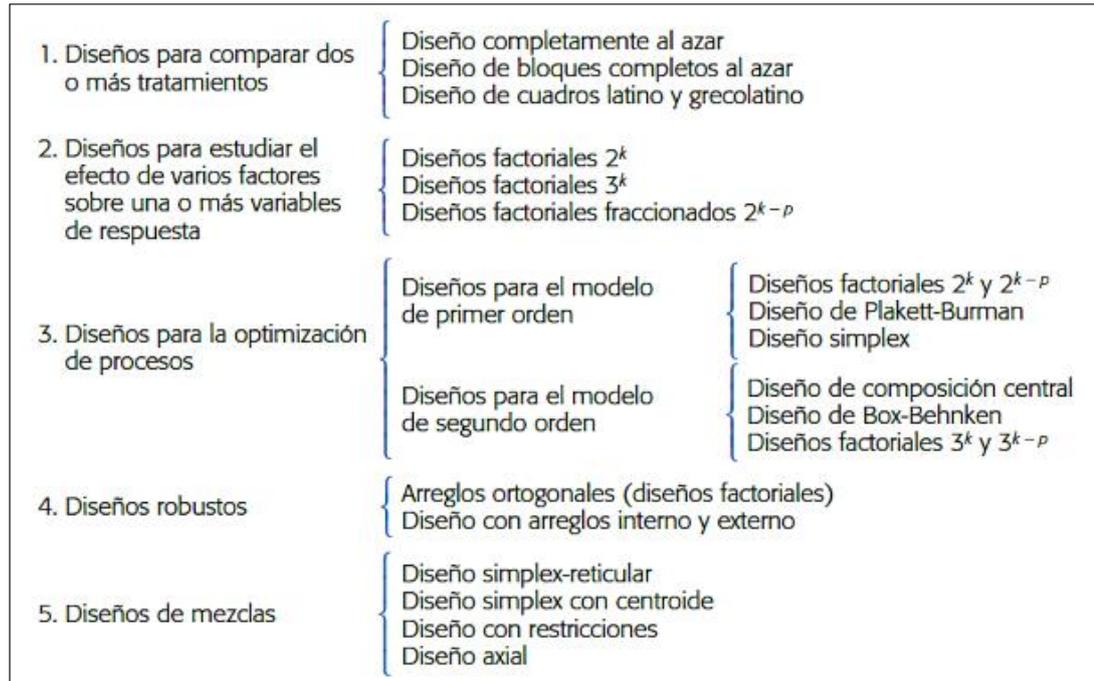


Figura 2.2. Clasificación de los diseños experimentales.

2.3 Diseños factoriales 2^k

El diseño factorial es un tipo de diseño que permite estudiar los efectos que pueden tener varios factores sobre una respuesta. Al realizar un experimento, el hecho de variar los niveles de todos los factores al mismo tiempo, es posible estudiar las interacciones entre los factores.

En la parte experimental del presente trabajo de grado se ha utilizado la metodología de “diseño de experimentos” (Design Of Experiments - DOE). Los modelos de DOE además de permitir planificar la secuenciación de los ensayos, son modelos estadísticos cuyo objetivo es averiguar si determinados factores influyen en la variable de salida y cuantificarla. Es conocido que si se repite un experimento, en igualdad de condiciones, los resultados presentan cierta variabilidad, que puede ser grande o pequeña. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones de realización de un proceso para detectar cambios significativos en la respuesta, de esta manera se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento

del proceso de interés. La metodología del diseño de experimentos además permite obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

2.3.1 Planeación del experimento

Los factores de salida, la potencia y el consumo de combustible, del proceso que se desea optimizar, el motor de combustión interna, se ven afectados por la presencia de distintas variables de entrada, entre estas: el tiempo de inyección y el adelanto al encendido.

Trabajo desarrollado por los motores térmicos. (GONZALEZ, 1981)

El *trabajo desarrollado* en los motores térmicos durante el proceso de transformación de la energía procedente del combustible, en cada ciclo de funcionamiento, depende de la cantidad de calor aportado al mismo y del rendimiento del ciclo. Ambos factores están ligados directamente a las características constructivas del motor.

En toda transformación endotérmica la *energía mecánica*, obtenida por transformación directa del calor, viene dado por la fórmula:

$$T = \xi \cdot Q \tag{2.1}$$

T = cantidad de trabajo obtenido en kgf . m

ξ = equivalente térmico del trabajo, que vale 427 kgf m/kc

Q = cantidad de calor en kc transformado en trabajo.

Teniendo en cuenta que no todo el calor aportado al ciclo de funcionamiento se transforma en trabajo, sino que exista pérdidas de calor durante el desarrollo del mismo, el *trabajo realizado por los motores térmicos*, teniendo en cuenta las pérdidas por rendimiento, es:

$$T_i = \xi \cdot Q_1 \cdot \eta_i \tag{2.2}$$

T_i = trabajo teórico o trabajo indicado obtenido en cada ciclo de funcionamiento.

Q_1 = cantidad de calor aportado al ciclo para su transformación en trabajo.

η_i = rendimiento indicado o rendimiento teórico del ciclo.

Calor de aportación

La cantidad de calor aportado en cada ciclo viene determinado en función del *consumo de combustible*; depende de las características *volumétricas del motor* (cilindrada), del *número de cilindros* y de las características del *combustible empleado*, como son su *poder calorífico y densidad*.

Teniendo en cuenta que un litro de combustible, en relación teórica o estequiometría, necesita unos 12000 litros de aire para efectuar la combustión completa del mismo, por cada cm^3 de gas aspirado por el cilindro se quemara una *cantidad de combustible* en volumen:

$$\frac{1}{12000} = 8.33 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$$

Por tanto, para una cilindrada total del motor:

$$V_t = V_u \cdot N$$

(2.3)

La cantidad de *combustible* introducido en cada ciclo de funcionamiento es:

$$G_V = V_t \cdot 8,33 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{ciclo}$$

O también:

$$G_V = V_t \cdot 8,33 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{ciclo}$$

Con un *gasto en peso*, teniendo en cuenta la densidad del combustible, de:

$$G_p = V_t \cdot \delta \cdot 8,33 \times 10^{-5} \text{ gramos/ciclo}$$

En las formulas anteriores:

G_V = gasto de combustible en volumen

G_p = gasto de combustible en peso

V_t = cilindrada total del motor

δ = densidad del combustible

Rendimiento del ciclo

El *rendimiento teórico* o rendimiento indicado (η_i), que se obtiene en cada ciclo de funcionamiento de los motores térmicos, determina las pérdidas de energía durante el desarrollo del mismo, al transformarse la energía térmica del combustible en trabajo mecánico. Viene determinado por la fórmula:

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_d \tag{2.4}$$

η_i = rendimiento indicado o rendimiento teórico del ciclo

η_t = rendimiento térmico

η_d = rendimiento de diagrama

El *rendimiento térmico* (η_t) incluye las pérdidas correspondientes a la transformación de energía en su desarrollo teórico según el ciclo de Carnot, el cual viene determinado en función de la relación de compresión del motor.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{Rc^{\alpha-1}} \tag{2.5}$$

Rc = relación de compresión

α = exponente calorífico del gas que para mezclas utilizadas en motores de explosión vale 1,33

El *rendimiento del diagrama* (η_d), o grado de calidad obtenido en el ciclo, incluye las pérdidas por deformación en el diagrama real, con las cotas de reglaje. El diagrama real se conoce como *diagrama real indicado*, obtenido por medio del

indicador de diagramas en el laboratorio. Al compararlo con el teórico, se determina el grado de calidad del mismo que suele estar comprendido entre el 75 y el 90%.

$$\eta_d = \frac{\text{superficie diagrama real}}{\text{superficie diagrama teorico}} \quad (2.6)$$

Sustituyendo en la expresión (2.2) los valores obtenidos de calor aportado (Q_1) y rendimiento (η_i), el *trabajo indicado* (Ti) o trabajo teórico desarrollado en los motores térmicos es:

$$Ti = \xi \cdot Q_1 \cdot \eta_i = \varepsilon \cdot G_p \cdot Q_e \cdot \eta_t \cdot \eta_d \text{ kgf} \cdot \text{m/ciclo} \quad (2.7)$$

Trabajo real o efectivo

El trabajo efectivo desarrollado por los motores térmicos es el *trabajo real útil*, que se obtiene en el volante del motor y que se aprovecha en la transmisión del movimiento. En este trabajo real útil están incluidas las pérdidas por rendimiento mecánico, debidas a rozamientos internos entre los órganos motrices, y también el trabajo absorbido por los órganos auxiliares, que mueve el motor, como son: la bomba de agua, bomba de combustible, bomba de aceite, ventilador, soplador de barrido, generadores, etc. Todos ellos absorben una cierta energía del motor y disminuyen la potencia útil del mismo.

El *rendimiento mecánico* (η_m), según el tipo de motor y los elementos acoplados al mismo, oscila entre el 75 y 90%. El rendimiento queda determinado por la relación que existe entre el trabajo útil obtenido en el volante del motor y el trabajo teórico indicado, el cual ha sido obtenido en el ciclo de funcionamiento según el diagrama real indicado.

$$\eta_m = \frac{T_u}{T_i} = \frac{W_f}{W_i} \quad (2.8)$$

W_f = potencia útil al freno

W_i = potencia teórica o potencia indicada

Según esto, el *trabajo útil* obtenido en el volante motor es:

$$T_u = T_i \cdot \eta_m = \xi \cdot Q_1 \cdot \eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_m \quad (2.9)$$

Rendimiento útil del motor

El rendimiento total útil o *rendimiento efectivo del motor* (η_u), equivale al producto de los rendimientos obtenidos en la transformación de energía y viene determinado por la relación que existe entre la energía total útil aprovechada del combustible y la energía total aportada al motor para su transformación en trabajo, en función del consumo de combustible y del calor específico del mismo.

$$\eta_u = \eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_m = \frac{T_u}{\xi \cdot Q_1} \quad (2.10)$$

Consumo específico de combustible

El consumo de combustible para el cálculo de los motores térmicos, suele expresarse generalmente por un *consumo específico* (G_{pe}), el cual indica el consumo en gramos de *combustible aportado al motor por cada caballo-hora* (CV/h) de *potencia útil* obtenida en el mismo.

Siendo el equivalente térmico del trabajo, $\xi = 427 \text{ kgf m/kc}$, la unidad de *calor útil* en kc que es necesario aportar para obtener en CV/h de potencia útil es:

$$Q_u = \frac{75 \times 3600}{427} = 632,3 \frac{\text{kc}}{\text{CVh}}$$

Como el *calor útil* transformado en trabajo es:

$$Q_u = G_{pe} \cdot Q_e \cdot \eta_u \quad (2.11)$$

Igualando ambas expresiones, se tiene:

$$G_{pe} \cdot Q_e \cdot \eta_u = 632300 \text{ calorías}$$

De donde se puede deducir que el *consumo específico* (G_{pe}) en función del rendimiento del motor y el calor específico del combustible empleado es igual a:

$$G_{pe} = \frac{632300}{Q_e \cdot \eta_u} \text{ g/CV.h} \quad (2.12)$$

El *rendimiento útil del motor*, en función del consumo específico del mismo, es:

$$\eta_u = \frac{632300}{G_{pe} \cdot Q_e} \% \quad (2.13)$$

Potencia del motor

La potencia en caballos (CV) que proporciona un motor a un determinado régimen de funcionamiento (número de r.p.m.), representa el *trabajo que es capaz de realizar en la unidad de tiempo*.

- *Potencia indicada.*

Por tanto, partiendo de los valores de trabajo obtenidos en cada ciclo, la *potencia teórica* o potencia indicada (W_i) en función del calor aportado al ciclo (Q_1) y su rendimiento (η_i) para n ciclos (n_c) es:

$$W_i = \frac{T_i}{t} = \frac{\xi \cdot Q_1 \cdot \eta_i \cdot n_c}{60 \times 75} \text{ CV} \quad (2.14)$$

O también:

$$W_i = \frac{\xi \cdot G_p \cdot Q_e \cdot \eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_m \cdot n_c}{60 \times 75} \text{ CV} \quad (2.15)$$

W_i = potencia indicada

t = tiempo

ξ = equivalente térmico del trabajo 427 kgf · m/kc

Q_1 = calor total aportado al ciclo en calorías

G_p = consumo de combustible en gramos/ciclo

Q_e = calor específico del combustible en calorías/gramo

$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_d =$ rendimientos del ciclo

$n_c =$ numero de ciclos efectuados en la unidad de tiempo para n revoluciones del motor, resultando: $n_c = n/2$ en los motores de cuatro tiempos, y $n_c = n$ en los dos tiempos.

- *Potencia al freno.*

Teniendo en cuenta las pérdidas mecánicas por transmisión y rozamientos internos (η_m), la potencia efectiva útil o potencia al freno W_f que se obtiene en el volante es:

$$W_f = W_i \cdot \eta_m \quad (2.16)$$

2.3.1.1 Objetivos

El objetivo de la experimentación, en el trabajo de grado, consiste en maximizar la potencia del motor de combustión interna y minimizar el consumo de combustible a través de superficies de respuesta. Este proceso de optimización se lo realiza por medio de la modificación de dos variables de entrada: el tiempo de inyección de combustible y el adelanto al encendido, bajo la aplicación de diseños experimentales factoriales y de los elementos de inferencia estadística.

2.3.1.2 Restricciones

Factores

Se han considerado dos factores en todo el conjunto de parámetros que pueden ser considerados dentro del proceso de optimización del rendimiento del motor:

- **Tiempo de inyección (TI) [ms]**

El tiempo de inyección es directamente proporcional al combustible inyectado en la admisión del motor de combustión interna. Dicho tiempo de inyección está en función del número de revoluciones y la carga del motor.

- **Adelanto al encendido (AE) [°]**

La chispa de encendido debe saltar con cierta antelación con respecto al PMS (punto muerto superior) para que la presión de combustión alcance su máximo valor; este punto óptimo depende de las características constructivas del motor. El número de grados de adelanto está en función del número de revoluciones y la carga del motor.

Niveles de los factores.

A los dos factores estudiados se le han asignado dos niveles dentro de su intervalo de trabajo: uno alto y uno bajo, los mismos que son determinados mediante la aplicación de corridas experimentales preliminares del proceso, en el que se varíe sólo un factor a la vez.

- **Tiempo de inyección (TI) [ms]**

Para determinar los niveles alto y bajo del tiempo de inyección de combustible se han efectuado pruebas extremas en las cuales el motor puede llegar a encenderse. El intervalo del tiempo de inyección de combustible apto para el motor se encuentra entre: 5,60 ms y 7,41ms . Los valores escogidos se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dominio experimental para la optimización de funcionamiento.

Factor	Variable asociada	Nivel Bajo (-1)	Nivel Alto (+1)
Tiempo de inyección (ms)	<i>TI</i>	5,60 ms	7,41 ms
Adelanto al encendido (°)	<i>AE</i>	34,70°	38,90°

Fuente: Autores

- **Adelanto al encendido (AE) [°]**

Para determinar los niveles alto y bajo del adelanto al encendido se han efectuado pruebas extremas en las cuales el motor puede llegar a encenderse. El intervalo de cantidad de adelanto al encendido apto para el motor se encuentra entre 34,70° y 38,90° . Los valores escogidos se muestran en la tabla 2.1.

2.3.1.3 Proceso de modificación de los parámetros de la Unidad de Control Electrónica.

El proceso de modificación de la Unidad de Control Electrónica del motor tiene como objetivo definir una correcta inyección de combustible y un adecuado avance al encendido. Un motor con exceso en el avance al encendido provocará autodetonaciones⁴, sin importar la cantidad de combustible que sea inyectado, un motor con mínimo avance al encendido tendrá pérdida de potencia.

Haltech Platium Sprint 500

Funcionamiento

Una categoría especial de Unidades de Control del motor son las reprogramables (figura 2.3). Dichas unidades pueden ser reprogramadas por el usuario. Adicionalmente, éstas pueden ser programadas a través de un computador portátil mediante un cable USB, mientras el motor este en marcha o apagado. Esta unidad controla algunos parámetros, entre las más importantes están: el tiempo de inyección y el adelanto al encendido. Estas cantidades varían dependiendo del número de revoluciones del motor y de la posición del pedal de aceleración (depresión en el colector de admisión).⁵

Otros parámetros que pueden ser modificados por las Unidades de Control reprogramables son:

⁴ Combustión rápida y violenta de la mezcla aire/combustible en la cámara de combustión del motor. Cuando se presenta una autodetonación en el motor, se percibe un pistoneo.

⁵ Quick Start Platinum Sprint 500 V6

- Límite de revoluciones: Define el máximo número de revoluciones por minuto que el motor de combustión interna puede alcanzar. Si se supera dicho límite se produce el corte de combustible.
- Temperatura de funcionamiento del motor: Permite agregar combustible adicional, cuando el motor no se encuentra dentro de la temperatura de funcionamiento.
- Alimentación de combustible temporal: Informa a la Unidad de control que es necesario un mayor aporte de combustible cuando el acelerador es presionado (mayor depresión en el múltiple de admisión).

Fuente: (HALTECH)



Figura 2.3. Haltech Sprint 500.

Características

Tabla 2.2. Características de la Haltech Sprint 500.

ENTRADAS ECU	Sensor de posición del cigüeñal
	Sensor de posición del árbol de levas
	Sensor MAP
	Posición del acelerador
	Temperatura de refrigerante
	Presión barométrica

	Sensor de oxígeno
	Sensor de velocidad
SALIDAS ECU	Ralentí lazo cerrado
	Sensor de oxígeno
	Control de la bomba de combustible
	Actuador TPS
ENCENDIDO	Distribuidor individual
	Chispa perdida
	Bobinas tipo COP
INYECCIÓN	Multipunto
	Secuencial

Fuente: Autores

Especificaciones técnicas del vehículo

El vehículo utilizado para la realización de las pruebas es un automóvil marca Chevrolet modelo Corsa 1.4. (Tabla 2.3)

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del corsa 1.4

ESPECIFICACIONES CHEVROLET CORSA 1.4 (1998-2007)		
Datos de Fabricación	Fabricante	GM
Pesos	Bruto sin A/A (3P)	1320 kg
	Bruto con A/A (3P)	1375 kg
	Permisible en el eje delantero sin A/A (3P)	675 kg
	Permisible en el eje delantero con A/A (3P)	715 kg
	Permisible en el eje trasero sin A/A (3P)	660 kg
	Permisible en el eje trasero con A/A (3P)	660 kg
Capacidades de Carga	Volumen Baúl (3P)	260 L
	V. Baúl con el asiento trasero plegado (3P)	650 L
	Carga Útil (pasajeros y carga) * (3P)	470 kg
	Capacidad de Remolque con Frenos (3P)	900 kg
	Capacidad de Remolque sin Frenos (3P)	450 kg
Dimensiones	Ancho con Espejos (mm)	1768
	Largo / Ancho / Alto / Distancia entre ejes (mm) 3P	3729 / 1608 / 1388 / 2443

Motor	Código	1.4 MPFI X14XE
	Tipo	Longitudinal Delantero
	Numero de Cilindros y Válvulas por cilindro	4 en línea 2 válvulas por cilindro (SOHC)
	Orden de Encendido	1 - 3 - 4 - 2
	Diámetro del Pistón	77, 6 mm
	Carrera del Pistón	73,4 mm
	Relación de Compresión	9,5 a 1
	Cilindrada	1388cc
	Revoluciones de Ralentí	950 ± 50 rpm
	Potencia Máxima Neta***	83,7 HP a 6000 rpm
	Torque Máximo Neto***	113,56 Nm a 3000rpm
	Caja de Cambios	Relaciones
2a - 2,14:1		
3a - 1,41:1		
4a - 1,12:1		
5a - 0,89:1		
R - 3,31:1		
Velocidades recomendadas para cambio de marcha (hasta 1500 msnm / sobre 1500 msnm)		1a a 2a - 15 km/h / 20 km/h
		2a a 3a - 30 km/h / 35 km/h
		3a a 4a - 40 km/h / 60 km/h
		4a a 5a - 65 km/h / 75 km/h
Diámetro de Giro	Pared a Pared	10,45 m
	Andén a Andén	9,9 m
Llantas	Rin 13	165/70
Tanque de Combustible	Capacidad	46 Litros o 12, 15 Galones
Frenos	Discos Adelante	Tambores Atrás
Suspensión	Delantera: Independiente, Mcpherson con brazo transversal y tensor longitudinal	
	Trasera: Semi-Independiente con eje de torsión	
	Barras estabilizadoras en ambos ejes	
Desempeño	0 a 100 km/h	12,5 segundos
	Velocidad Máxima	173 km/h
	Consumo Mixto:	6,8l/100km o 55,6 km/gal

Fuente: www.chevrolet.com.ec

2.3.1.4 Procedimiento de ensayos

Instrucciones de seguridad

El vehículo se debe subir al banco de pruebas con la suficiente lentitud para que ni el vehículo ni el banco de pruebas se vean sometidos a esfuerzos mecánicos innecesarios.

Para evitar un sobrecalentamiento de los frenos de corrientes de Foucault se debe respetar, entre pruebas, 10 minutos de pausa sin carga a una velocidad de aprox. 10 - 20 km/h para la refrigeración del freno.

Durante la comprobación no debe permanecer ninguna persona en las proximidades del banco de pruebas, sea delante, detrás o a un lado.

Comprobar la presión de los neumáticos y efectuar una inspección visual de los neumáticos para encontrar eventuales daños. A causa de la rotación de los rodillos es posible que se desprendan partículas de los neumáticos, como por ejemplo piedrecitas encajadas en el perfil del neumático. Las partículas susceptibles de desprenderse deberán quitarse de los neumáticos antes de acceder con el vehículo al banco de pruebas.

No realizar movimientos rápidos con el volante durante el ensayo.

Preparativos del ensayo

Se ubica al vehículo sobre los rodillos del banco dinamométrico, luego se fijan las cintas de sujeción en el vehículo (Figura 2.4). Las cintas tensoras no se deben tensar excesivamente; además, se debe tener especial cuidado con la posición de la cinta tensora respecto a los neumáticos.

Medir la presión de los neumáticos. (Figura 2.5).

Sujetar con fuerza el volante, durante la prueba de potencia y consumo. Evitar imprescindiblemente movimientos de la dirección hacia la derecha o hacia la izquierda así como desplazamientos del peso en el vehículo. No apoyarse en el vehículo.

Se liberan los rodillos del banco de pruebas y arrancar lentamente en la primera marcha, hacer que el vehículo se alinee (equilibre) a una velocidad de marcha de aprox. 5 km/h.

Fuente: Autores



Figura 2.4. Vehículo Corsa Wind sobre el banco dinamométrico.

Fuente: Autores



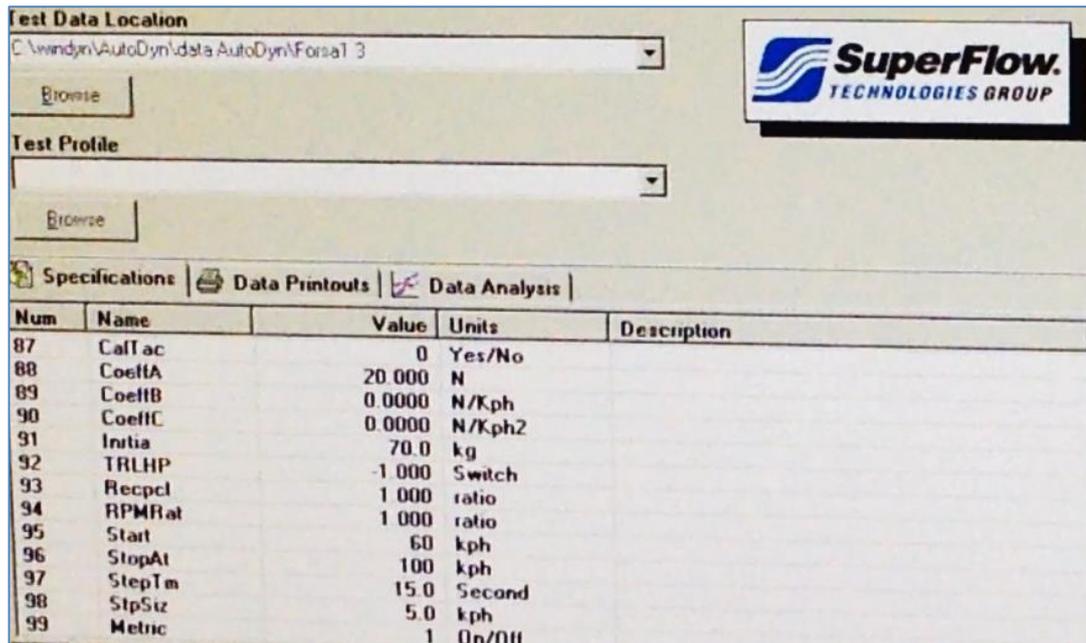
Figura 2.5. Verificación de la presión de los neumáticos

Finalmente, se sincronizan las revoluciones del motor con las revoluciones de los rodillos, por medio del sensor óptico.

2.3.1.5 Metodología para la medición de potencia en el banco dinamométrico

- Se configura, en el computador del banco dinamométrico, los valores referentes al vehículo en el que se va a realizar la prueba. Entre estos valores de configuración se tiene: diámetro de la rueda, peso de vehículo, coeficiente A, B, y C. (Figura 2.6)

Fuente: Autores



The screenshot shows the SuperFlow software interface. At the top, there is a 'Test Data Location' field with a dropdown menu showing 'C:\windyn\AutoDyn\data\AutoDyn\Forsa1_3' and a 'Browse' button. Below it is a 'Test Profile' field with a dropdown menu and another 'Browse' button. The main area contains three tabs: 'Specifications', 'Data Printouts', and 'Data Analysis'. The 'Specifications' tab is active, displaying a table with the following data:

Num	Name	Value	Units	Description
87	CallAc	0	Yes/No	
88	CoefA	20.000	N	
89	CoefB	0.0000	N/Kph	
90	CoefC	0.0000	N/Kph2	
91	Inertia	70.0	kg	
92	TRLHP	-1.000	Switch	
93	Recpcl	1.000	ratio	
94	RPMFrat	1.000	ratio	
95	Start	60	kph	
96	StopAt	100	kph	
97	StepTm	15.0	Second	
98	StpSiz	5.0	kph	
99	Metric	1	On/Off	

Figura 2.6. Configuración de valores del vehículo en el banco dinamométrico

- Los datos climatológicos se configuran automáticamente en el ordenador, y el software realiza las correcciones por temperatura, humedad y presión atmosférica. (SAE, 2004)
- Se arranca el vehículo en primera marcha y cambiar, lo antes posible, a la marcha directa, en este caso es 4ª marcha.
- La 4ª marcha se alcanza con la mitad del número de revoluciones nominal; luego, se pisa a fondo el pedal acelerador hasta que la velocidad del vehículo alcance los 140 Km/h.
- Cuando el vehículo alcanza la velocidad de 140 Km/h, se levanta inmediatamente el pie del acelerador y se desembraga al mismo tiempo o bien se coloca en cambio en posición neutra. Se deja que el vehículo acabe de rodar.

- Los valores medidos de la potencia, (Anexo A-1), tienen lugar después de haberse parado los rodillos; el computador está conectado a través de una conexión de red de datos. Tan pronto como los datos son recibidos por el equipo, las curvas de potencia y par del motor son visualizados en la pantalla del computador del banco dinamométrico (Figura 2.7).

Fuente: Autores.

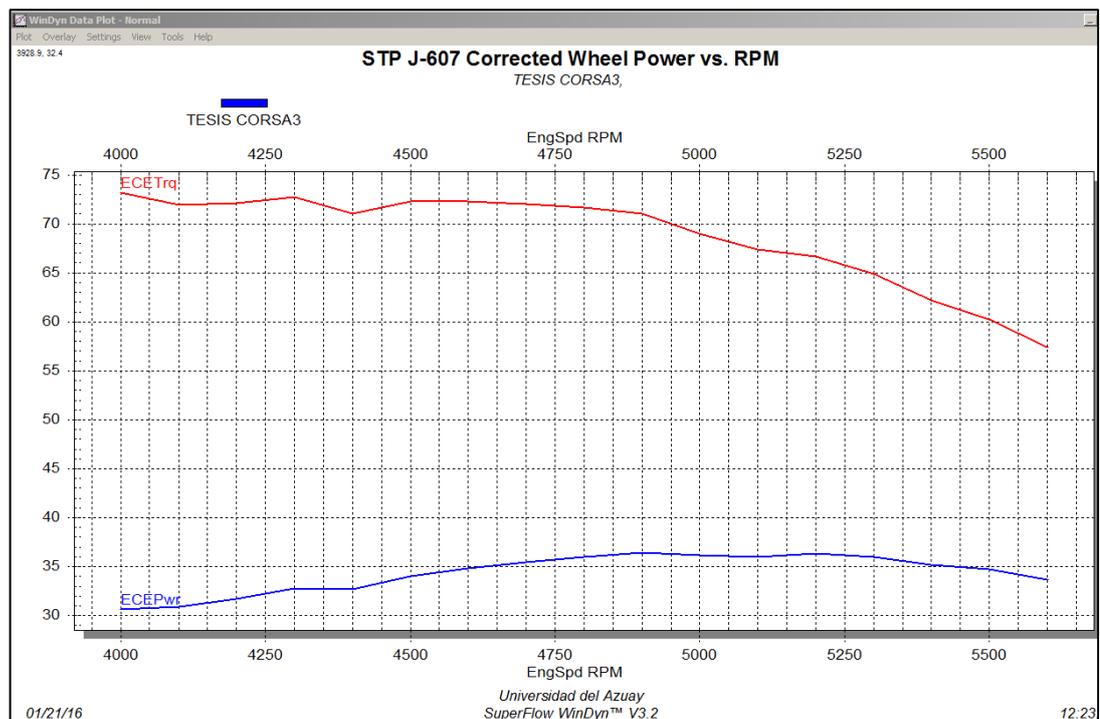


Figura 2.7. Valor de la potencia máxima.

2.3.1.6 Metodología para la medición del consumo de combustible en el banco dinamométrico

- Para el desarrollo de la prueba de consumo, tanto para la toma de datos como para la generación de carga se utilizó el Banco Dinamométrico MAHA LPS 3000 (figura 2.8), este consta de un freno dinamométrico de corrientes parásitas que permite generar carga y, de esta manera, mantener revoluciones constantes en el motor del vehículo.
- El banco consta de dos juegos de rodillos conectados a los frenos, que captan la velocidad y el par de giro; a más de ello el banco se conecta a una consola de sensores que permite monitorear condiciones ambientales, tales como: presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire.



Figura 2.8. Banco dinamométrico MAHA LPS 3000

Medidor de flujo de combustible

- El banco dinamométrico puede conectarse al contador de combustible AIC FUEL FLOW MASTER 5004 (figura 2.9), donde se obtiene la información sobre el flujo instantáneo de combustible, el flujo promedio y la cantidad de combustible consumido.

Fuente: (Automotive Information & Control System, 2008)



Figura 2.9. Medidor de flujo de combustible

- El medidor de flujo de combustible contiene un generador que produce 2000 pulsos por litro y tiene certificado de calibración vigente mediante SCS 077 / ISO / ICE 17025. Para el monitoreo constante de la presión y el cambio inmediato de combustible se utiliza la configuración que se detalla en la figura 2.10.

Fuente: Autores

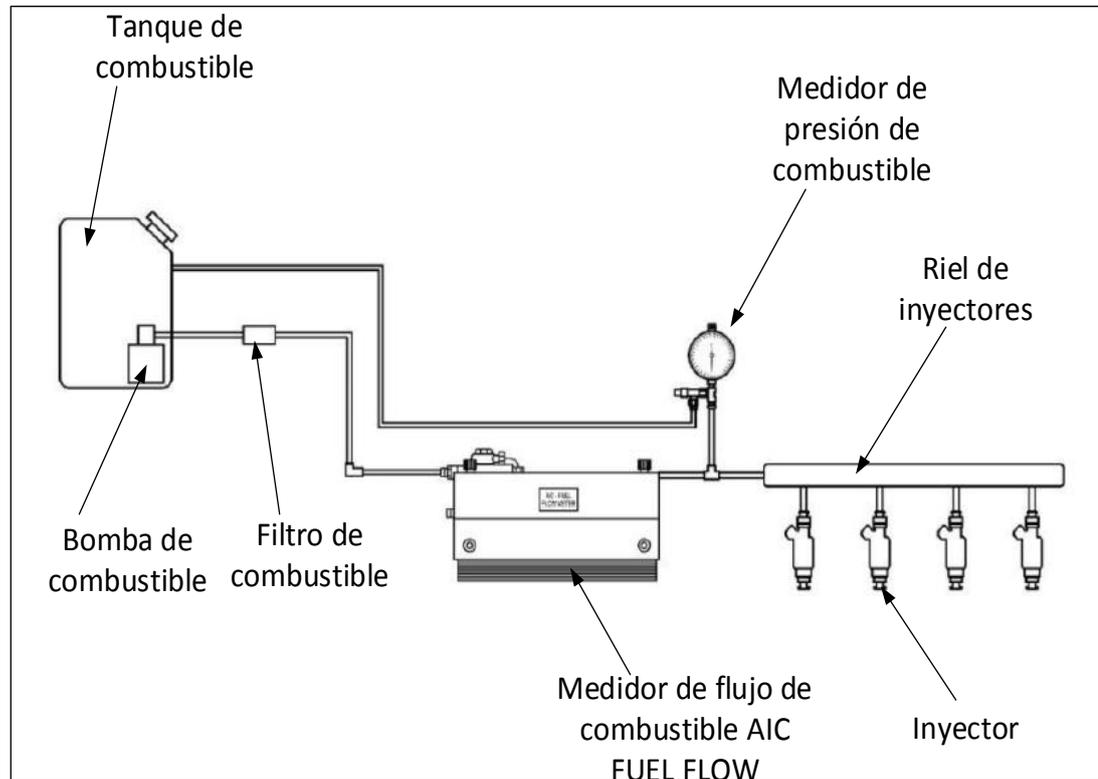


Figura 2.10. Diagrama de conexión del medidor de flujo de combustible

- Las características del medidor de flujo de combustible se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características del medidor de flujo de combustible

RANGO	0 - 120 lt/h
ERROR MÁXIMO	1%
REPETITIVIDAD	0,20%
PRESIÓN MÁXIMA	5 bar

Fuente: Autores

- El contador se conecta a la plataforma del banco dinamométrico y la información generada se muestra en la figura 2.11. (Anexo A-2).



Figura 2.11. Interfaz del banco dinámico.

2.3.2 Plan experimental – respuestas

Cuando se trata de entender o interpretar un proceso, se puede utilizar un modelo matemático que simule el comportamiento real del proceso o sistema. Los modelos que se utilizan en esta investigación es un polinomio con coeficientes constantes, los mismos que se determinan a través del método de regresión múltiple. Las incógnitas son el valor de cada coeficiente, las mismas que son calculadas con la mejor precisión posible, gracias a los experimentos realizados. Para que lo anterior sea posible, el número de experimentos distintos debe ser al menos igual al número de coeficientes del modelo.

Si el número de experimentos, N , es igual al número de coeficientes, el diseño se encuentra saturado. Por consiguiente, el cálculo se efectúa a través de la resolución de una serie de N ecuaciones con p incógnitas. Sin embargo, cada respuesta experimental se asocia con un error llamado error experimental. Los valores obtenidos para los coeficientes son sólo estimaciones, que serán valores

aproximados a la realidad. Es muy importante la precisión de las estimaciones de los coeficientes, siendo para ello necesario realizar más experimentos que el número de coeficientes, es decir $N > p$. Por lo tanto, se agrega un experimento en el centro del dominio, que es el punto más alejado de las posiciones del diseño de experimentos factorial. Esto permite validar el diseño de experimentos planteado. Cada experimento de potencia y de consumo de combustible se realizó 5 veces, bajo condiciones experimentales idénticas, lo cual permitió estimar la repetitividad, sin ninguna influencia externa, y así tener una idea clara de la dispersión de los resultados y la medida del error experimental. El plan experimental y los valores de respuesta para la potencia del motor están enlistadas en la tabla 2.5. El plan experimental y los valores de respuesta para el consumo se detallan en la tabla 2.6. (Festing, 1994)

Tabla 2.5. Diseño factorial 2² para la potencia.

No	TI	AE	TIEMPO DE INYECCIÓN (ms)	ADELANTO ENCENDIDO (°)	POTENCIA (KW)				
					R1	R2	R3	R4	R5
1	-1	-1	5,60	34,70	33,3	35,4	34,2	33,8	33,3
2	1	-1	7,41	34,70	36	35,7	36,4	35,5	36,4
3	-1	1	5,60	38,90	37,5	38,1	37,1	36,9	36,9
4	1	1	7,41	38,90	37,1	37,6	36,9	36,9	36,9
5	0	0	0	0	37,9	37,1	37,6	37,5	37,1

Fuente: Autores.

Tabla 2.6. Diseño factorial 2² para el consumo.

No	TI	AE	TIEMPO DE INYECCIÓN (ms)	ADELANTO ENCENDIDO (°)	CONSUMO (l/h)				
					R1	R2	R3	R4	R5
1	-1	-1	5,60	34,70	10,16	10,25	10,09	9,96	9,85
2	1	-1	7,41	34,70	13,49	13,70	13,62	13,82	13,77
3	-1	1	5,60	38,90	10,15	10,35	10,18	10,23	10,14
4	1	1	7,41	38,90	13,77	13,97	14,15	13,90	14,06
5	0	0	0	0	12,21	12,11	12,23	12,27	11,95

Fuente: Autores.

2.3.3 Elementos de inferencia estadística

2.3.3.1 Tamaño de la muestra para poblaciones infinitas (Spiegel, 2009)

Para estimar el tamaño de la muestra n , que es necesario para estimar p con un error máximo de E , entonces se aplica la siguiente fórmula:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{E^2} \quad (2.17)$$

Donde:

n , tamaño de la muestra.

z , nivel de confianza.

p , probabilidad de éxito.

q , probabilidad de fracaso.

E , precisión, error máximo admisible.

▪ **Potencia**

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}{0.8^2}$$

$$n \cong 2 \text{ muestras}$$

▪ **Consumo**

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}{0.5^2}$$

$$n \cong 4 \text{ muestras}$$

2.3.3.2 Cálculo de la media y desviación estándar (Montgomery, 1996)

- *La media* es una medida de tendencia central que resulta al efectuar una serie determinada de operaciones con un conjunto de números. La media aritmética es un promedio estándar que a menudo se denomina "promedio".

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.18)$$

Donde:

\bar{x} , media.

n , el número total de muestras.

x_i , valor de la muestra.

- *La desviación estándar* es por una parte un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos, y por otra parte una medida que se aparta de los datos de su media, y por tanto es medida en las mismas unidades que la variable analizada.

$$s = \sqrt{\frac{\sum x^2}{N}} \quad (2.19)$$

Donde:

s , desviación estándar.

$\sum x^2$, suma de la diferencias al cuadrado entre cada muestra y la media.

N , número total de muestras.

Tabla 2.7. Media y desviación estándar de las muestras de potencia.

TI	AE	R1	R2	R3	R4	R5	MEDIA	DESV. EST
-1	-1	33,3	35,4	34,2	33,8	33,3	34	0,87
1	-1	36	35,7	36,4	35,5	36,4	36	0,41
-1	1	37,5	38,1	37,1	36,9	36,9	37,3	0,51
1	1	37,1	37,6	36,9	36,9	36,9	37,08	0,30
0	0	37,9	37,1	37,6	37,5	37,1	37,44	0,34

Fuente: Autor

Tabla 2.8. Media y desviación estándar de las muestras de consumo.

TI	AE	R1	R2	R3	R4	R5	MEDIA	DESV. EST
-1	-1	10,16	10,25	10,09	9,96	9,85	10,062	0,158965
1	-1	13,49	13,70	13,62	13,82	13,77	13,680	0,130192
-1	1	10,15	10,35	10,18	10,23	10,14	10,210	0,085732
1	1	13,77	13,97	14,15	13,90	14,06	13,970	0,146116
0	0	12,21	12,11	12,23	12,27	11,95	12,154	0,128374

Fuente: Autor

2.3.3.3 Intervalo de confianza para una media (Erik Cobo, 2014)

Por definición de intervalo de confianza se trata de encontrar dos números L y U tales que el parámetro μ se encuentre entre ellos con una probabilidad de $1 - \alpha$. Esto es:

$$P(L \leq \mu \leq U) = 1 - \alpha \quad (2.20)$$

Donde:

L , límite inferior del intervalo de confianza.

U , límite superior del intervalo de confianza.

μ , media.

$1 - \alpha$, nivel de confianza.

La potencia media de una muestra aleatoria de cada Unidad de Control con 5 repeticiones se detalla en la tabla 2.7 (para la potencia) y en la tabla 2.8 (para el consumo). La desviación estándar de cada Unidad de Control modificada se define en la misma tabla, con un nivel de confianza del 95%. Además se considera que cuando el número de muestras n es menor que 30 y la desviación estándar poblacional es desconocida (se usa una distribución T) (tabla 2.9 y tabla 2.10).

Tabla 2.9. Intervalo de confianza de las muestras de potencia.

TI	AE	R1	R2	R3	R4	R5	MEDIA	DESV. EST	INT. CONF. (95%)
-1	-1	33,3	35,4	34,2	33,8	33,3	34	0,87	(32,921 35,079)
1	-1	36	35,7	36,4	35,5	36,4	36	0,41	(35,384 36,616)
-1	1	37,5	38,1	37,1	36,9	36,9	37,3	0,51	(36,667 37,933)
1	1	37,1	37,6	36,9	36,9	36,9	37,08	0,30	(36,703 37,457)
0	0	37,9	37,1	37,6	37,5	37,1	37,44	0,34	(37,013 37,867)

Fuente: Autor

Tabla 2.10. Intervalo de confianza de las muestras de consumo.

TI	AE	R1	R2	R3	R4	R5	MEDIA	DESV. EST	INT. CONF. (95%)
-1	-1	10,16	10,25	10,09	9,96	9,85	10,062	0,158965	(9,788 14,124)
1	-1	13,49	13,70	13,62	13,82	13,77	13,680	0,130192	(9,878 14,274)
-1	1	10,15	10,35	10,18	10,23	10,14	10,210	0,085732	(9,711 14,397)
1	1	13,77	13,97	14,15	13,90	14,06	13,970	0,146116	(9,690 14,382)
0	0	12,21	12,11	12,23	12,27	11,95	12,154	0,128374	(9,514 14,394)

Fuente: Autor

2.3.3.4 Pruebas de hipótesis

A continuación se detallan algunos conceptos concernientes al diseño de experimentos. (Tabla 2.11 y tabla 2.12).

Tabla 2.11. Diseño de experimentos 2² con 5 réplicas para la potencia.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	TI	AE	POTENCIA
1	1	1	1	5,60	34,70	33,3
2	2	1	1	7,41	34,70	36
3	3	1	1	5,60	38,90	37,5

4	4	1	1	7,41	38,90	37,1
5	5	1	1	5,60	34,70	35,4
6	6	1	1	7,41	34,70	35,7
7	7	1	1	5,60	38,90	38,1
8	8	1	1	7,41	38,90	37,6
9	9	1	1	5,60	34,70	34,2
10	10	1	1	7,41	34,70	36,4
11	11	1	1	5,60	38,90	37,1
12	12	1	1	7,41	38,90	36,9
13	13	1	1	5,60	34,70	33,8
14	14	1	1	7,41	34,70	35,5
15	15	1	1	5,60	38,90	36,9
16	16	1	1	7,41	38,90	36,9
17	17	1	1	5,60	34,70	33,3
18	18	1	1	7,41	34,70	36,4
19	19	1	1	5,60	38,90	36,9
20	20	1	1	7,41	38,90	36,9

Fuente: Autor

Tabla 2.12. Diseño de experimentos 2² con 5 réplicas para el consumo.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	TI	AE	CONSUMO
1	1	1	1	5,60	34,70	10,16
2	2	1	1	7,41	34,70	13,49
3	3	1	1	5,60	38,90	10,15
4	4	1	1	7,41	38,90	13,77
5	5	1	1	5,60	34,70	10,25
6	6	1	1	7,41	34,70	13,70
7	7	1	1	5,60	38,90	10,35
8	8	1	1	7,41	38,90	13,97
9	9	1	1	5,60	34,70	10,09
10	10	1	1	7,41	34,70	13,62
11	11	1	1	5,60	38,90	10,18
12	12	1	1	7,41	38,90	14,15
13	13	1	1	5,60	34,70	9,96
14	14	1	1	7,41	34,70	13,82
15	15	1	1	5,60	38,90	10,23
16	16	1	1	7,41	38,90	13,90
17	17	1	1	5,60	34,70	9,85

18	18	1	1	7,41	34,70	13,77
19	19	1	1	5,60	38,90	10,14
20	20	1	1	7,41	38,90	14,06

Fuente: Autor

2.3.3.4.1 Planteamiento de la hipótesis (Wackerly, 2010)

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre los valores de los parámetros del proceso, en este caso del motor de combustión interna, que es susceptible de probarse a partir de la información contenida en las muestras realizadas en el banco dinamométrico. Este proceso demuestra que es posible tener valores diferentes a la potencia estándar.

$$\begin{aligned}
 H_0: Pot &= 37,44 \text{ KW (Potencia igual a 37,44 KW)} \\
 H_A: Pot &\neq 37,44 \text{ KW (Potencia diferente a 37,44 KW)}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

A la expresión $H_0: Pot = 37,44 \text{ KW}$ se le conoce como hipótesis nula y $H_A: Pot \neq 37,44 \text{ KW}$ se le llama hipótesis alternativa.

Este proceso demuestra que es posible tener valores diferentes al consumo estándar.

$$\begin{aligned}
 H_0: Consumo &= 12,154 \text{ l/h (Consumo igual a 12,154 l/h)} \\
 H_A: Consumo &\neq 12,154 \text{ l/h (Consumo diferente a 12,154 l/h)}
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

La expresión $H_0: Consumo = 12,154 \text{ l/h}$ es la hipótesis nula y $H_A: Consumo \neq 12,154 \text{ l/h}$ es la hipótesis alternativa.

La estrategia a seguir para probar una hipótesis es suponer que la hipótesis nula es verdadera, y en caso de ser rechazada por evidencia de los datos se estará aceptando la hipótesis alternativa.

2.3.3.4.2 Valor P (Kuenhl, 2001)

Se define como el nivel mínimo de significancia al cual la hipótesis nula H_0 sería rechazada.

Si $P < \alpha$, se rechaza la hipótesis nula H_0

Si $P > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula H_0

Donde:

P , es el valor mínimo de significancia.

α , es el valor de rechazo.

El procedimiento general para deducir el intervalo consiste en partir de un estadístico. Tal estadístico es:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (2.23)$$

Donde:

\bar{x} , media muestral.

μ , media desconocida.

n , el número total de muestras.

s , desviación estándar.

Por lo tanto, los parámetros de interés del intervalo de aceptación son (figura 2.12):

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} = 1 - \alpha \quad (2.24)$$

Donde:

\bar{x} , media muestral.

μ , media desconocida.

$z_{\alpha/2}$, estadístico de prueba.

n , el número total de muestras.

s , desviación estándar.

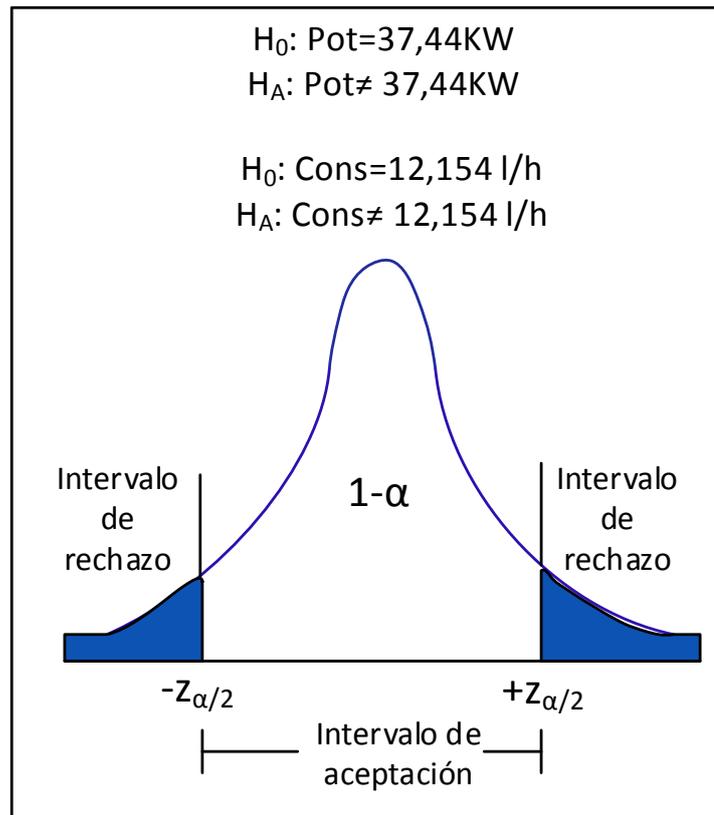


Figura 2.12. Hipótesis bilateral, regiones de aceptación y de rechazo.

Los resultados calculados⁶ para la potencia son (figura 2.13):

Los resultados muestran un valor de $P = 0,000$, este valor es menor a 0,05 que es el nivel de significancia. Por lo tanto $0,000 < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula y entonces la potencia promedio del motor de combustión interna si puede tomar valores diferentes a 37,44 KW.

Los resultados calculados para el consumo son (figura 2.14):

Los resultados muestran un valor de $P = 0,000$, este valor es menor a 0,05 que es el nivel de significancia. Por lo tanto $0,000 < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula y entonces el consumo promedio del motor si puede tomar valores diferentes a 12,154 l/h.

⁶ Copyright 2016 Minitab Inc.

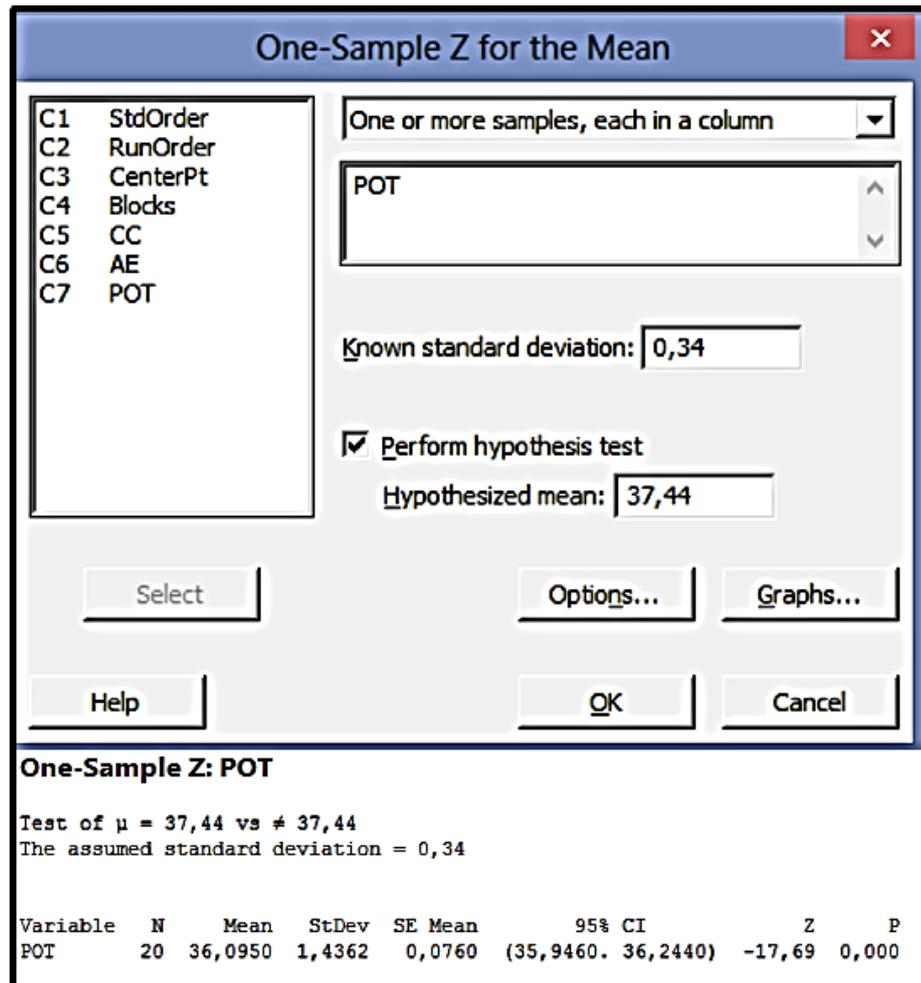


Figura 2.13. Valor P de la hipótesis de la potencia.

2.3.4 Modelo matemático (Lewis, Pharmaceutical Experimental Design, 1999)

En la investigación planteada existen dos variables independientes que influyen o están relacionadas con la variable de respuesta Y , que en este caso son dos las respuestas: la potencia y el consumo del motor de combustión interna.

Sea X_1 y X_2 variables independientes o regresoras, y sea Y una variable de respuesta, entonces el modelo de regresión lineal múltiple es el siguiente polinomio:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (2.25)$$

Donde:

β_j , son los parámetros del modelo, coeficientes de regresión

X_1 , primera variable independiente, tiempo de inyección (ms).

X_2 , segunda variable independiente, adelanto al encendido ($^{\circ}$).

ε , error aleatorio.

β_0 , es la ordenada con el origen, β_j mide el cambio esperado en Y por cambio unitario en X_j cuando el resto de variables regresoras se mantienen constantes o fijas.

Fuente: Autores.

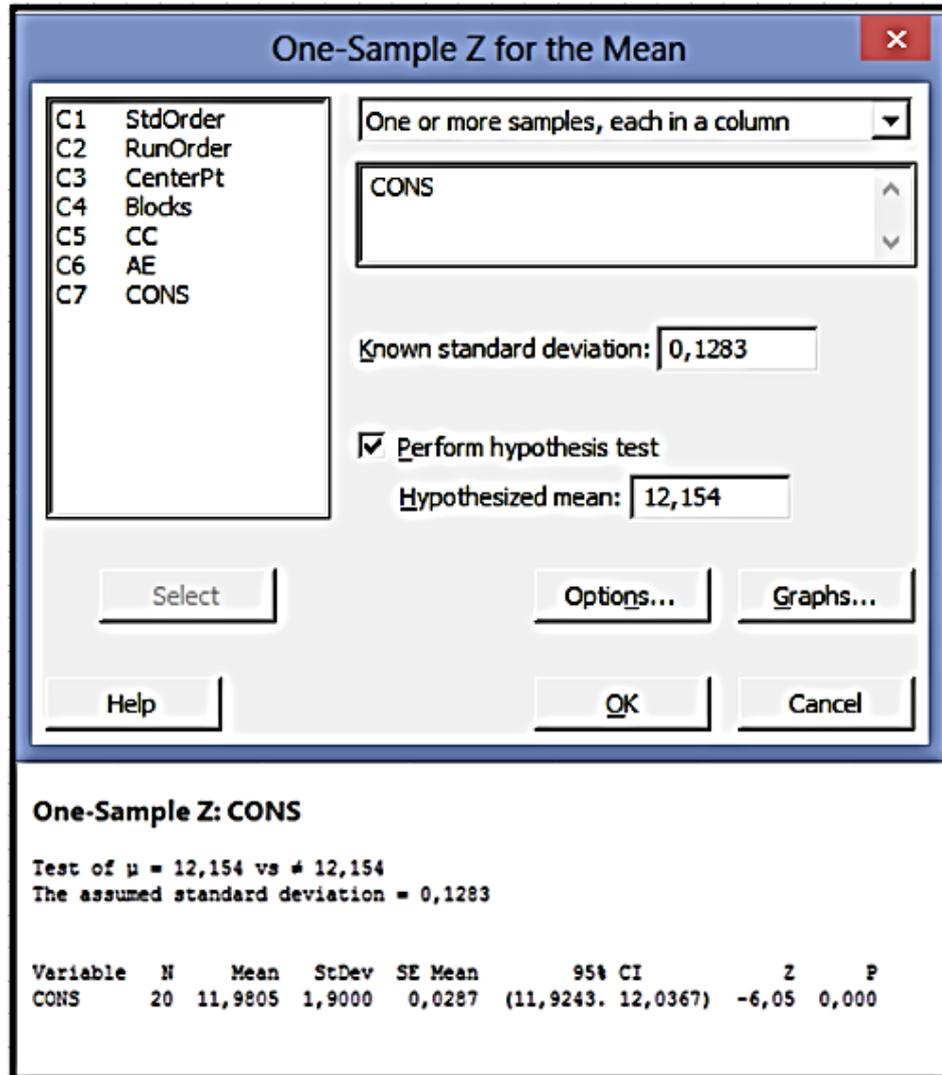


Figura 2.14. Valor P de la hipótesis del consumo.

De aquí que si se expresa esto en forma matricial, $y = X\beta + \varepsilon$, toma la siguiente forma (se muestra parcialmente):

▪ **Potencia**

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{1} \quad \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 \\
 \begin{bmatrix} 33.3 \\ 36,0 \\ 37,5 \\ \vdots \\ 36,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 5.60 & 34.70 & 194.32 \\ 1 & 7.41 & 34.70 & 257.13 \\ 1 & 5.60 & 38.90 & 217.84 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 7.41 & 38.90 & 288.25 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \vdots \\ \varepsilon_{20} \end{bmatrix}
 \end{array}$$

A partir de aquí se obtiene $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$, que al hacer los cálculos se obtiene el siguiente *modelo para la potencia*:

$$\mathbf{POT} = -56,20 + 11,24 \mathbf{TI} + 2,421 \mathbf{AE} - 0,2920 \mathbf{TI} * \mathbf{AE} \tag{2.26}$$

Donde:

POT, potencia del motor de combustión interna (KW).

TI, tiempo de inyección (ms).

AE, adelanto al encendido (°).

▪ **Consumo**

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{1} \quad \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 \\
 \begin{bmatrix} 10.16 \\ 13.49 \\ 10.15 \\ \vdots \\ 14.06 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 5.60 & 34.70 & 194.32 \\ 1 & 7.41 & 34.70 & 257.13 \\ 1 & 5.60 & 38.90 & 217.84 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 7.41 & 38.90 & 288.25 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \vdots \\ \varepsilon_{20} \end{bmatrix}
 \end{array}$$

A partir de aquí se obtiene $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$, que al hacer los cálculos se obtiene el siguiente *modelo para el consumo*:

$$\mathbf{CONS} = 1,28 + 1,351 \mathbf{TI} - 0,069 \mathbf{AE} + 0,0187 \mathbf{TI} * \mathbf{AE} \tag{2.27}$$

Donde:

CONS, consumo del motor de combustión interna (l/h).

TI, tiempo de inyección (ms).

AE, adelanto al encendido (°).

2.3.4.1 Residuos del modelo

En la tabla 2.13 y la figura 2.15 se presentan las observaciones, los valores predichos y los residuos del modelo para la potencia.

Tabla 2.13. Valores observados predichos y residuos para la potencia.

Yj	Yi	ERROR
33,3	34,01126	-0,71126
36	36,016016	-0,016016
37,5	37,31162	0,18838
37,1	37,096592	0,003408
35,4	34,01126	1,38874
35,7	36,016016	-0,316016
38,1	37,31162	0,78838
37,6	37,096592	0,503408
34,2	34,01126	0,18874
36,4	36,016016	0,383984
37,1	37,31162	-0,21162
36,9	37,096592	-0,196592
33,8	34,01126	-0,21126
35,5	36,016016	-0,516016
36,9	37,31162	-0,41162
36,9	37,096592	-0,196592
33,3	34,01126	-0,71126
36,4	36,016016	0,383984
36,9	37,31162	-0,41162
36,9	37,096592	-0,196592

Fuente: Autor

En la tabla 2.14 y figura 2.16 se presentan las observaciones, los valores predichos y los residuos del modelo para el consumo.

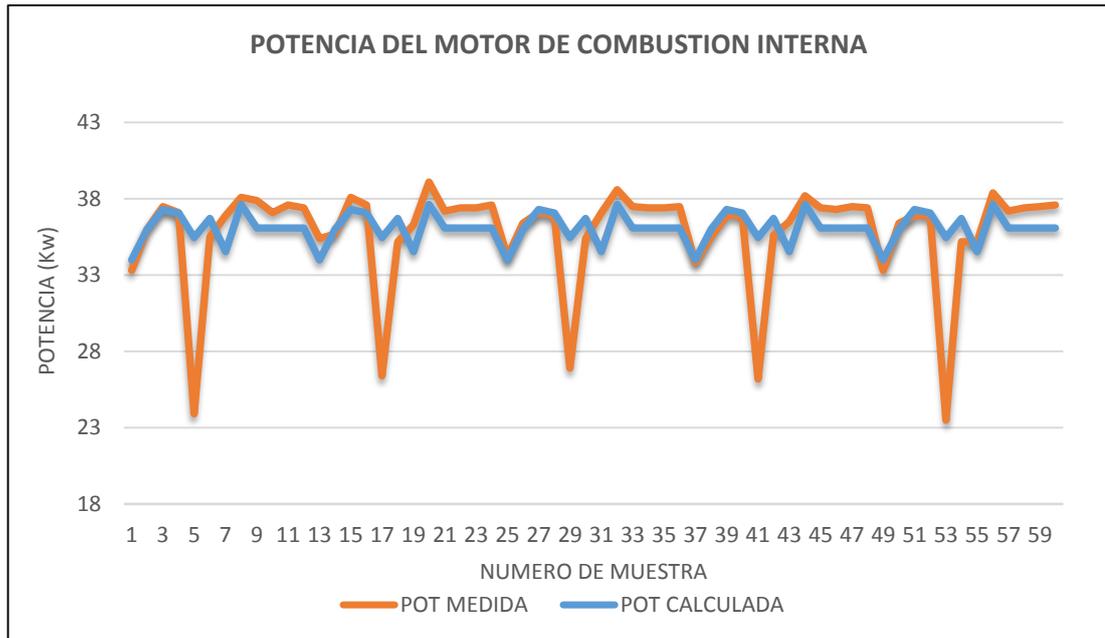


Figura 2.15. Comparación de los valores medidos y calculados para la potencia.

Tabla 2.14. Valores observados predichos y residuos para el consumo.

Yj	Yi	ERROR
10,16	10,085084	0,074916
13,49	13,7048849	-0,2148849
10,15	10,235108	-0,085108
13,77	13,9970663	-0,2270663
10,25	10,085084	0,164916
13,7	13,7048849	-0,0048849
10,35	10,235108	0,114892
13,97	13,9970663	-0,0270663
10,09	10,085084	0,004916
13,62	13,7048849	-0,0848849
10,18	10,235108	-0,055108
14,15	13,9970663	0,1529337
9,96	10,085084	-0,125084
13,82	13,7048849	0,1151151
10,23	10,235108	-0,005108
13,9	13,9970663	-0,0970663

9,85	10,085084	-0,235084
13,77	13,7048849	0,0651151
10,14	10,235108	-0,095108
14,06	13,9970663	0,0629337

Fuente: Autor

Fuente: Autor

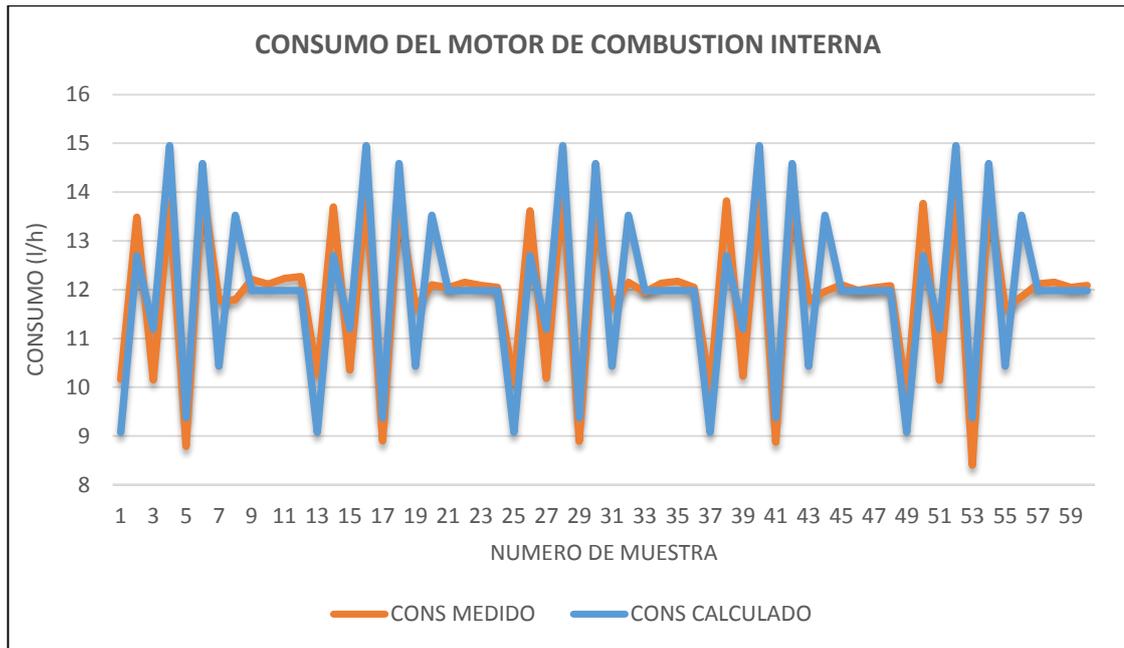


Figura 2.16. Comparación de los valores medidos y calculados para el consumo.

2.3.4.2 Calidad de ajuste (Hinkelman K, 1994)

Una medida sobre la calidad del ajuste de un modelo lo da el *error estándar de estimación*, que es una estimación de la desviación estándar del error σ . En el caso de la regresión múltiple el error estándar de estimación es:

$$\sqrt{CM_E \cdot C_{j+1,j+1}} \quad (2.28)$$

Donde:

CM_E , cuadrado medio del error.

$C_{j+1,j+1}$, es el elemento de la diagonal de la matriz $(X^T X)^{-1}$ correspondiente al parámetro $\hat{\beta}_j$.

El cuadrado medio del error corresponde:

$$CM_E = \frac{SE_E}{n - k - 1} \quad (2.29)$$

Donde:

SE_E , suma de cuadrados del error.

$n - k - 1$, grados de libertad el error.

La suma de cuadrados del error toma la siguiente forma:

$$SE_E = y^T y - \hat{\beta} X^T y \quad (2.30)$$

Donde:

y^T , transpuesta de la matriz de la variable de respuesta.

y , variable de respuesta.

$\hat{\beta}$, estimador de mínimos cuadrados de β .

X^T , transpuesta de la matriz de la variable independiente.

El estimador de mínimos cuadrados $\hat{\beta}$ es:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.31)$$

Donde:

$(X^T X)^{-1}$, inversa del producto punto de la matriz transpuesta de X por la matriz X .

Dado que la varianza se estimó con el CM_E , entonces el estadístico de prueba para examinar la hipótesis está dado por:

$$T = \frac{\hat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \cdot C_{j+1,j+1}}} \quad (2.32)$$

Donde se rechaza H_0 si $T > t_{(\alpha/2, n-k-1)}$ o en forma equivalente si $valor\ p = P(T > t_0) < \alpha$. En la figura 2.17 se muestra un resumen del análisis sobre el modelo de regresión.

Fuente: (MONTGOMERY, 2004)

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico	Valor - p
Interacción	β_0	$\sqrt{CM_E \cdot C_{11}}$	$T = \frac{\hat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \cdot C_{11}}}$	$P(T > t_0) < \alpha$
β_1	β_1	$\sqrt{CM_E \cdot C_{22}}$	$T = \frac{\hat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \cdot C_{22}}}$	$P(T > t_0) < \alpha$
β_k	β_k	$\sqrt{CM_E \cdot C_{j+1, j+1}}$	$T = \frac{\hat{\beta}_0}{\sqrt{CM_E \cdot C_{j+1, j+1}}}$	$P(T > t_0) < \alpha$

Figura 2.17. Análisis de regresión para el modelo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$

▪ Potencia

En la figura 2.18 se muestran los resultados obtenidos para el análisis del modelo de regresión de la potencia. Se puede demostrar que todos los términos son significativos. De acuerdo con la prueba t, el tiempo de inyección (TI) es la que tiene menor contribución a la respuesta.

Fuente: Autores.

Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		36,095	0,126	286,25	0,000
TI	0,890	0,445	0,126	3,53	0,003
AE	2,190	1,095	0,126	8,68	0,000
TI*AE	-1,110	-0,555	0,126	-4,40	0,000

Regression Equation in Uncoded Units	
POT	$= -56,2 + 11,24\ TI + 2,421\ AE - 0,2920\ TI*AE$

Figura 2.18. Análisis de regresión del modelo de la potencia.

La información desplegada (Minitab Inc, 2016) en la figura 2.18 se detalla a continuación:

- *Term*, es el coeficiente individual en el modelo, llamado parámetro.
 - *Coef*, es el valor de los estimadores o constantes dentro del modelo, llamado estimación.
 - *SE Coef*, es el valor del error estándar.
 - *T-value*, es el valor del estadístico *T*.
 - *P-value*, es el valor *p*.
- **Consumo**

En la figura 2.19 se muestran los resultados obtenidos para el análisis del modelo de regresión del consumo. Se puede demostrar que todos los términos son significativos, excepto la interacción entre el tiempo de inyección (TI) y el adelanto al encendido (AE).

Fuente: Autores.

Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		11,9805	0,0298	402,38	0,000
TI	3,6890	1,8445	0,0298	61,95	0,000
AE	0,2190	0,1095	0,0298	3,68	0,002
TI*AE	0,0710	0,0355	0,0298	1,19	0,251

Regression Equation in Uncoded Units
CONS = 1,28 + 1,351 TI - 0,069 AE + 0,0187 TI*AE

Figura 2.19. Análisis de regresión del modelo del consumo.

La información desplegada en la figura 2.19 (Minitab Inc, 2016) se detalla a continuación:

- *Term*, es el coeficiente individual en el modelo, llamado parámetro.

- *Coef*, es el valor de los estimadores o constantes dentro del modelo, llamado estimación.
- *SE Coef*, es el valor del error estándar.
- *T-value*, es el valor del estadístico *T*.
- *P-value*, es el valor *p*.

2.3.5 Análisis de varianza (Deming, 1994)

El objetivo del análisis de varianza es probar la hipótesis de igualdad de los tratamientos con respecto a la media del correspondiente variable de respuesta:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_0: \tau_i \neq 0$$

(2.33)

Donde τ_i , es el efecto del tratamiento i sobre la variable de respuesta. Si se acepta H_0 se confirma que los efectos sobre la respuesta de los k tratamientos son estadísticamente nulos, y en caso de rechazar se estaría concluyendo que al menos un efecto es diferente de cero.

Fuente: (MONTGOMERY, 2004)

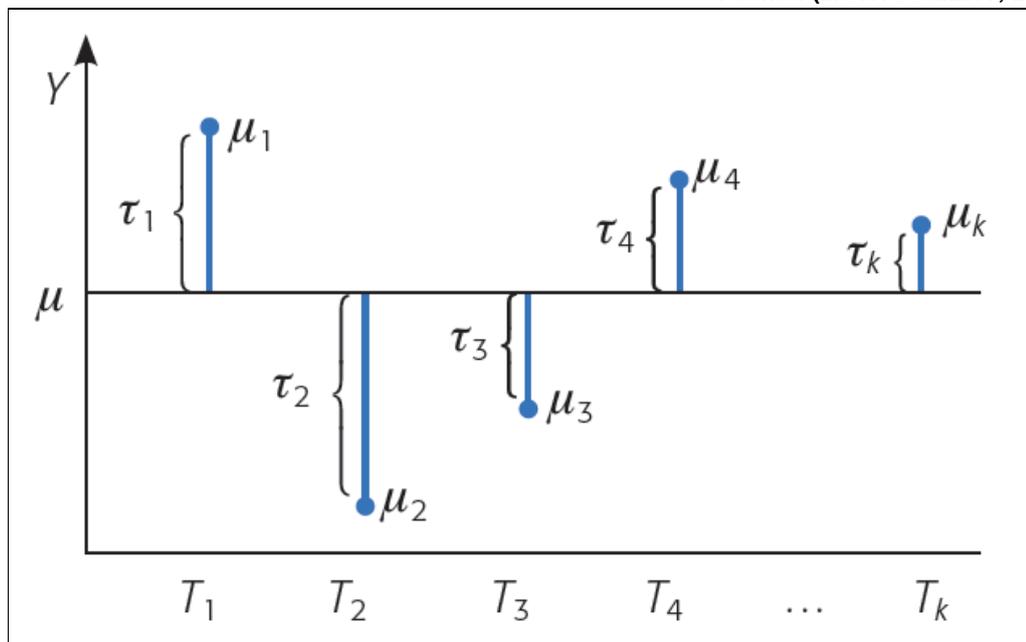


Figura 2.20. Representación de los efectos de los tratamientos.

En la figura 2.20 se puede observar que $\tau_i = \mu_i - \mu$, el efecto del tratamiento i , es la distancia entre la respuesta media del tratamiento, μ_i , y la respuesta global, μ , y cuando el efecto es igual a cero equivale a decir que la media del tratamiento correspondiente es igual a la media global.

Para probar la hipótesis mediante el análisis de varianza, lo primero es descomponer la variabilidad total de los datos en sus dos componentes: la variabilidad debida a tratamientos y a la que corresponde al error aleatorio.

Una medida de la variabilidad total presente en las observaciones es la suma total de cuadrados:

$$SC_T = \sum_1^k \sum_1^n Y_{ij}^2 - \frac{Y^2_{..}}{N} \quad (2.34)$$

Donde:

k , es el número de tratamientos.

n , es el número de variables independientes.

Y_{ij} , es cada una de las observaciones del experimento.

$Y_{..}$, es la suma total de las mediciones.

N , es el total de mediciones.

En forma abreviada, esta descomposición de la suma total de cuadrados puede ser expresada como:

$$SC_T = SC_{TRAT} + SC_E \quad (2.35)$$

Donde:

SC_{TRAT} , suma de cuadrados de tratamientos.

SC_E , suma de cuadrados del error.

La suma de cuadrados mide la variación o diferencias entre tratamientos, ya que éstos son muy diferentes entre sí, mientras que la suma de cuadrados del error mide la variación dentro de los tratamientos. La suma de cuadrados tiene $N - 1$ grados de libertad. Hay k tratamientos o niveles, así que SC_{TRAT} tiene $k - 1$ grados

de libertad, mientras que la SC_E tiene $N - k$. Los grados de libertad cumplen con la igualdad dada por:

$$N - 1 = (k - 1) + (N - k) \quad (2.36)$$

Las sumas de cuadrados divididas entre sus respectivos grados de libertad se llaman *cuadrados medios*. Los dos más importantes son el cuadrado medio de tratamientos y el cuadrado medio del error, que se representa por:

$$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1} \quad (2.37)$$

Donde:

CM_{TRAT} , es el cuadrado medio de tratamientos.

$$CM_E = \frac{SC_E}{N - K} \quad (2.38)$$

Donde:

CM_E , es el cuadrado medio del error.

Los valores esperados de los cuadrados medios están dados por:

$$E(CM_E) = \sigma^2 \quad (2.39)$$

Donde:

$E(CM_E)$, es la estimación del cuadrado medio del error.

σ^2 , varianza.

$$E(CM_{TRAT}) = \sigma^2 + \frac{\sum_1^k n_i \tau_i}{N - k} \quad (2.40)$$

Donde:

$E(CM_{TRAT})$, es la estimación del cuadrado medio de tratamientos.

$\sum_1^k n_i$, es el número total de observaciones.

Estas expresiones demuestran que cuando la hipótesis nula es verdadera, ambos cuadrados medios estiman la varianza, ya que el segundo término de la expresión para el $E(CM_{TRAT})$ sería igual a cero. Con base en este hecho se construye el estadístico de prueba. Bajo el supuesto de que la hipótesis H_0 es verdadera, el estadístico:

$$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E} \quad (2.41)$$

Donde:

F_0 , es el estadístico de prueba.

De esta ecuación se deduce que si F_0 es grande, se contradice la hipótesis de que no hay efectos de tratamientos; en cambio, si F_0 es pequeño se confirma la validez de H_0 . Así para un nivel de significancia α , que este caso es de 0.05, se rechaza H_0 si el *valor p* $< \alpha$, donde el valor p es el área bajo la distribución $F_{k-1, N-k}$ a la derecha del estadístico F_0 , es decir, el *valor p* $= P(F > F_0)$

▪ **Potencia**

Toda la información necesaria para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor-p se describe en la tabla de análisis de varianza (ANOVA) que se detalla en la figura 2.21. De acuerdo con el valor p, todas las variables son significativas para la variable de respuesta (Minitab Inc, 2016).

La información desplegada en la figura 2.21 se detalla a continuación:

- *DF*, grados de libertad.
- *Adj SS*, suma total de cuadrados.
- *Adj MS*, cuadrado medio del error.
- *F-value*, estadístico de prueba.
- *P-value*: valor *p*.

Fuente: Autores.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	34,102	11,3672	35,75	0,000	
Linear	2	27,941	13,9705	43,93	0,000	
TI	1	3,961	3,9605	12,45	0,003	
AE	1	23,981	23,9805	75,41	0,000	
2-Way Interactions	1	6,161	6,1605	19,37	0,000	
TI*AE	1	6,161	6,1605	19,37	0,000	
Error	16	5,088	0,3180			
Total	19	39,190				

Figura 2.21. Análisis de varianza para la potencia.

- **Consumo**

Toda la información necesaria para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al valor-p se describe en la tabla de análisis de varianza (ANOVA) que se detalla en la figura 2.22. De acuerdo con el valor p, todas las variables son significativas para la variable de respuesta, excepto la interacción entre el tiempo de inyección y el adelanto al encendido (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Factorial Regression: CONS versus TI, AE						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	68,3086	22,7695	1284,24	0,000	
Linear	2	68,2834	34,1417	1925,65	0,000	
TI	1	68,0436	68,0436	3837,77	0,000	
AE	1	0,2398	0,2398	13,53	0,002	
2-Way Interactions	1	0,0252	0,0252	1,42	0,251	
TI*AE	1	0,0252	0,0252	1,42	0,251	
Error	16	0,2837	0,0177			
Total	19	68,5923				

Figura 2.22. Análisis de varianza para el consumo.

La información desplegada en la figura 2.22 se detalla a continuación:

- *DF*, grados de libertad.
- *Adj SS*, suma total de cuadrados.
- *Adj MS*, cuadrado medio del error.
- *F-value*, estadístico de prueba.
- *P-value*: valor *p*.

2.3.6 Efecto principal (Fowlkes, 1995)

El efecto de un factor se define como el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en tal factor. En particular, los efectos principales son los cambios en la media de la variable de respuesta que se deben a la acción individual de cada factor. En términos matemáticos, el efecto principal de un factor con dos niveles es la diferencia entre la respuesta media observada cuando tal factor estuvo en su primer nivel, y la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su segundo nivel.

El efecto principal de los factores se representa de manera gráfica como en la figura 2.23 y figura 2.24, en cuyo eje horizontal se ubican los niveles del factor y en el eje vertical se encuentra la media de la respuesta observada en los correspondientes niveles o tratamientos.

▪ **Potencia**

En la figura 2.23 se aprecia que para la variable de respuesta potencia, *el efecto principal del factor del adelanto al encendido (AE) es mayor que el del factor de tiempo de inyección (TI)* (Minitab Inc, 2016).

▪ **Consumo**

En la figura 2.24 se aprecia que para la variable de respuesta consumo, *el efecto principal del factor de tiempo de inyección (TI) es mayor que el del factor de adelanto al encendido (AE)* (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

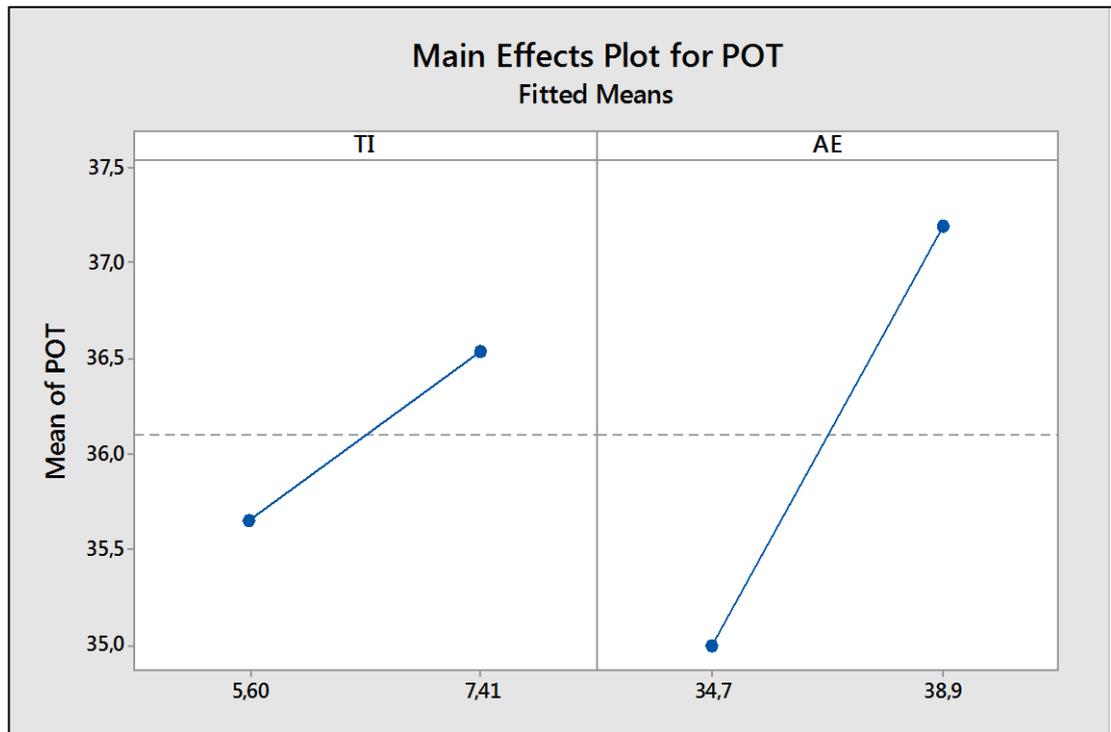


Figura 2.23. Representación de efectos principales para la potencia.

Fuente: Autores.

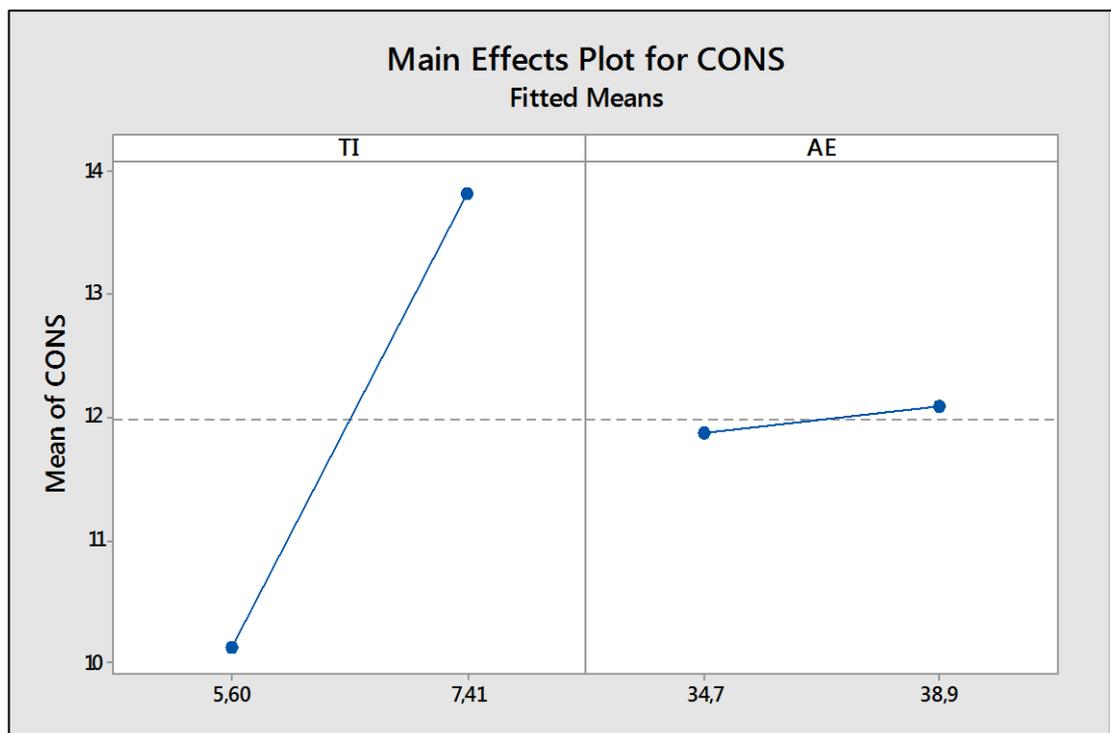


Figura 2.24. Representación de efectos principales para el consumo.

2.3.7 Diagrama de Pareto (Rhyder, 1997)

Los efectos pueden graficarse a través de un *diagrama de Pareto* para visualizar que variable de entrada tiene un mayor impacto sobre los factores de respuesta. En general, para un diseño 2^k con n réplicas, sea CM_E el cuadrado medio del error que se obtiene a partir de la ecuación 2.38 y de la tabla de análisis de varianza (figura 2.21 y figura 2.2), entonces el error estándar para un efecto puede ser estimado por:

$$\hat{\sigma}_{efecto} = \sqrt{\frac{CM_E}{n2^{k-2}}} \quad (2.42)$$

Donde:

$\hat{\sigma}_{efecto}$, estimación del error estándar de un efecto.

CM_E , cuadrado medio del error.

n , número de réplicas.

2^k , diseño experimental con k factores.

Debido a que el error estándar de un estadístico es una estimación de su desviación estándar, y ésta a su vez es una estimación de la variación muestral o experimental que tiene dicho estimador. Así, en el diagrama de Pareto estandarizado se grafica la estimación de los efectos estandarizados:

$$efecto\ estandarizado = \frac{efecto}{\sqrt{\frac{CM_E}{n2^{k-2}}}} \quad (2.43)$$

Además, el efecto estandarizado sirve como estadístico de prueba para probar la hipótesis:

$$H_0: Efecto\ poblacional = 0$$

Contra la alternativa de que el efecto poblacional es diferente de cero. Así se rechaza H_0 si el valor absoluto del efecto estandarizado es mayor que el valor crítico

de tablas de la distribución T de Student con v grados de libertad: $t_{\alpha/2,v}$, donde α es el nivel de significancia para la prueba y v los grados de libertad del error.

- **Potencia**

Para el análisis de la potencia, como el error tiene 16 grados de libertad y se trabaja con $\alpha = 0.05$, entonces de la tabla para la distribución T de Student se obtiene que el valor crítico es $t_{0.25,16} = 2.120$. Por lo tanto, si el valor de la estimación del efecto estandarizado es mayor que 2.120, entonces el efecto correspondiente será significativo. Así los efectos significativos (figura 2.25) serán: el adelanto al encendido, la interacción del adelanto al encendido con el tiempo de inyección, y el tiempo de inyección, en ese orden de importancia (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

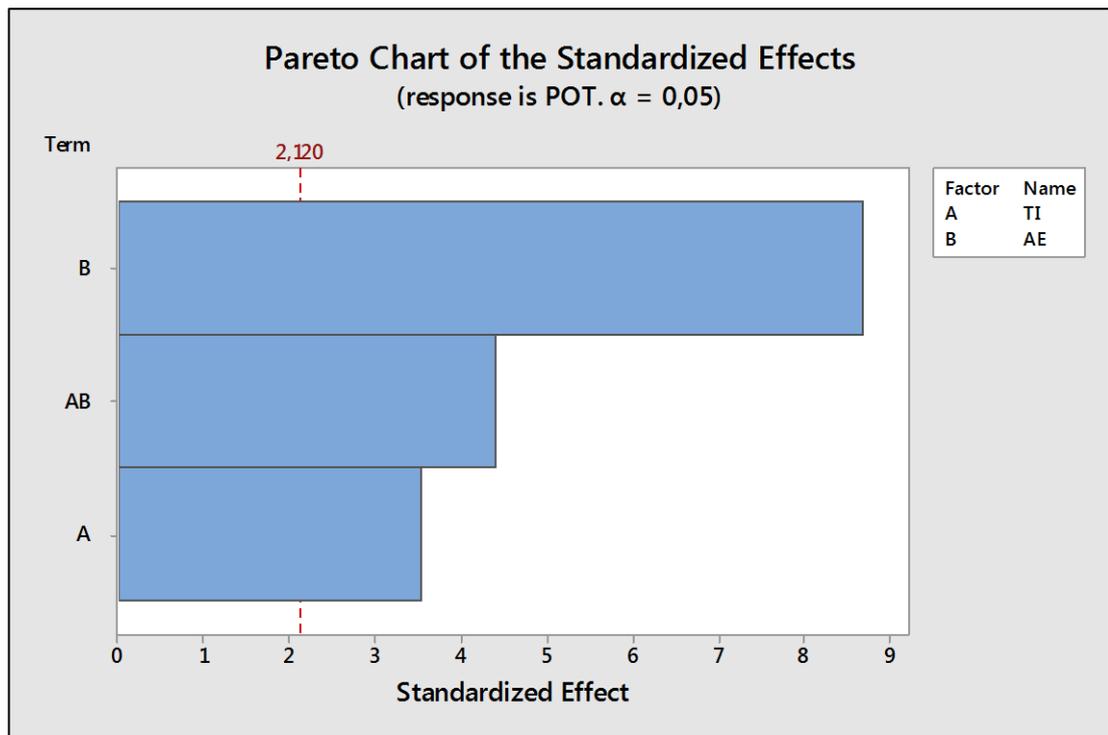


Figura 2.25. Pareto de efectos principales de la potencia.

- **Consumo**

Para el análisis del consumo, como el error tiene 16 grados de libertad y se trabaja con $\alpha = 0.05$, entonces de la tabla para la distribución T de Student se obtiene que el valor crítico es $t_{0.25,16} = 2.120$. Por lo tanto, si el valor de la estimación del

efecto estandarizado es mayor que 2.120, entonces el efecto correspondiente será significativo. Así los efectos significativos (figura 2.26) serán el tiempo de inyección, y el adelanto al encendido, en ese orden de importancia. Mientras que la interacción del adelanto al encendido con el tiempo de inyección, no es significativo (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

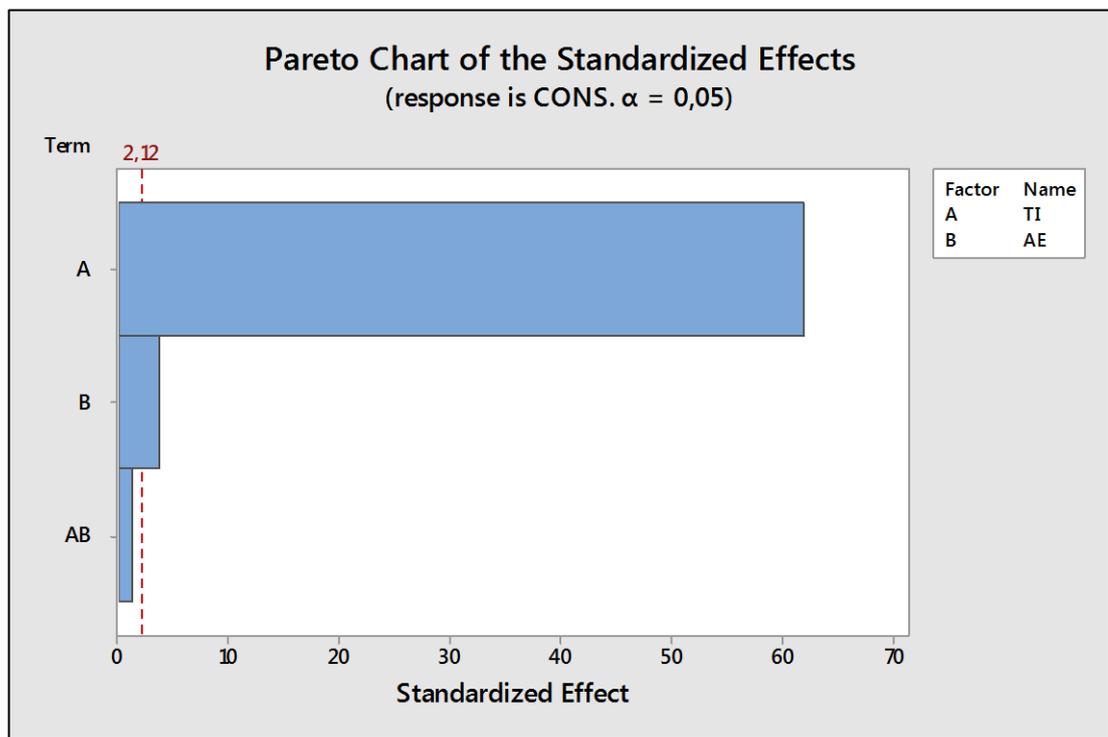


Figura 2.26. Pareto de efectos principales del consumo.

2.3.8 Efecto de interacción (Antony, 2003)

Dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentra el otro.

- **Potencia**

El efecto de interacción de los dos factores se grafica como se muestra en la figura 2.27; en el eje vertical se representa la magnitud de la variable de respuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la

respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta.

Analizando la gráfica, se observa que los dos factores, tiempo de inyección y el adelanto al encendido, tienen interacción debido a que las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente. Al interpretar de qué manera un efecto de interacción afecta la variable de respuesta, que en este caso es la potencia, se analiza con detalle lo que pasa con la potencia cuando se mueve un factor dependiendo del nivel en que esté el otro.

En la figura 2.27, se aprecia que si el tiempo de inyección cambia de nivel (5.60 ms) a (7.41 ms) cuando el adelanto al encendido $AE = 34,7^\circ$, la potencia también se incrementa; pero si $AE = 38,9^\circ$, la potencia decrece ligeramente. En otras palabras, el tiempo de inyección tiene un efecto positivo y negativo sobre la potencia, dependiendo del nivel que tenga el adelanto al encendido (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

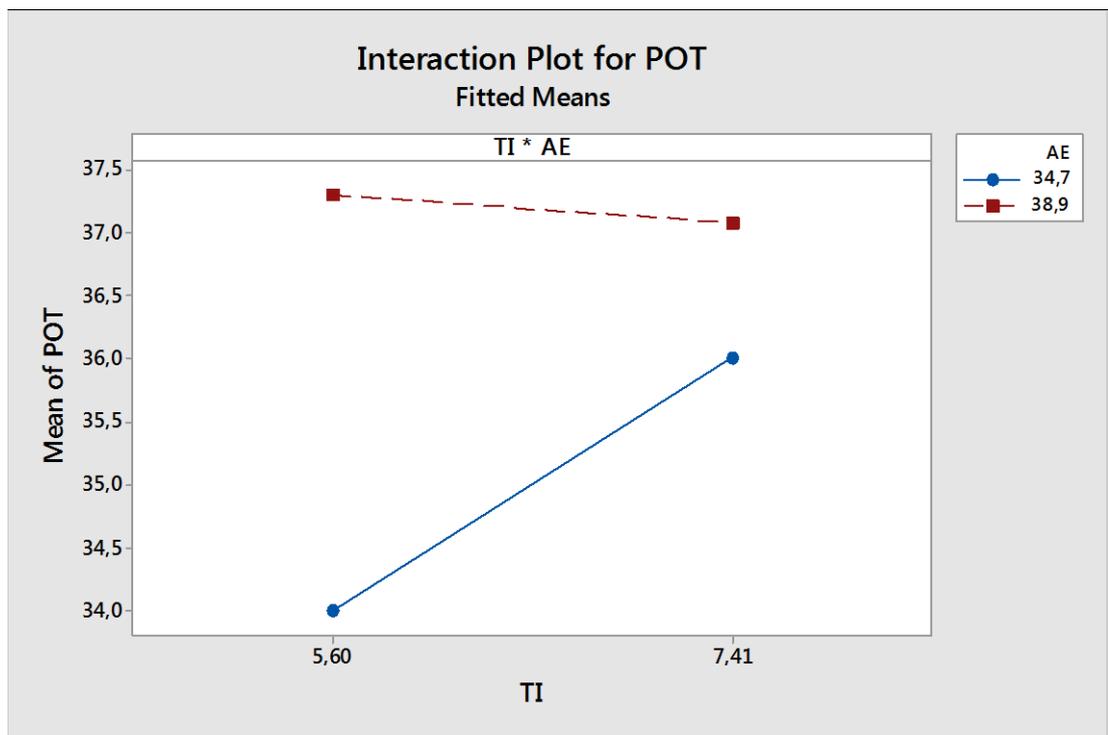


Figura 2.27. Representación de interacción de los factores para la potencia.

Del mismo gráfico, se puede concluir que al trabajar con el adelanto al encendido, AE , en nivel alto hace que la potencia, POT , no dependa demasiado del valor que pueda tomar el tiempo de inyección, TI . Situación totalmente diferente

sucede cuando se trabaja con el adelanto al encendido en nivel bajo, la potencia cambia significativamente dependiendo del valor que tome el tiempo de inyección.

Se concluye que hay una condición que maximiza la potencia del motor de combustión interna: $AE = 38,9^\circ$. Este efecto también se puede apreciar en la gráfica de cubo de la figura 2.28, en la que se aprecia la respuesta predicha en cada punto del diseño (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

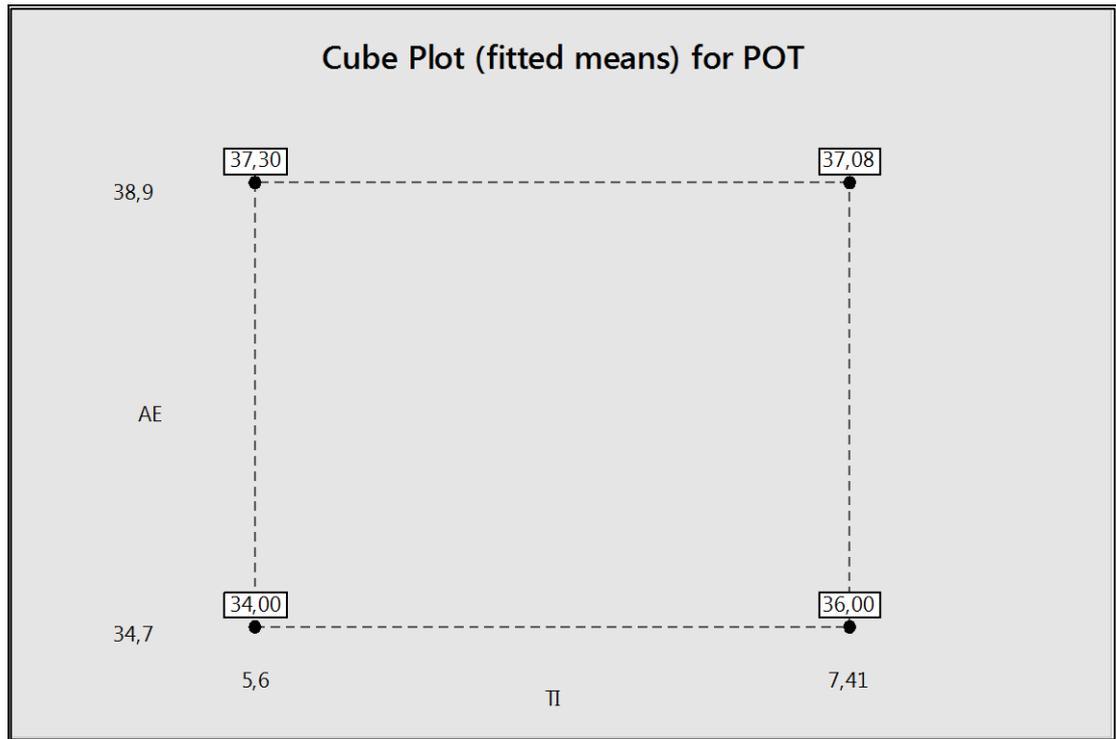


Figura 2.28. Gráfica de cubos y variable de respuesta para la potencia.

En el mismo cubo, se nota que los dos tratamientos donde el adelanto al encendido (AE) trabaja con su nivel alto, aumenta la potencia del motor que cuando el adelanto se encuentra en nivel bajo. Con base a lo anterior, el mejor tratamiento para maximizar la potencia es cuando el adelanto al encendido trabaja con $38,9^\circ$, más sin importar el tiempo de inyección.

▪ Consumo

El efecto de interacción de los dos factores se grafica como se muestra en la figura 2.29; en el eje vertical se representa la magnitud de la variable de repuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la

respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta.

Analizando la gráfica, se observa que los dos factores, tiempo de inyección y el adelanto al encendido, no tienen interacción debido a que las líneas obtenidas tienen la misma pendiente (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

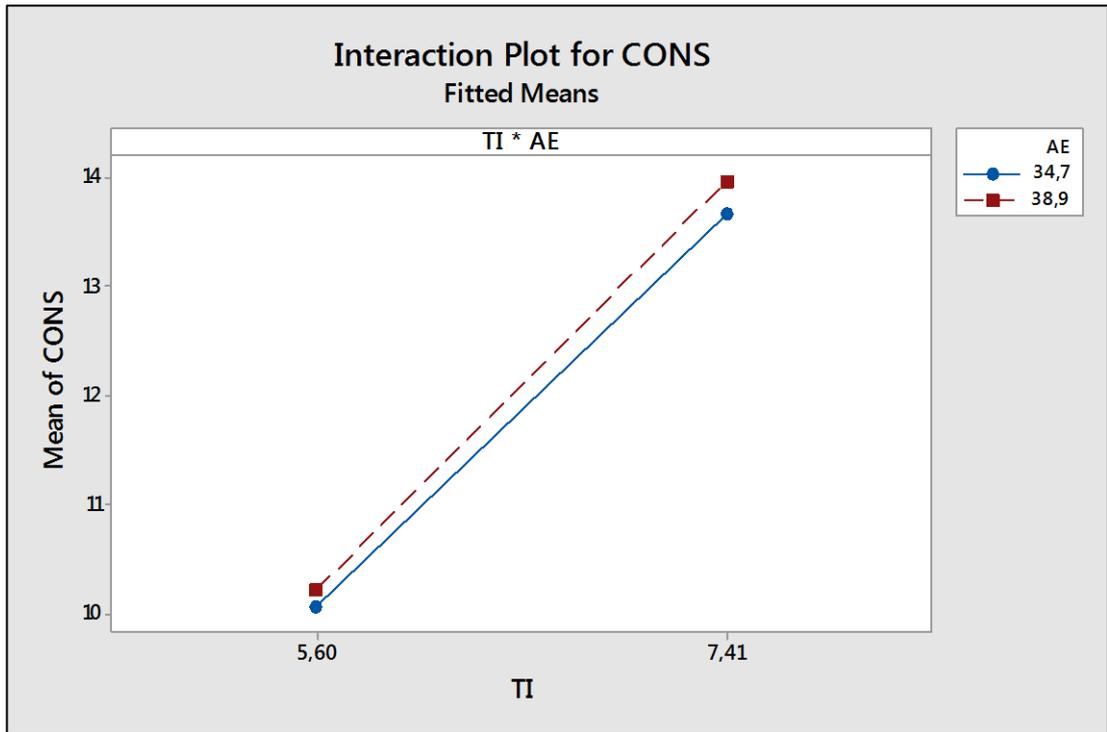


Figura 2.29. Representación de interacción de los factores para el consumo.

2.3.9 Verificación de los supuestos, validación del modelo (GUTIERREZ PULIDO, 2012)

La validez de los resultados obtenidos en el análisis de varianza queda supeditado a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos son: *normalidad, varianza constante e independencia*. Esto es, las respuestas (potencia y consumo) se deben distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre las respuestas se traducen en supuestos sobre el término del error. Para esto es necesario utilizar la muestra de residuos para comprobar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen, los residuos o residuales se pueden ver como una muestra aleatoria de una distribución normal con media cero y varianza

constante. Los residuos se definen como la diferencia entre la respuesta observada y la respuesta predicha por el modelo, lo cual permite hacer un diagnóstico de la calidad del modelo, ya que su magnitud señala que tan bien describe a los datos del modelo. El residual o residuo asociado a la observación está dado por:

$$e_{ij} = Y_{ij} - \hat{Y}_{ij} \quad (2.44)$$

Donde:

e_{ij} , residuo asociado a la observación.

Y_{ij} , dato del tratamiento.

\hat{Y}_{ij} , respuesta predicha.

Los supuestos del modelo lineal, en términos de los residuos, son:

- Los e_{ij} siguen una distribución normal con media cero.
- Los e_{ij} son independientes entre sí.
- Los residuos de cada tratamiento tienen la misma varianza σ^2

2.3.9.1 Normalidad

Esta gráfica es de tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a quedar alineados; por lo tanto, si claramente no se alinean se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto. Cabe enfatizar el hecho de que el ajuste de puntos a una recta no tiene que ser perfecto, dado que el análisis de varianza resiste pequeñas desviaciones al supuesto de normalidad.

▪ **Potencia**

En la figura 2.30 se representa la gráfica de normalidad del análisis de la potencia, se observa que los puntos se apegan a la línea colocada visualmente, se concluye que no hay violación al supuesto de normalidad, es decir que la normalidad se cumple de manera satisfactoria (Minitab Inc, 2016).

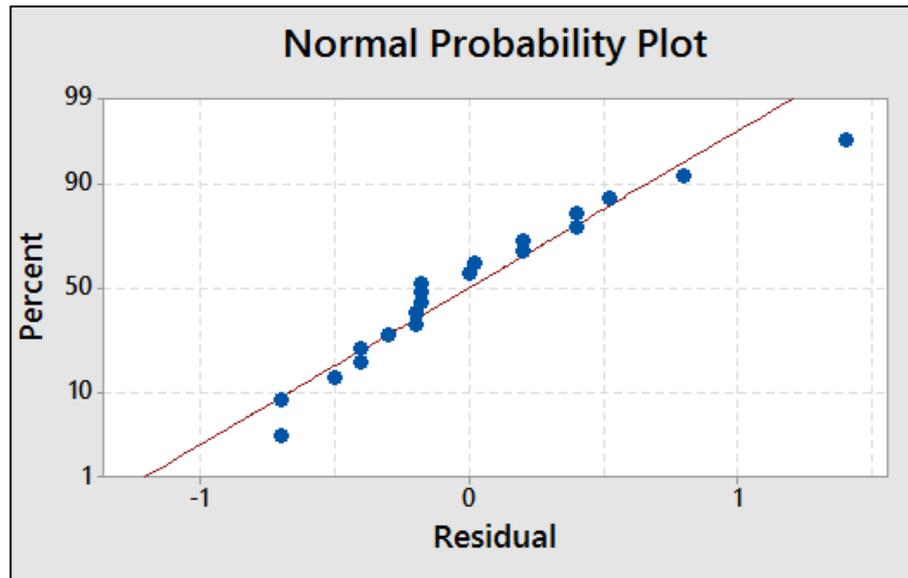


Figura 2.30. Gráfica de residuos vs porcentaje acumulado para la potencia.

- **Consumo**

En la figura 2.31 se representa la gráfica de normalidad del análisis del consumo, se observa que los puntos se apegan a la línea colocada visualmente, se concluye que no hay violación al supuesto de normalidad, es decir que la normalidad se cumple de manera satisfactoria (Minitab Inc, 2016).

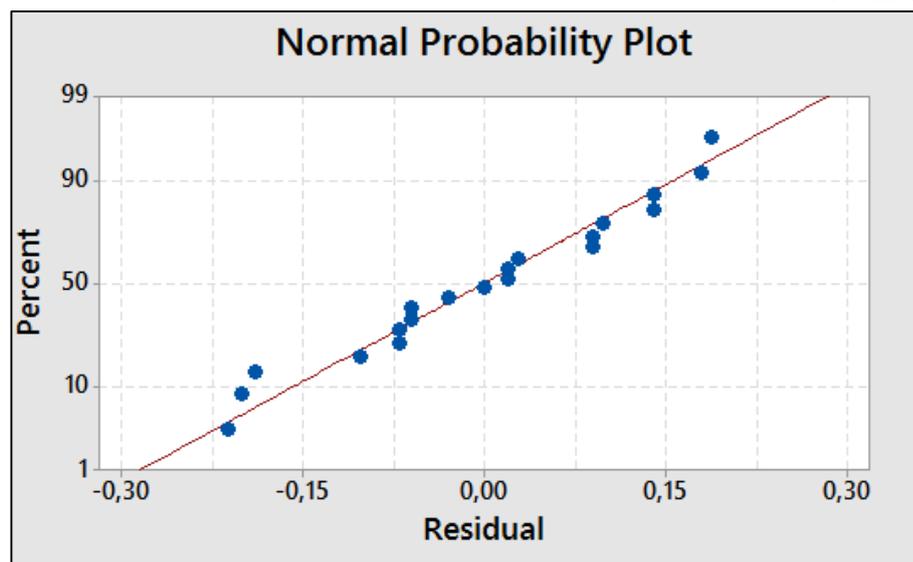


Figura 2.31. Gráfica de residuos vs porcentaje acumulado para el consumo.

2.3.9.2 Varianza constante

Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los predichos contra los residuos, los predichos de la potencia o consumo van en el eje horizontal y los residuos de la potencia o consumo en el vertical. Si los puntos en esta gráfica se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal (sin ningún patrón claro y contundente), entonces es señal de que se cumple el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza.

▪ Potencia

Para el resultado de la potencia el análisis de varianza constante presenta agujeros en el sentido horizontal; esto se debe a que sólo son cuatro puntos de diseño, y las predicciones en ellos difieren bastante. En particular, la figura 2.32 no muestra ninguna anomalía, por lo cual se cumple satisfactoriamente con el supuesto de varianza constante.

Fuente: Autores.

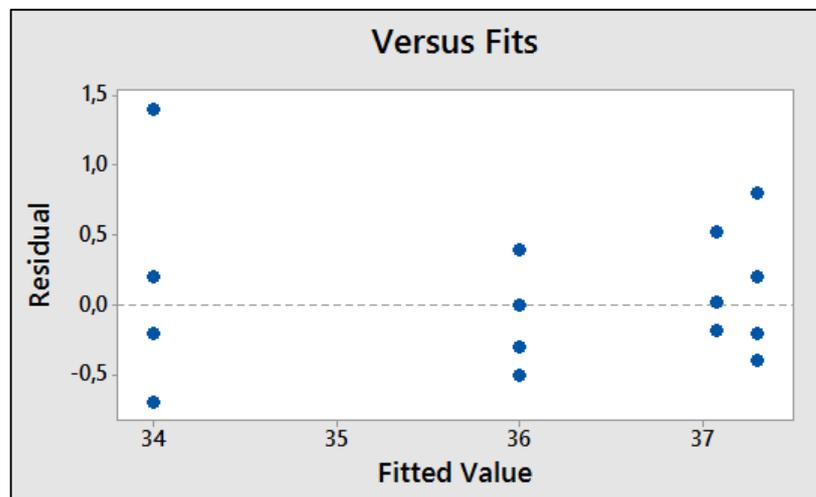


Figura 2.32. Gráfica de predichos vs residuos para la potencia.

▪ Consumo

Para el resultado del consumo el análisis de varianza constante presenta agujeros en el sentido horizontal; esto se debe a que sólo son cuatro puntos de diseño, y las predicciones en ellos difieren bastante. En particular, la figura 2.33 no

muestra ninguna anomalía, por lo cual se cumple satisfactoriamente con el supuesto de varianza constante (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

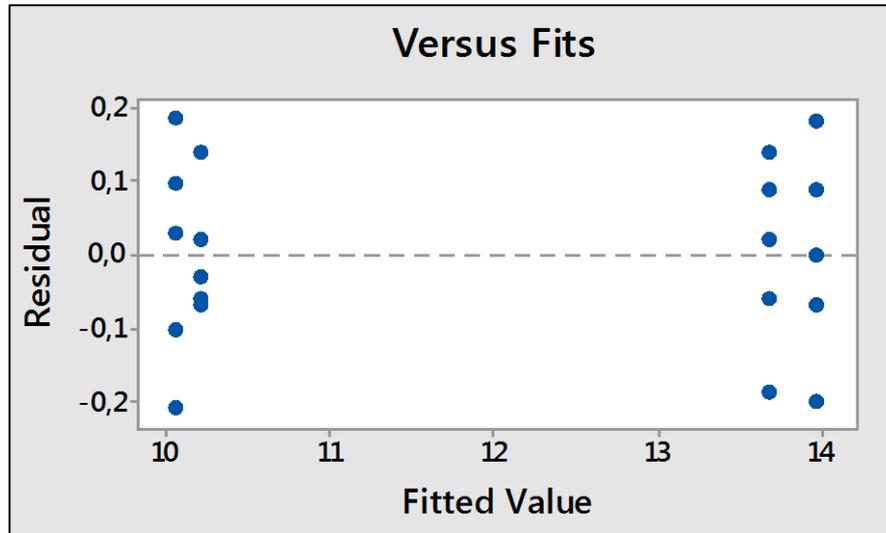


Figura 2.33. Gráfica de predichos vs residuos para el consumo.

2.3.9.3 Independencia

La suposición de independencia en los residuos puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, si al graficar en el eje horizontal el tiempo (orden de corrida) y en el eje vertical los residuos, se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, esto es evidencia de que existe una correlación entre los errores y, por lo tanto, el supuesto de independencia no se cumple.

Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de una banda horizontal, el supuesto se está cumpliendo. La violación de este supuesto generalmente indica deficiencias en la planeación y ejecución del experimento; asimismo, puede ser un indicador de que no se aplicó en forma correcta las pruebas experimentales.

- **Potencia**

En la figura 2.34 no se observa ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen), por lo tanto, se concluye que no existe problema con la declaración de independencia para la potencia (Minitab Inc, 2016).

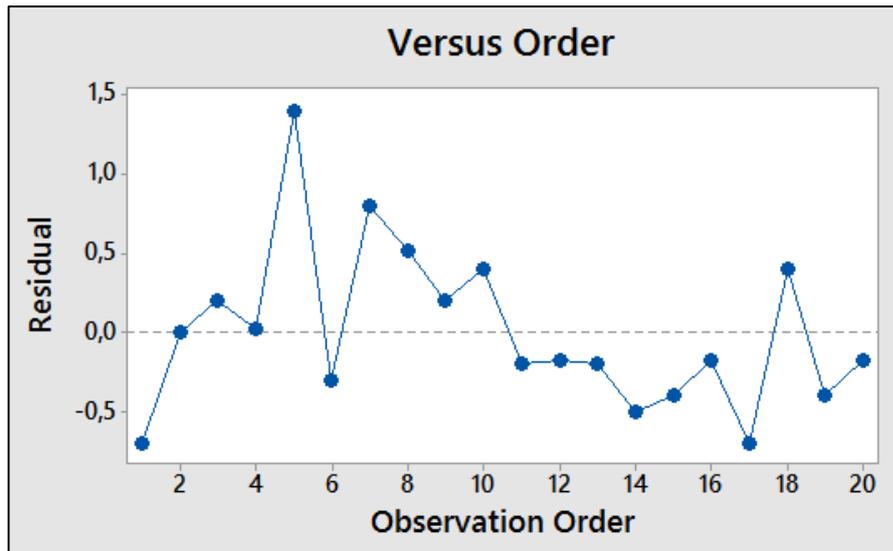


Figura 2.34. Gráfica de orden de corrida vs residuos para la potencia.

- **Consumo**

En la figura 2.35 no se observa ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen), por lo tanto, se concluye que no existe problema con la declaración de independencia para el consumo (Minitab Inc, 2016).

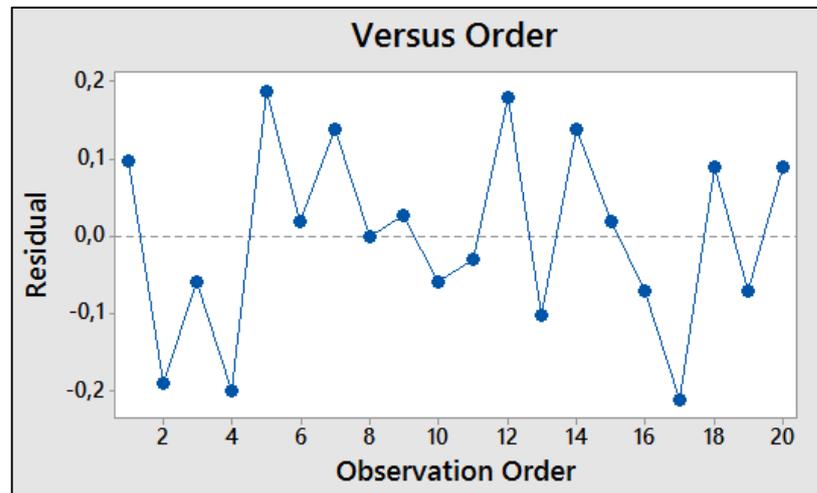


Figura 2.35. Gráfica de orden de corrida vs residuos para el consumo.

CAPÍTULO III

OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DEL PROCESO CON METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

En este capítulo se demostrará el cumplimiento de la hipótesis planteada en este trabajo de investigación, es decir, se demostrará que con la aplicación de la metodología propuesta se puede alcanzar la optimización efectiva de un motor, maximizando la potencia del motor con el mínimo consumo posible sobre el mismo.

3.1 Metodología de superficie de respuesta (W. Spendley, 1992)

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es la estrategia experimental y analítica que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad de la respuesta. En el caso de análisis, una adecuada optimización del funcionamiento del motor de combustión interna depende de dos características: potencia y consumo. Las dos características son importantes para que el funcionamiento del motor sea la adecuada. Si la optimización sólo se hace para una característica podrían generarse condiciones inadecuadas para la otra característica. Por ello es imprescindible que se optimicen simultáneamente las dos respuestas de interés.

El problema de la optimización simultánea radica en que, por lo general, los óptimos individuales no son las mismas combinaciones de los factores de control. Esto hace necesario buscar una *solución compromiso*, donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio. Esta solución compromiso se llama *óptimo simultáneo*. Para la optimización simultánea se aplica en un método analítico basado en una función de deseabilidad. Para el método analítico se necesita que las dos respuestas a optimizar, potencia (*POT*) y consumo del motor de combustión interna (*CONS*), estén modeladas adecuadamente por un modelo de segundo orden en términos del tiempo de inyección (*TI*) y adelanto al encendido (*AE*). Es decir, para empezar la optimización simultánea se deben tener los siguientes modelos estimados, dados por:

$$\hat{Y}_l = \hat{B}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{B}_{il}x_i + \sum_{i=1}^k \hat{B}_{iil}x_i^2 + \sum_{i=1}^k \hat{B}_{ijl}x_ix_j; l = 1,2,3, \dots, m \quad (3.1)$$

En este caso, B_i son los coeficientes para los términos de primer orden, los B_{ii} son los coeficientes para los términos cuadráticos puros, los B_{ij} son los coeficientes para los términos de producto cruz. Los términos cuadráticos puros y los de producto cruz son de segundo orden.

3.2 Factoriales 2^2 con punto central (De la Vara, 2002)

El diseño central compuesto es un diseño factorial con puntos centrales, ampliado con un grupo de puntos axiales que permiten estimar la curvatura. En el caso del análisis se ejecuta un experimento factorial y se determina los factores significativos: tiempo de inyección (niveles establecidos 5,60 ms y 7,41 ms) y adelanto al encendido (niveles establecidos 34,7° y 38,9°). Los siguientes puntos son los puntos de diseño para el experimento (figura 3.1).

Fuente: Autores.

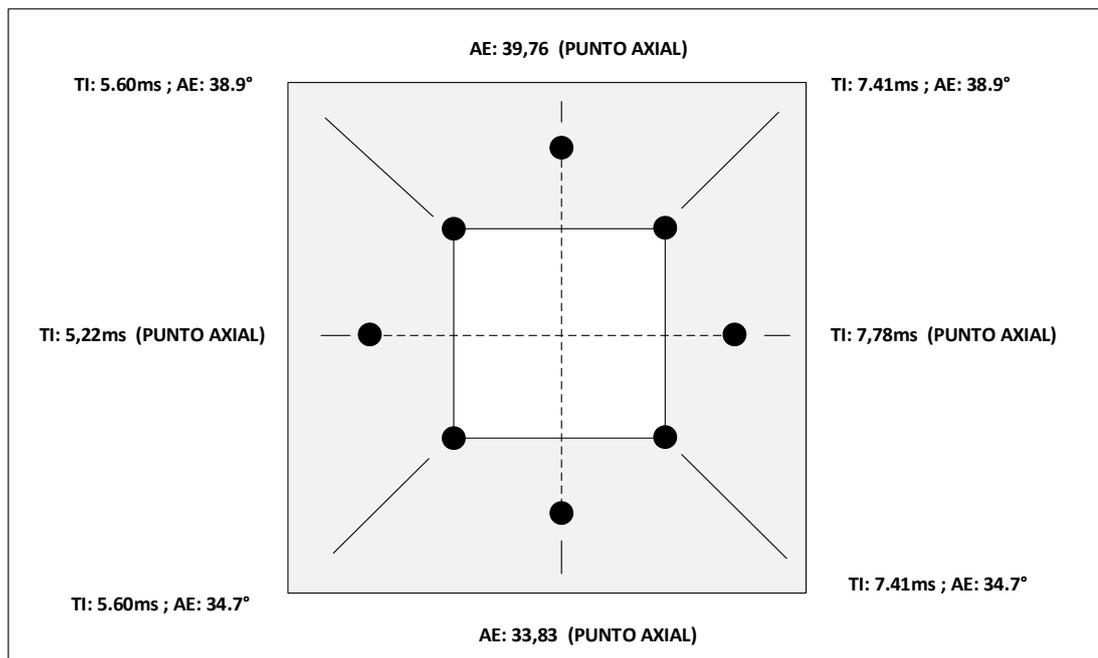


Figura 3.1. Gráfica del diseño central compuesto.

En la investigación planteada se estudia el efecto de 2 factores (tiempo de inyección y adelanto al encendido) sobre la potencia y el consumo de combustible del motor de combustión interna. *La meta es encontrar una combinación de los*

factores que pueda maximizar la potencia del motor ($\approx 39 \text{ Kw}$) mientras se mantiene el consumo de combustible entre 10 y 11 lt/h , con un valor objetivo de 10.5 lt/h .

3.3 Construcción del diseño central compuesto

Para optimizar la respuesta del proceso se construye un diseño central compuesto, en cual varían los dos factores experimentales: tiempo de inyección y adelanto al encendido (tabla 3.1). En el experimento se corre un diseño factorial 2^2 con 5 réplicas y 4 repeticiones al centro (Minitab Inc, 2016).

Tabla 3.1. Resultados del experimento con 5 réplicas y 4 repeticiones al centro.

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	TI	AE	POT	CONS
1	1	1	1	5,60000	34,7000	33,3	10,16
2	2	1	1	7,41000	34,7000	36	13,49
3	3	1	1	5,60000	38,9000	37,5	10,15
4	4	1	1	7,41000	38,9000	37,1	13,77
5	5	-1	1	5,22514	36,8000	23,9	8,79
6	6	-1	1	7,78486	36,8000	35,5	14,15
7	7	-1	1	6,50500	33,8302	36,9	11,78
8	8	-1	1	6,50500	39,7698	38,1	11,79
9	9	0	1	6,50500	36,8000	37,9	12,21
10	10	0	1	6,50500	36,8000	37,1	12,11
11	11	0	1	6,50500	36,8000	37,6	12,23
12	12	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,27
13	13	1	1	5,60000	34,7000	35,4	10,25
14	14	1	1	7,41000	34,7000	35,7	13,7
15	15	1	1	5,60000	38,9000	38,1	10,35
16	16	1	1	7,41000	38,9000	37,6	13,97
17	17	-1	1	5,22514	36,8000	26,4	8,9
18	18	-1	1	7,78486	36,8000	35,2	13,81
19	19	-1	1	6,50500	33,8302	36,3	11,62
20	20	-1	1	6,50500	39,7698	39,1	12,1
21	21	0	1	6,50500	36,8000	37,2	12,04
22	22	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,15
23	23	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,09
24	24	0	1	6,50500	36,8000	37,6	12,05
25	25	1	1	5,60000	34,7000	34,2	10,09
26	26	1	1	7,41000	34,7000	36,4	13,62
27	27	1	1	5,60000	38,9000	37,1	10,18
28	28	1	1	7,41000	38,9000	36,9	14,15
29	29	-1	1	5,22514	36,8000	26,9	8,89

30	30	-1	1	7,78486	36,8000	35,4	13,53
31	31	-1	1	6,50500	33,8302	37,1	11,65
32	32	-1	1	6,50500	39,7698	38,6	12,15
33	33	0	1	6,50500	36,8000	37,5	11,95
34	34	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,13
35	35	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,17
36	36	0	1	6,50500	36,8000	37,5	12,05
37	37	1	1	5,60000	34,7000	33,8	9,96
38	38	1	1	7,41000	34,7000	35,5	13,82
39	39	1	1	5,60000	38,9000	36,9	10,23
40	40	1	1	7,41000	38,9000	36,9	13,9
41	41	-1	1	5,22514	36,8000	26,2	8,87
42	42	-1	1	7,78486	36,8000	35,6	14,01
43	43	-1	1	6,50500	33,8302	36,5	11,78
44	44	-1	1	6,50500	39,7698	38,2	11,96
45	45	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,1
46	46	0	1	6,50500	36,8000	37,3	11,99
47	47	0	1	6,50500	36,8000	37,5	12,04
48	48	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,08
49	49	1	1	5,60000	34,7000	33,3	9,85
50	50	1	1	7,41000	34,7000	36,4	13,77
51	51	1	1	5,60000	38,9000	36,9	10,14
52	52	1	1	7,41000	38,9000	36,9	14,06
53	53	-1	1	5,22514	36,8000	23,5	8,4
54	54	-1	1	7,78486	36,8000	35,2	14
55	55	-1	1	6,50500	33,8302	35,2	11,62
56	56	-1	1	6,50500	39,7698	38,4	11,86
57	57	0	1	6,50500	36,8000	37,2	12,12
58	58	0	1	6,50500	36,8000	37,4	12,15
59	59	0	1	6,50500	36,8000	37,5	12,05
60	60	0	1	6,50500	36,8000	37,6	12,09

Fuente: Autores

El diseño es de composición central con 4 puntos al centro. Existe un total de $n = 60$ corridas.

3.4 Modelo por respuesta (HUMBERTO, 2008)

Antes de poder ejecutar el proceso de optimización de múltiples respuestas, se debe construir un modelo matemático para cada variable de respuesta (potencia y consumo).

3.4.1 Modelo para la variable de respuesta: potencia

En la figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos bajo análisis de varianza para la potencia. Se demuestra que no todos los términos son significativos. De acuerdo con el valor-p, el término de adelanto al encendido al cuadrado y el término de la interacción del tiempo de inyección y el adelanto al encendido no contribuye a la respuesta (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	5	526,222	105,244	34,89	0,000	
Linear	2	191,950	95,975	31,81	0,000	
TI	1	158,447	158,447	52,52	0,000	
AE	1	33,503	33,503	11,11	0,002	
Square	2	328,112	164,056	54,38	0,000	
TI*TI	1	284,411	284,411	94,28	0,000	
AE*AE	1	9,636	9,636	3,19	0,080	
2-Way Interaction	1	6,161	6,161	2,04	0,159	
TI*AE	1	6,161	6,161	2,04	0,159	
Error	54	162,907	3,017			
Lack-of-Fit	3	144,549	48,183	133,86	0,000	
Pure Error	51	18,357	0,360			
Total	59	689,129				

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
1,73689	76,36%	74,17%	69,14%	

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		37,435	0,388	96,39	0,000	
TI	3,981	1,990	0,275	7,25	0,000	1,00
AE	1,830	0,915	0,275	3,33	0,002	1,00
TI*TI	-5,962	-2,981	0,307	-9,71	0,000	1,04
AE*AE	1,098	0,549	0,307	1,79	0,080	1,04
TI*AE	-1,110	-0,555	0,388	-1,43	0,159	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$POT = -48 + 60,30 TI - 6,82 AE - 3,640 TI*TI + 0,1244 AE*AE - 0,292 TI*AE$$

Figura 3.2. Análisis de varianza con diseño central compuesto de la potencia con todos los términos.

A partir de este análisis, y eliminando los términos no significativos, se obtiene el siguiente modelo cuadrático para la potencia:

$$POT = -152,2 + 51,30 TI + 0,436 AE - 3,77 TI^2 \quad (3.2)$$

Donde:

POT, potencia del motor de combustión interna (KW).

TI, tiempo de inyección (ms).

AE, adelanto al encendido (°).

En la figura 3.3 se detalla el análisis de varianza de la potencia aislando los términos no significativos para el modelo (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	3	510,43	170,142	53,32	0,000	
Linear	2	191,95	95,975	30,08	0,000	
TI	1	158,45	158,447	49,65	0,000	
AE	1	33,50	33,503	10,50	0,002	
Square	1	318,48	318,476	99,80	0,000	
TI*TI	1	318,48	318,476	99,80	0,000	
Error	56	178,70	3,191			
Lack-of-Fit	5	160,35	32,069	89,09	0,000	
Pure Error	51	18,36	0,360			
Total	59	689,13				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,78637	74,07%	72,68%	68,59%

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		37,874	0,309	122,41	0,000	
TI	3,981	1,990	0,282	7,05	0,000	1,00
AE	1,830	0,915	0,282	3,24	0,002	1,00
TI*TI	-6,182	-3,091	0,309	-9,99	0,000	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$POT = -152,2 + 51,30 TI + 0,436 AE - 3,774 TI*TI$$

Figura 3.3. Análisis de varianza con diseño central compuesto de la potencia con términos significativos.

3.4.2 Modelo para la variable respuesta, consumo

En la figura 3.4 se muestran los resultados obtenidos bajo análisis de varianza para el consumo. Se demuestra que no todos los términos son significativos. De acuerdo con el valor-p, el término de adelanto al encendido al cuadrado, el término de la interacción del tiempo de inyección y el adelanto al encendido no contribuye a la respuesta (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	5	136,900	27,380	586,08	0,000	
Linear	2	134,264	67,132	1437,00	0,000	
TI	1	133,826	133,826	2864,63	0,000	
AE	1	0,438	0,438	9,37	0,003	
Square	2	2,610	1,305	27,94	0,000	
TI*TI	1	2,597	2,597	55,59	0,000	
AE*AE	1	0,044	0,044	0,93	0,339	
2-Way Interaction	1	0,025	0,025	0,54	0,466	
TI*AE	1	0,025	0,025	0,54	0,466	
Error	54	2,523	0,047			
Lack-of-Fit	3	1,590	0,530	29,00	0,000	
Pure Error	51	0,932	0,018			
Total	59	139,422				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,216141	98,19%	98,02%	97,65%

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		12,1035	0,0483	250,43	0,000	
TI	3,6582	1,8291	0,0342	53,52	0,000	1,00
AE	0,2092	0,1046	0,0342	3,06	0,003	1,00
TI*TI	-0,5697	-0,2849	0,0382	-7,46	0,000	1,04
AE*AE	-0,0738	-0,0369	0,0382	-0,97	0,339	1,04
TI*AE	0,0710	0,0355	0,0483	0,73	0,466	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$CONS = -24,4 + 5,86 TI + 0,544 AE - 0,3478 TI*TI - 0,00836 AE*AE + 0,0187 TI*AE$$

Figura 3.4. Análisis de varianza con diseño central compuesto del consumo con todos los términos.

A partir de este análisis, y eliminando los términos no significativos, se obtiene el siguiente modelo cuadrático para el consumo:

$$CONS = -17,24 + 6,429 TI + 0,0498 AE - 0,3388 TI^2 \quad (3.3)$$

Donde:

CONS, consumo del motor de combustión interna (*lt/h*).

TI, tiempo de inyección (ms).

AE, adelanto al encendido (°).

En la figura 3.5 se detalla el análisis de varianza del consumo aislando los términos no significativos para el modelo (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	136,831	45,610	985,63	0,000
Linear	2	134,264	67,132	1450,71	0,000
TI	1	133,826	133,826	2891,95	0,000
AE	1	0,438	0,438	9,46	0,003
Square	1	2,567	2,567	55,47	0,000
TI*TI	1	2,567	2,567	55,47	0,000
Error	56	2,591	0,046		
Lack-of-Fit	5	1,659	0,332	18,15	0,000
Pure Error	51	0,932	0,018		
Total	59	139,422			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,215117	98,14%	98,04%	97,77%

Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		12,0740	0,0373	324,05	0,000
TI	3,6582	1,8291	0,0340	53,78	0,000
AE	0,2092	0,1046	0,0340	3,08	0,003
TI*TI	-0,5550	-0,2775	0,0373	-7,45	0,000

Regression Equation in Uncoded Units

$$CONS = -17,24 + 6,429 TI + 0,0498 AE - 0,3388 TI*TI$$

Figura 3.5. Análisis de varianza con diseño central compuesto del consumo con términos significativos.

3.5 Verificación de los supuestos, validación del modelo cuadrático (Draper, 1990)

La validez de los resultados queda supeditada a los supuestos de: normalidad, varianza constante e independencia. Al utilizar la muestra de residuos se comprueba los supuestos del modelo planteado.

▪ Potencia

En la gráfica 3.6 representa la gráfica de: *normalidad*, a través de la cual se observa que los residuos tienden a estar alineados en una línea recta, por lo tanto se concluye que no hay violación a este supuesto. En cuanto a la *varianza constante*, los puntos se distribuyen de manera aleatoria y no muestra ninguna anomalía por lo cual se cumple satisfactoriamente con el supuesto. En relación a la *independencia*, no se detecta una tendencia en los puntos, por lo que se concluye que no existe problema con la declaración de independencia para la potencia (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

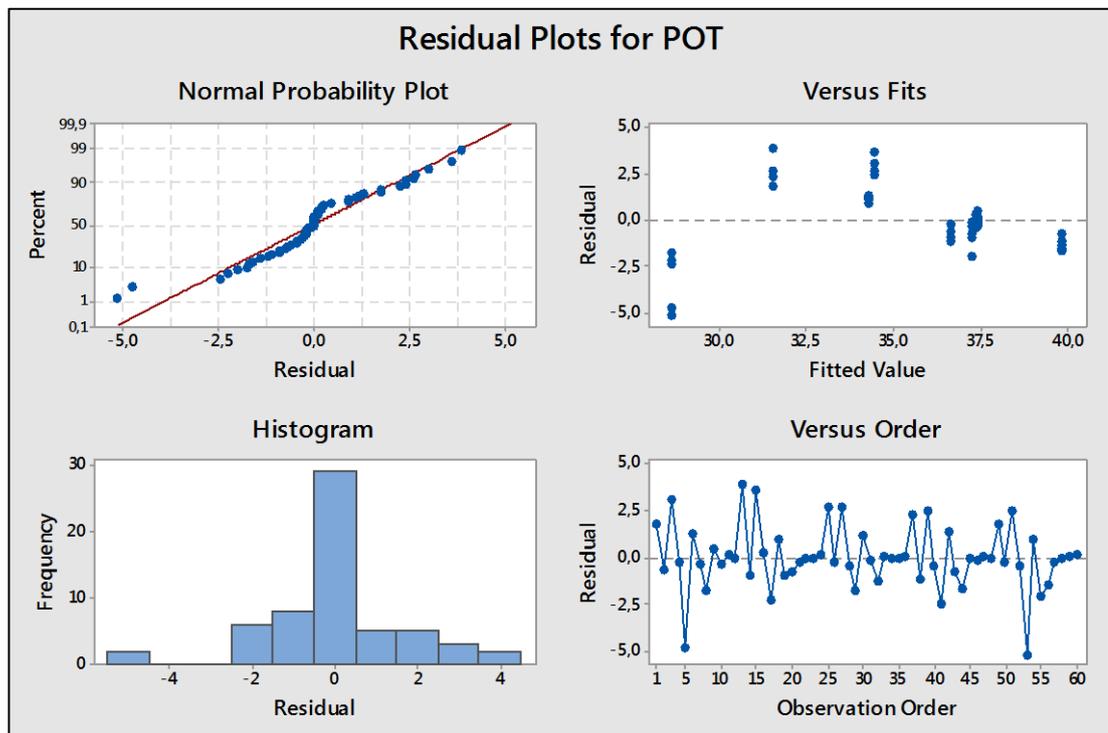


Figura 3.6. Gráfica de verificación de supuestos para la potencia.

▪ Consumo

En la gráfica 3.7 representa la gráfica de: *normalidad*, a través de la cual se observa que los residuos tienden a estar alineados en una línea recta por lo tanto se concluye que no hay violación al este supuesto. En cuanto a la *varianza constante*, los puntos se distribuyen de manera aleatoria y no muestra ninguna anomalía, por lo cual se cumple satisfactoriamente con el supuesto. En relación a la *independencia*, no se detecta una tendencia en los puntos, por lo que se concluye que no existe problema con la declaración de independencia para el consumo (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

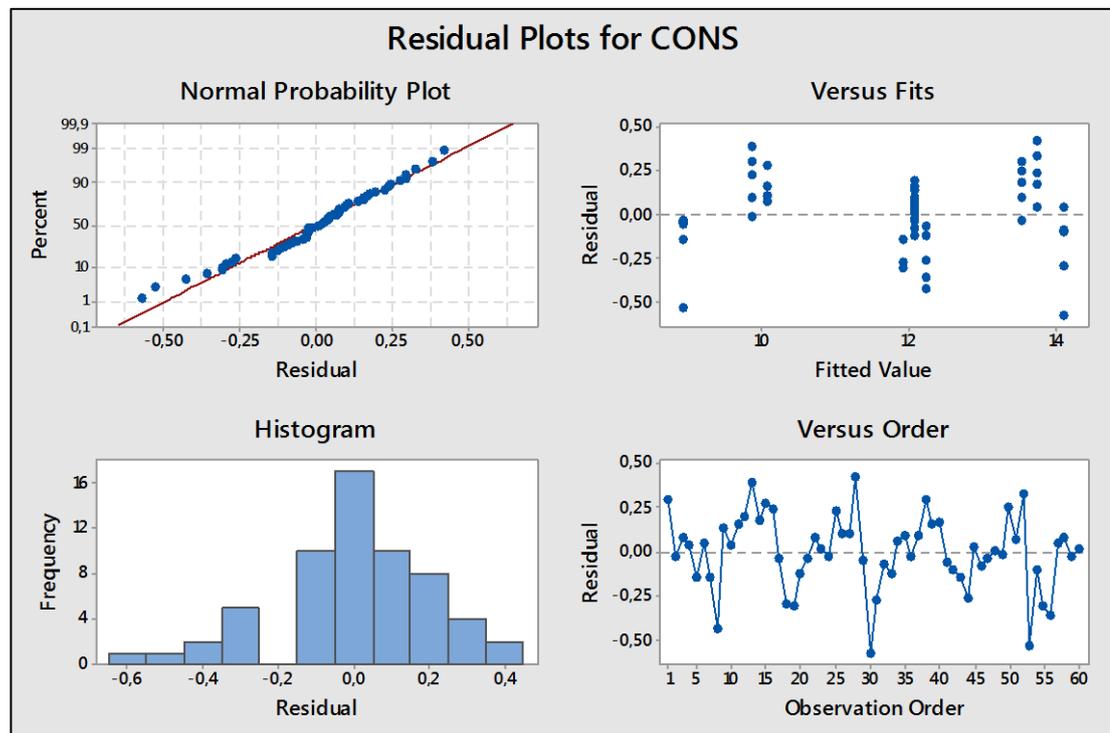


Figura 3.7. Gráfica de verificación de supuestos para el consumo.

3.6 Optimización de las respuestas por separado (Khuri, 1987)

En el capítulo anterior se encontró el mejor tratamiento o combinación de niveles de los factores estudiados. En los diseños factoriales completos el mejor tratamiento es el “tratamiento ganador”, desde el punto de vista estadístico, de entre todos los que se probaron en el estudio. En cambio la optimización de cada una de las respuestas implica que es la mejor combinación posible en toda la región de operatividad.

En la figura 3.8 se muestra la diferencia entre el punto óptimo y el mejor tratamiento. Si se supone que las curvas de nivel o isolíneas representan el verdadero comportamiento de la respuesta, el cual tiene un punto óptimo localizado en el centro de la elipse más pequeña, que por cierto esta fuera de la región experimental actual. La superficie representada en la figura 3.8 se puede imaginar como una montaña y la región experimental se ubica a un costado de la cima; cada curva de nivel representa puntos sobre la montaña que tiene la misma altura.

Es razonable que el tratamiento ganador sea el punto experimental más cercano al verdadero punto óptimo, sobre todo si el experimento inicial tiene una buena región experimental.

Fuente: Autores.

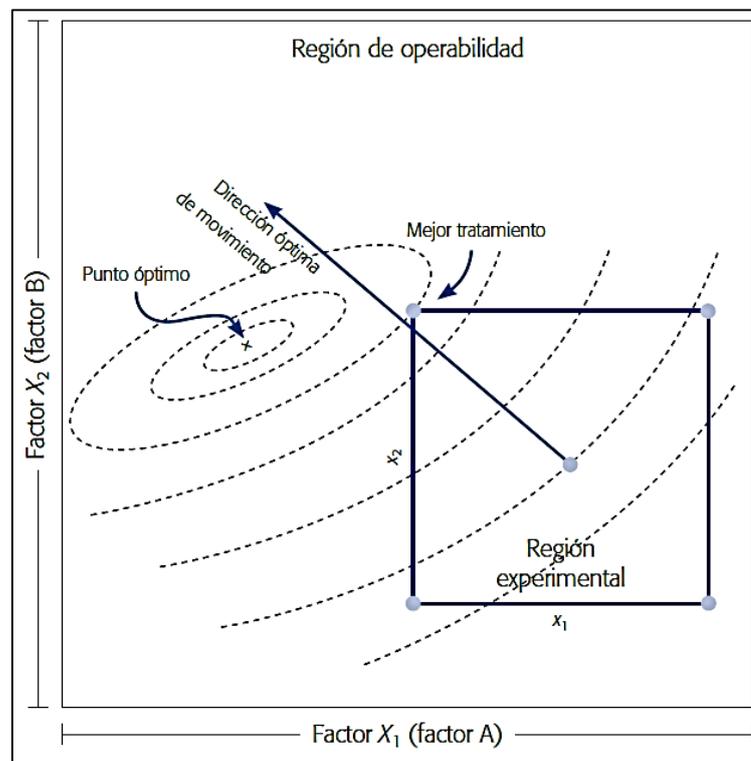


Figura 3.8. Mejor tratamiento y punto óptimo.

Una vez que los modelos son construidos para cada respuesta, se puede analizar el diseño y optimizar repuestas por separado. La acción es maximizar, para la potencia, y minimizar, para el consumo.

- **Potencia**

La optimización individual de la variable de salida *potencia* se obtiene a partir de la optimización de la superficie de respuesta tendiendo al máximo. Sus valores de configuración se muestra en la figura 3.9 (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

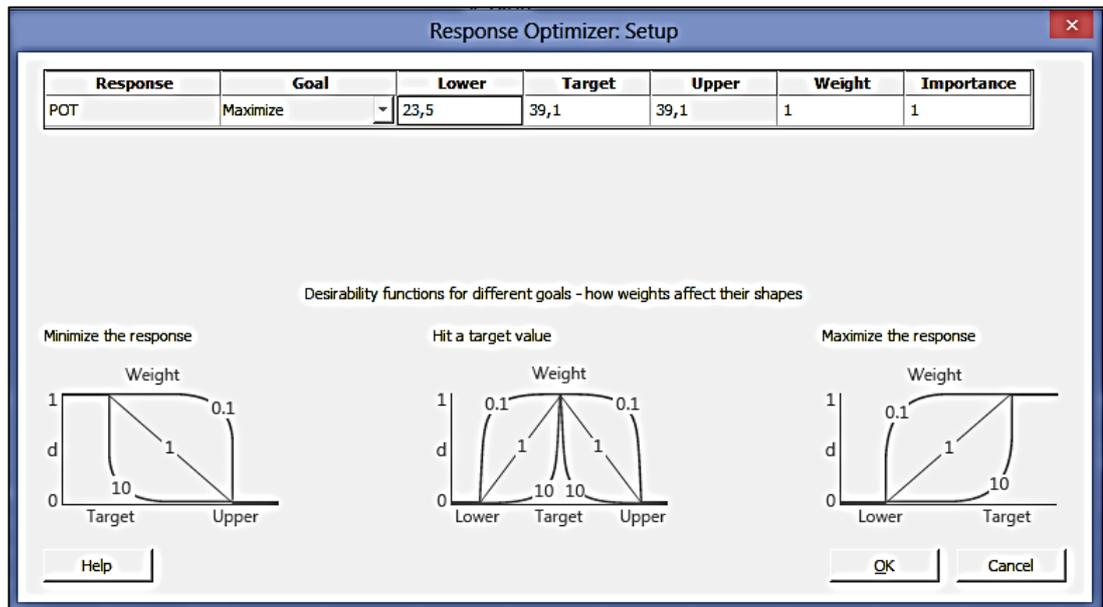


Figura 3.9. Configuración para la maximización de la potencia.

En la figura 3.10 se observa los valores de optimización para la variable de salida *potencia*. La misma refleja los siguientes valores para las variables de entrada: tiempo de inyección 6,80 ms, y para el adelanto al encendido 39,76°.

La figura 3.11 detalla la superficie de respuesta de la variable potencia en función del tiempo de inyección y el adelanto al encendido en tres dimensiones. Si se analiza la figura 3.11, cuando la variable independiente tiempo de inyección aumenta la variable dependiente potencia toma la forma de una parábola, tomando su valor máximo en 6,80 ms de tiempo de inyección. Cuando la variable independiente de adelanto al encendido aumenta, la variable dependiente *potencia* cambia de forma lineal, tomando su valor máximo en 39,76° de adelanto al encendido.

Fuente: Autores.

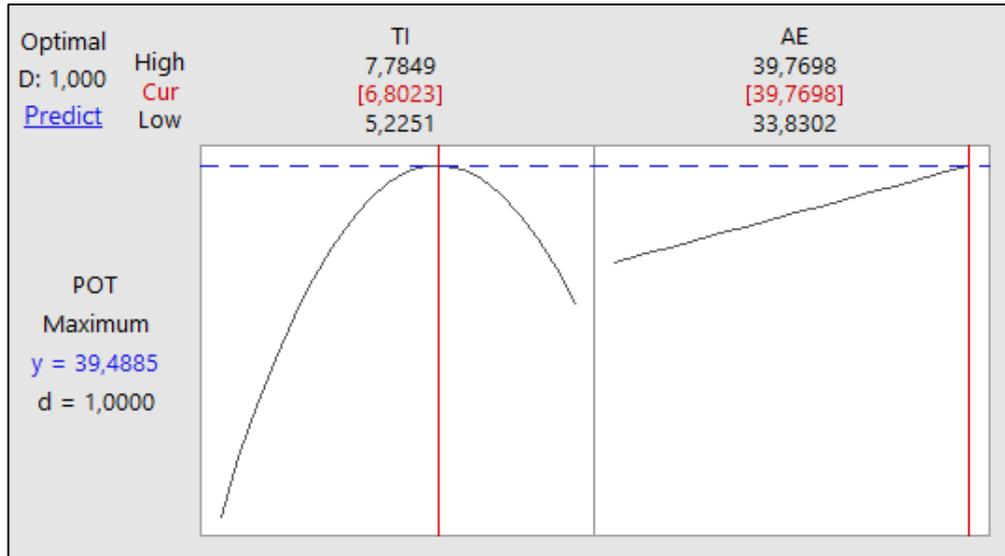


Figura 3.10. Valores de las variables independientes para la optimización de la potencia.

Fuente: Autores.

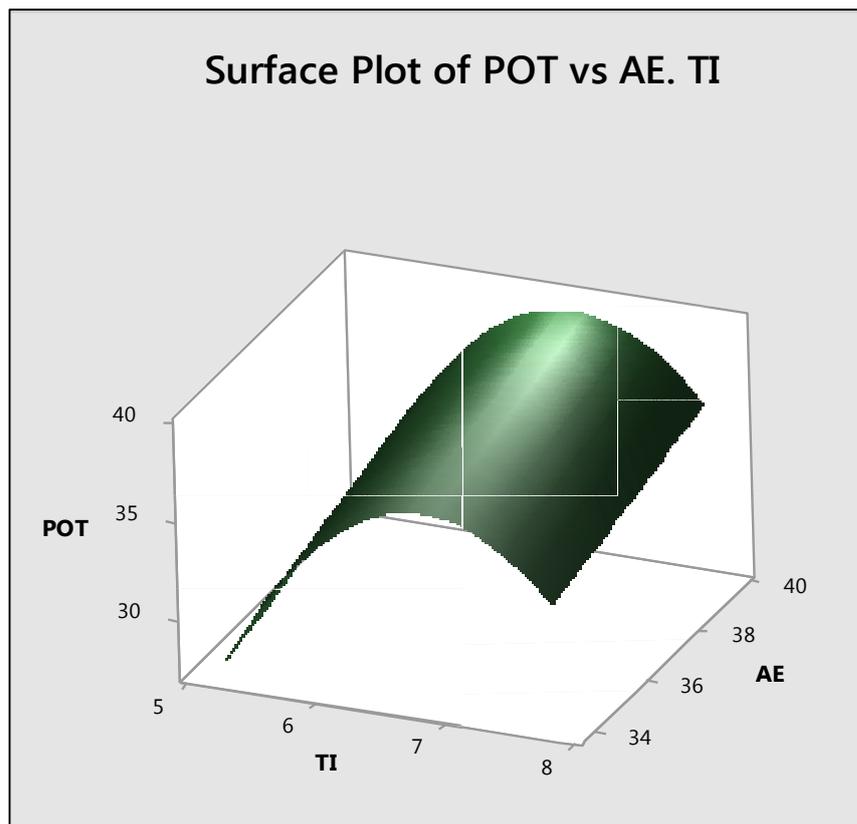


Figura 3.11. Superficie de respuesta de la potencia en tres dimensiones.

En la figura 3.12 se detalla el contorno de la variable dependiente potencia en función de las variables independientes: tiempo de inyección y adelanto al encendido. La figura detalla la zona en donde se maximiza la variable potencia a través de colores (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

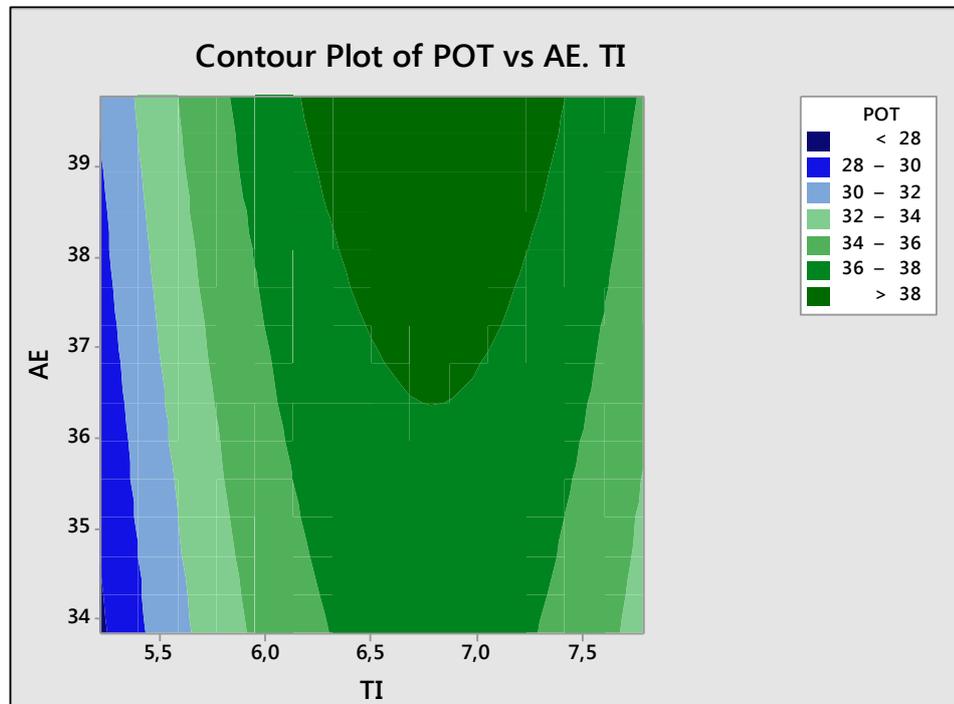


Figura 3.12. Contorno de la variable dependiente potencia.

Finalmente, en la figura 3.13 se muestran los parámetros de optimización de la variable potencia, la cual predice una potencia máxima de ajuste de 39,488 Kw (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Response Optimization: POT						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
POT	Maximum	23,5	39,1		1	1
Solution						
Solution	TI	AE	POT Fit	Composite Desirability		
1	6,80234	39,7698	39,4885	1		

Figura 3.13. Parámetros de optimización de la variable dependiente potencia.

- **Consumo**

La optimización individual de la variable de salida *consumo* se obtiene a partir de la optimización de la superficie de repuesta tendiendo al mínimo. Sus valores de configuración se muestra en la figura 3.14 (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

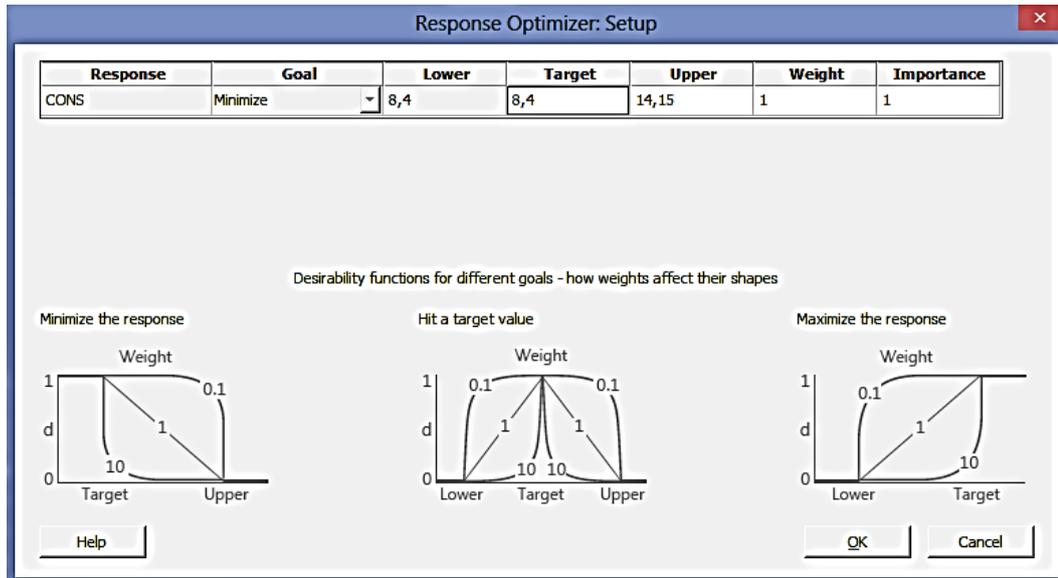


Figura 3.14. Configuración para la minimización del consumo.

En la figura 3.15 se observan los valores optimización para la variable de salida *consumo*. La misma refleja los siguientes valores para las variables de entrada: tiempo de inyección 5,22 ms, y para el adelanto al encendido 33,83°.

Fuente: Autores.

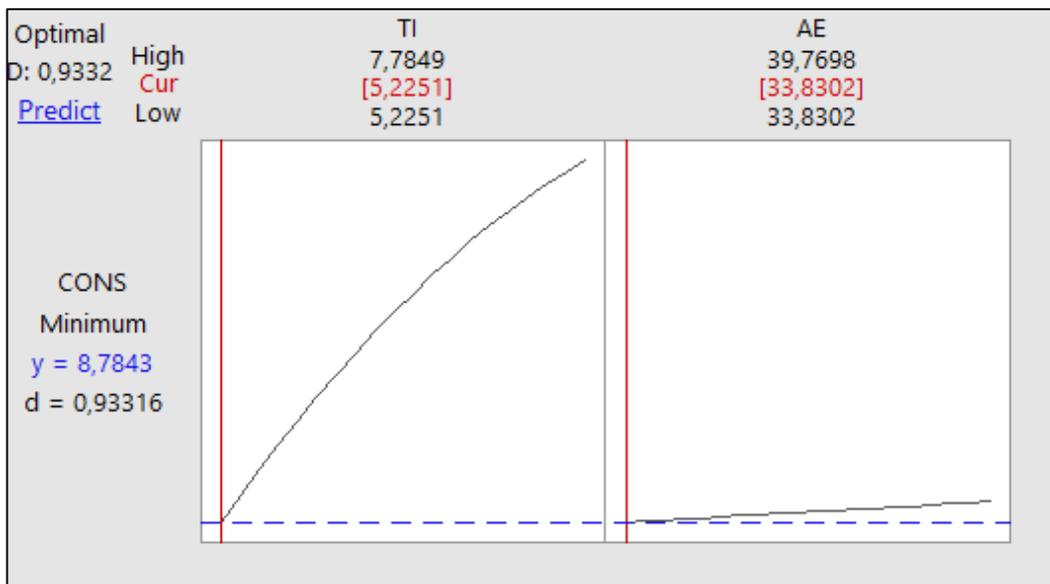


Figura 3.15. Valores de las variables independientes para la optimización del consumo.

En la figura 3.16, se detalla la superficie de respuesta de consumo, en función del tiempo de inyección y el adelanto al encendido en tres dimensiones. Si se analiza la figura 3.16, cuando la variable independiente tiempo de inyección aumenta, la variable dependiente consumo toma la forma de una parábola, recogiendo su valor mínimo en 5,22 ms . Cuando la variable independiente de adelanto al encendido aumenta la variable dependiente consumo cambia de forma lineal, tomando su valor mínimo en 33,83° de adelanto al encendido (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

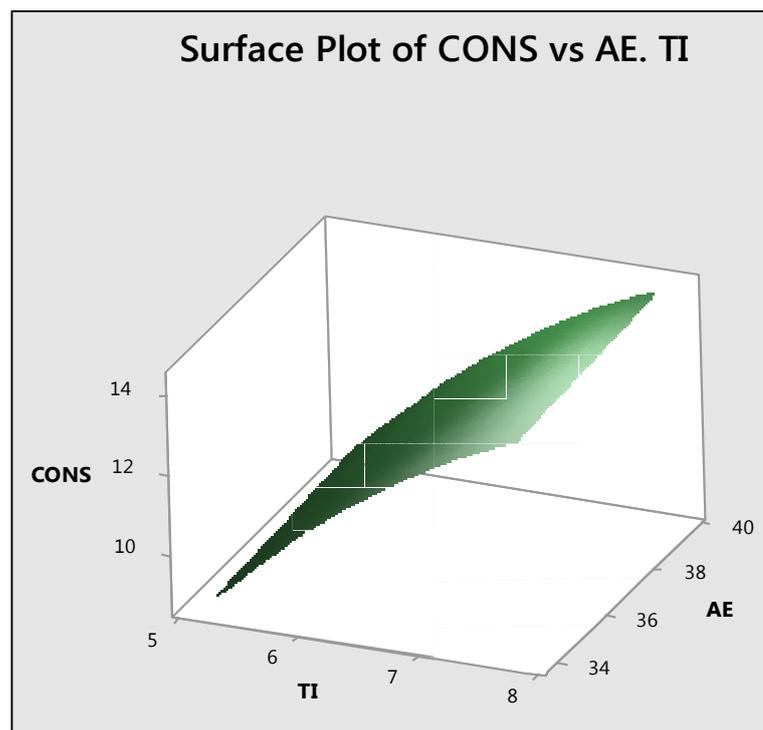


Figura 3.16. Superficie de respuesta del consumo en tres dimensiones.

En la figura 3.17 se detalla el contorno de la variable dependiente consumo, en función de las variables independientes: tiempo de inyección y adelanto al encendido. La figura detalla la zona en donde se minimiza la variable consumo a través de colores (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

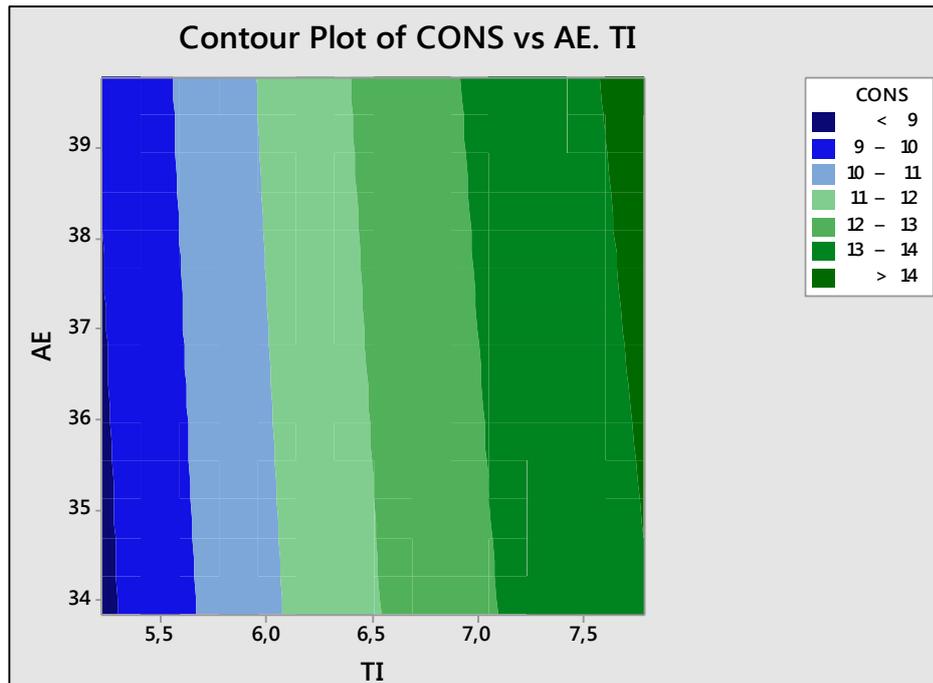


Figura 3.17. Contorno de la variable dependiente consumo.

Finalmente, en la figura 3.18 se muestran los parámetros de optimización de la variable consumo, la cual predice un consumo mínimo de ajuste de 8,784 *lt/h* (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Response Optimization: CONS						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
CONS	Minimum		8,4	14,15	1	1
Solution						
Solution	TI	AE	CONS Fit	Composite Desirability		
1	5,22514	33,8302	8,78431	0,933163		

Figura 3.18. Parámetros de optimización de la variable dependiente consumo.

3.7 Optimización simultanea de las respuestas (Derringer, 1980)

El objetivo fundamental de este trabajo de grado consiste en encontrar la combinación óptima de dos factores de ingreso: tiempo de inyección y adelanto al encendido del motor, considerando de manera simultánea dos variables de respuesta de interés, cuyos nombres y especificaciones son:

$Pot > 36 Kw$, Potencia del motor de combustión interna

$10 \text{ lt/h} < Cons < 11 \text{ lt/h}$; Consumo del motor de combustión interna

Si bien, la primera variable no tiene límite de especificación superior, es de tipo entre más grande mejor. Por su parte, la variable de salida consumo toma el valor mínimo como valor objetivo. Para buscar la optimización, a través de la metodología de superficie de respuesta, (figura 3.19) de estas dos variables de respuesta se configuran los parámetros de potencia y consumo

Fuente: Autores.

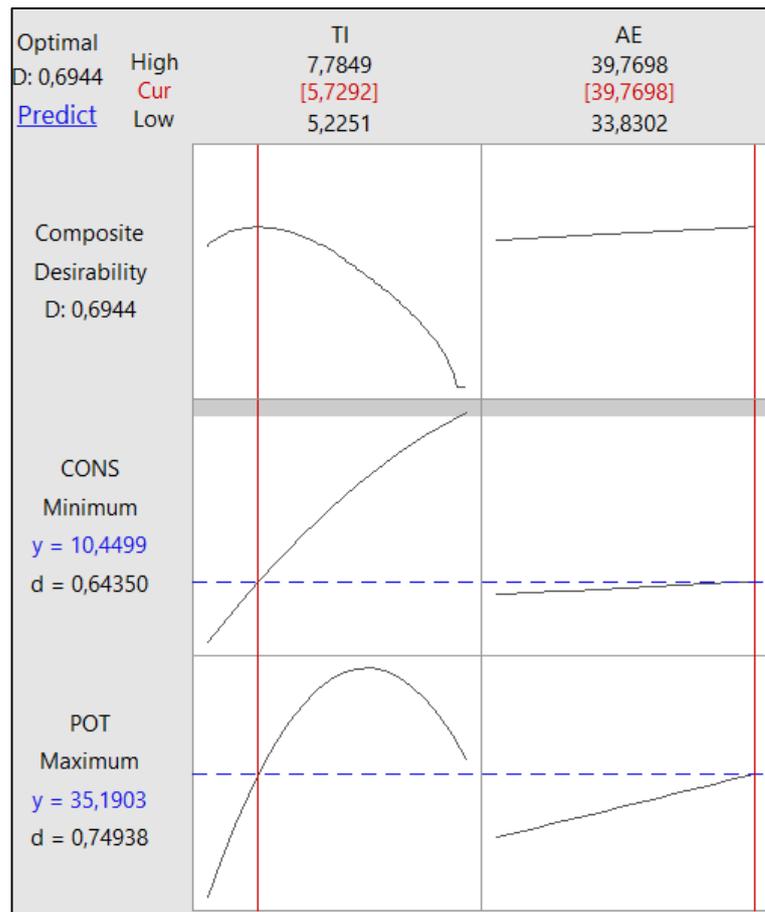


Figura 3.19. Parámetros de optimización simultanea para las variables de salida.

En la figura 3.20 se muestran los parámetros de optimización simultánea de las variables de respuesta, los cuales predicen una potencia máxima de ajuste de 35,1903 Kw y un consumo mínimo de ajuste de 10,499 lt/h (Minitab Inc, 2016).

Fuente: Autores.

Response Optimization: CONS. POT						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
CONS	Minimum		8,4	14,15	1	1
POT	Maximum	23,5	39,1		1	1
Solution						
Solution	TI	AE	CONS Fit	POT Fit	Composite Desirability	
1	5,72915	39,7698	10,4499	35,1903	0,694423	

Figura 3.20. Optimización de respuesta de la potencia y el consumo.

En la figura 3.21 se muestra la reprogramación del tiempo de inyección definida en la Unidad de Control Electrónica con los valores establecidos por la optimización simultánea.

En la figura 3.22 se aprecia el mapa cartográfico en tres dimensiones del tiempo de inyección definida en la Unidad de Control Electrónica con los valores establecidos por la optimización simultánea.

En la figura 3.23 se muestra la reprogramación del adelanto al encendido definido en la Unidad de Control Electrónica con los valores establecidos por la optimización simultánea.

En la figura 3.24 se aprecia el mapa cartográfico en tres dimensiones del adelanto al encendido definido en la Unidad de Control Electrónica con los valores establecidos por la optimización simultánea.

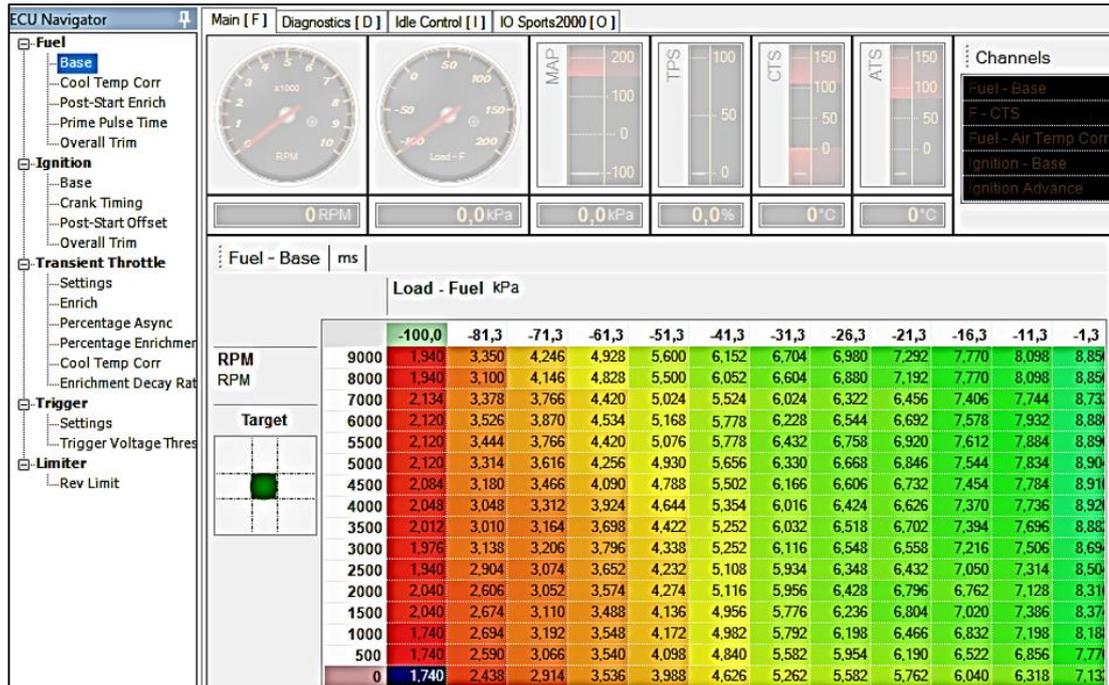


Figura 3.21. Reprogramación del tiempo de inyección para la optimización simultánea.

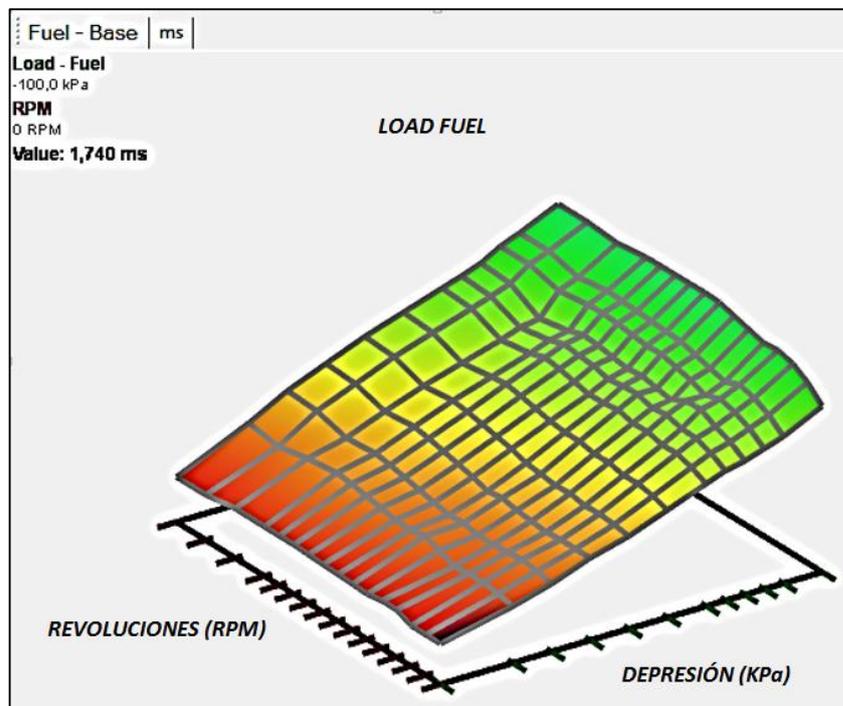


Figura 3.22. Mapa cartográfico del tiempo de inyección para la optimización simultánea.

Fuente: Autores.

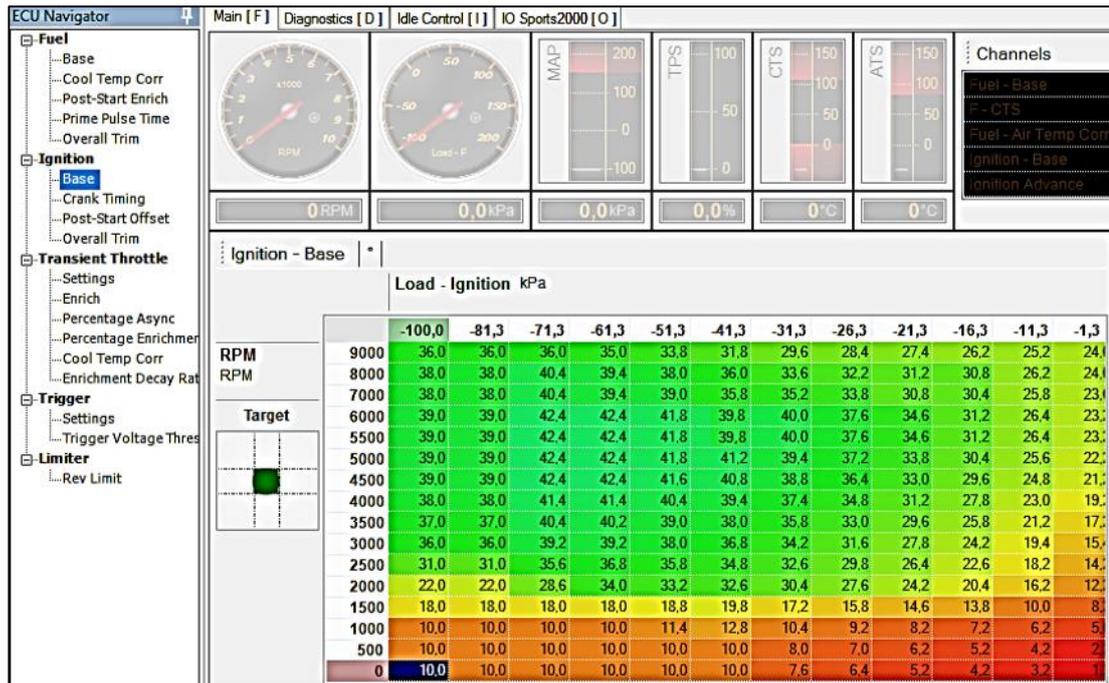


Figura 3.23. Reprogramación del adelanto al encendido para la optimización simultánea.

Fuente: Autores.

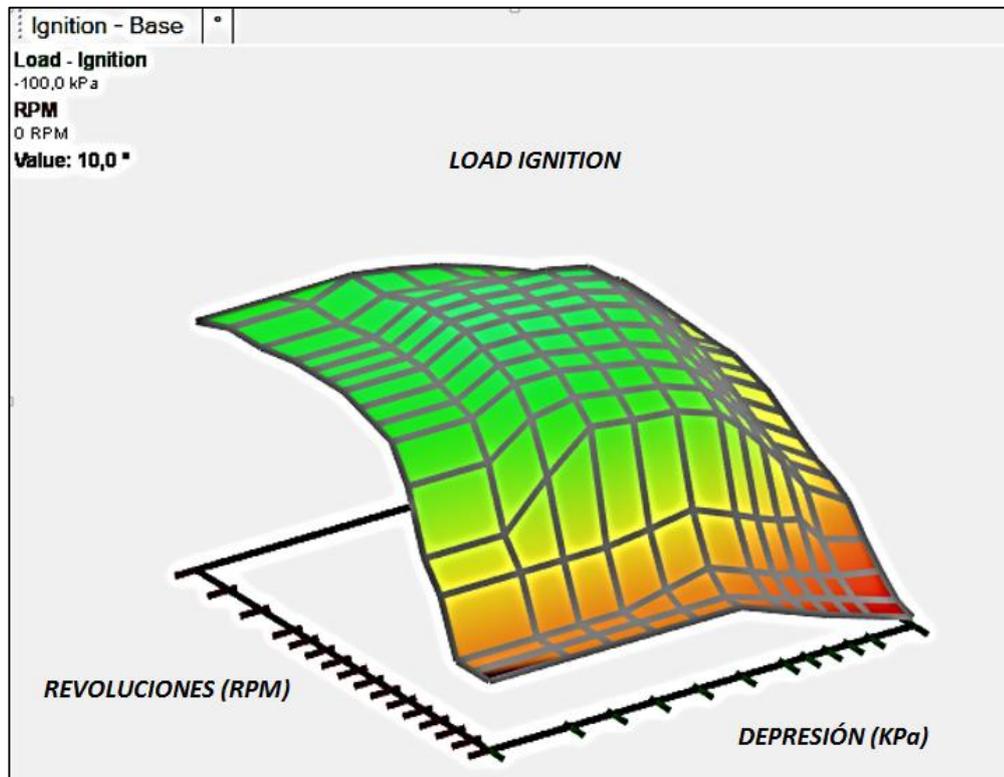


Figura 3.24. Mapa cartográfico del adelanto al encendido para la optimización simultánea.

Los datos de potencia optimizada son medidos en el banco dinamométrico. El interfaz del banco⁷ calcula la potencia real a través de gráficas (figura 3.25), obteniendo un valor promedio de 38,36 Kw. (Anexo A-3).

Fuente: Autores.

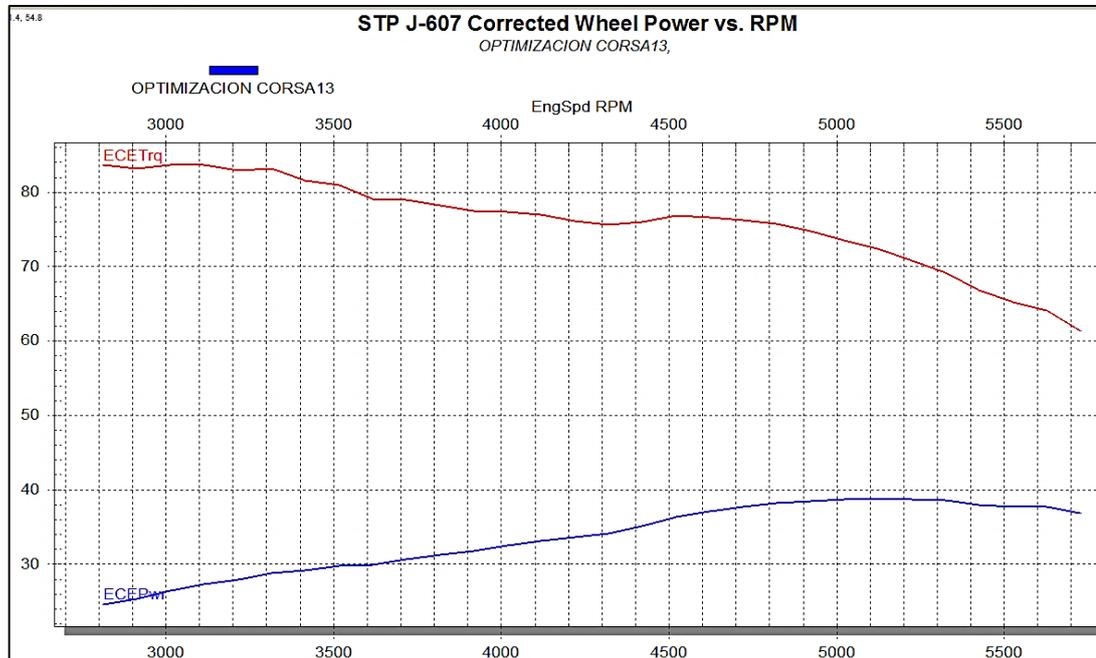


Figura 3.25. Curva de potencia y torque del motor con optimización simultánea.

Los valores de consumo de combustible optimizado se obtienen del equipo AIC Fuel Flow Master 5004⁸ conjuntamente con el banco dinamométrico (Figura 3.26). El valor promedio de consumo de combustible optimizado es de 10,84 lt/h. (Anexo A-4).

⁷ SuperFlow Windyn Dynamometers & Flowbenches

⁸ Durchflussmessgerät Aic - 5004 Fuel Flow Master

Fuente: Autores.

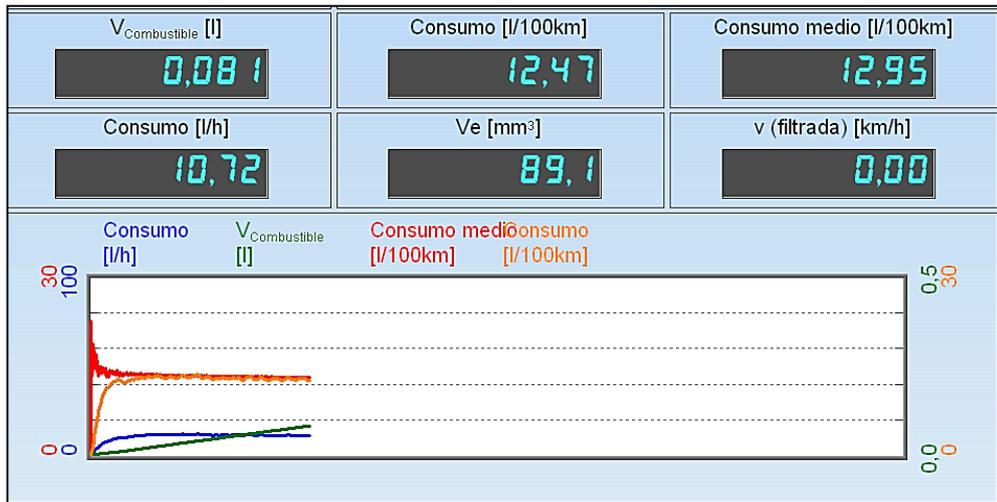


Figura 3.26. Curva de consumo del motor con optimización simultánea.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

- Las estrategias de control tales como: controles PID, controles adaptativos, y controles inteligentes, son utilizados por las casas manufactureras de motores para la optimización del rendimiento del mismo, a través de la variación de parámetros en la cartografía de la Unidad Electrónica. Estas estrategias de control permiten que el proceso de optimización de los factores de salida del motor sea efectuada de manera autónoma, en pocos minutos, con la mínima intervención de técnicos y cumpliendo con todas las normativas técnicas vigentes para su expendio; por lo tanto, de esta manera se reduce considerablemente el trabajo de calibración y verificación de los motores fabricados.
- Los fabricantes de vehículos dejan un margen en la gestión electrónica del motor para luego desarrollar una versión nueva de su modelo con el mismo motor. Teniendo presente que lo anterior no es lo más esperado de los fabricantes, en este trabajo investigativo se propone una solución que consiste en la modificación de los mapas cartográficos, que son obtenidos de diferentes potencias y consumos con el mismo motor de combustión interna, siempre y cuando mecánicamente el motor lo permita.
- La Unidad de Control Electrónica es un controlador que tiene como objetivo administrar el funcionamiento del motor de combustión interna, de tal manera que al modificar los factores de entrada, tiempo de inyección y adelanto al encendido, se puedan obtener diferentes condiciones de funcionamiento en las variables de salida como el aumento de la potencia y la minimización del consumo. La aplicación de esta modificación sobre la Unidad de Control Electrónica, para obtener los beneficios antes mencionados, se puede efectuar a través de una metodología basada en “diseños experimentales factoriales” y “superficies de respuesta”, con el objeto de extraer un modelo matemático de los factores de salida de motor en función de las variables de entrada del mismo, y de esta manera definir claramente el comportamiento del motor de combustión interna para su posterior optimización.

- Al aplicar “diseños experimentales” y “superficies de respuesta” se verificó que para el incremento del factor de salida: potencia, es necesario una maximización de la variable de entrada: adelanto al encendido, sin modificación del valor estándar de la variable de entrada: tiempo de inyección. Tanto así, que un incremento de la variable de entrada: tiempo de inyección, provoca un efecto contraproducente sobre el factor de salida: potencia del motor. Además se verificó que para minimizar el factor de salida del motor: consumo de combustible, es necesario una disminución directa de la variable de entrada: tiempo de inyección. El efecto sobre la variable de salida: consumo de combustible, es directamente proporcional a la manipulación del tiempo de inyección.
- Se demuestra que es posible optimizar simultáneamente los factores de salida del motor: potencia y consumo de combustible, aplicando estrategias experimentales y superficies de respuesta. Tras la investigación, se obtuvo un incremento de la potencia promedio del motor de: $38,36 \text{ Kw}$ y una disminución del consumo de combustible: $10,84 \text{ lt/h}$, con lo cual se concluye que el factor de salida: potencia, aumentó en un $2,39 \%$, comparado con el estándar, y el factor de salida: consumo de combustible, disminuyó en un $12,12 \%$, comparado con el estándar.

COLOFÓN:

Al finalizar este trabajo de grado se concluye que: a través de la modificación de los parámetros de entrada de los mapas cartográficos de la Unidad de Control Electrónica del vehículo, basado en “diseños experimentales” y “superficies de respuesta”, es posible optimizar el rendimiento de un motor, debidamente validado y comprobado su comportamiento en un banco de rodillos, fundamentado en modelos matemáticos. Es decir, mediante la implementación de la metodología propuesta se puede lograr un mayor rendimiento del motor con menores costos posibles.

Trabajos futuros

Es preciso señalar que el diseño del motor de combustión interna se encuentra influenciado electrónicamente por algunos parámetros de control, situación que, desde luego, dificulta las tareas de regulación y control asignadas a la Unidad de Control Electrónica. Por lo tanto, es posible generar estrategias de control sobre el motor de combustión interna basados en controles PID, controles adaptativos, y

controles inteligentes, que permitan un proceso de calibración y verificación de los motores de forma autónoma, con menor costo y en el menor tiempo posible. Además estos enfoques de calibración permitan ser aplicados en vehículos dotados con motores alimentados con cualquier tipo de combustible, sobrealimentados o no. Esta situación, facilitará a la vez el proceso de sincronización de una gran cantidad de parámetros de la Unidad de Control Electrónica, con el objeto de mejorar el rendimiento de un motor de manera rápida, cumpliendo con todas las normas técnicas vigentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Antony, J. (2003). *Desing of Experiments for Engineers and Scientists*. London: Elsevier Ltd.
- Automative Information & Control System, A. (2008). *Flowmeter*. Obtenido de <http://www.flowmeter-aic.com/products/aic-5004-fuelflow-master-700hp>
- Boes, J. (2012). Model-free Optimization of an Engine Control Unit thanks to Self-Adaptive Multi-Agent Systems. *Institut de Recherche en Informatique de Toulouse*, 1-5.
- De la Vara, R. y. (2002). *Métodos de superficie de Multirespuesta*.
- Deming, S. N. (1994). *Experimental desing: a chemometric approach*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Derringer, G. C. (1980). *Simultaneous optimization of several responses*. Journal of Quality Technology.
- Dietsche, M. K.-H. (2007). *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*.
- Draper, N. R. (1990). *Small Response-Surface Designs*. Technometrics.
- Erik Cobo, B. K. (2014). Intervalos de confianza. En U. P. Catalunya, *Bioestadística para no estadísticos*. España: Kindle.
- Feldbaum, A. A. (1961). *Automation Remote Control*.
- Festing, M. F. (1994). Experimental design and quality of experiments.
- Fowlkes, W. (1995). *Enginering Methods for Robust Product Desing*. New York: Addison - Wesley.
- GONZALEZ, A. S. (1981). *TECNOLOGÍA DE LA AUTOMOCIÓN*. ESPAÑA: EDEBE.
- GUTIERREZ PULIDO, H. (2012). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. MEXICO D.F.: McGRAW-HILL.
- HALTECH. (s.f.). *HALTECH*. Obtenido de <http://www.haltech.com/>
- Hinkelman K, K. (1994). *Desing and analysis of experiments*. New York: Jhon Wiley and Sons, Inc.

- HUMBERTO, G. P. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F.: McGraw-Hill.
- K. J. ANSTROM, H. P. (1998). *Desing of PI controllers based on No-Convex optimization*. Elsevier Science Ltd.
- Khuri, A. I. (1987). *Response surfaces: design and analyses*. New York: Marcel Dekker.
- Kuenhl, R. O. (2001). *Diseño de Experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. México: Thomson Editores S.A.
- Lewis, G. A. (1999). *Pharmaceutical Experimental Design*. 270 Madison Avenue, New York, NY 10016: Marcel Dekker, Inc.
- Lewis, G. A. (1999). *Pharmaceutical Experimental Desing*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Minitab Inc. (2016). *Minitab Statistical Software*. Obtenido de State Collage: <https://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/>
- Montgomery, D. C. (1996). *Probalidad y estadistica aplicadas a la ingeniería*. Mexico: McGraw-Hill.
- MONTGOMERY, D. C. (2004). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS*. MEXICO D.F.: LIMUSA S.A.
- Nikolaou, M. (2001). *Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs*.
- Noel, V. (2012). *Component-based Software Architectures and Multi-Agent Systems*.
- Rhyder, R. F. (1997). *Manufacturing Process Desing and Optimization*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Rubio, F. R. (1996). *CONTROL ADAPTATIVO Y ROBUSTO*. Sevilla: Imprenta A. Pinelo.
- SAE, I. (03 de 2004). *Engine Power Test Code—Spark Ignition and Compression Ignition*. Obtenido de http://standards.sae.org/j1349_201109/
- SAE, I. (01 de 2014). *Chassis Dynamometer Simulation of Road Load Using Coastdown Techniques*. Obtenido de http://standards.sae.org/j2264_201401/

Spiegel, L. J. (2009). Estadística. México. D.f.: Mc Graw-Hill.

Stotsky, A. A. (2009). *Automotive Control*. New York: Springer.

Sun, B. (2009). Parameter Optimization of an Engine Control Unit using Genetic Algorithms. *TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO-WILHELMINA ZU BRAUNSCHWEIG*, 1-22.

W. Spendley, G. R. (1992). *Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation*. Technometrics.

Wackerly, M. y. (2010). *ESTADISTICA MATEMÁTICA CON APLICACIONES* . MEXICO: Cengage Learning Editores S.A.

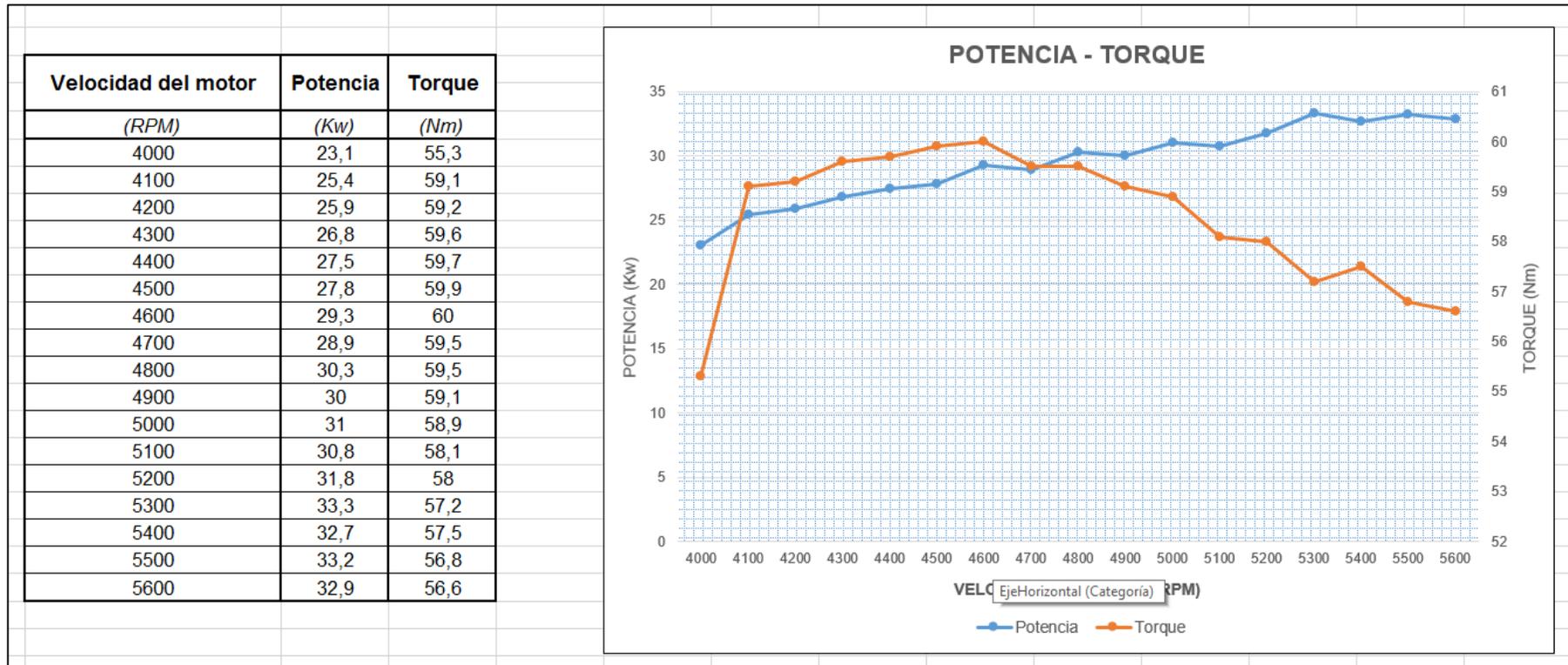
Zitzler., E. (1999). *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization*.

ANEXOS

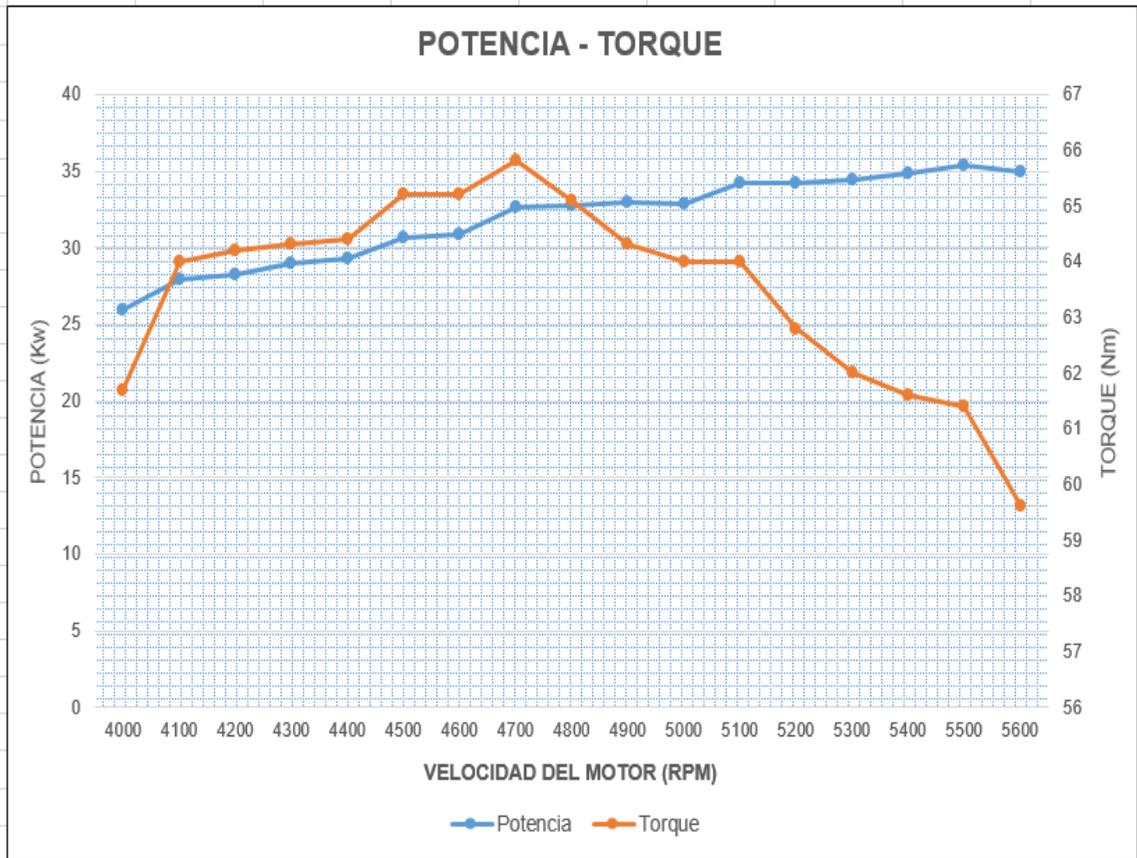
ANEXO A-1.

MUESTRAS DE POTENCIA DEL MOTOR

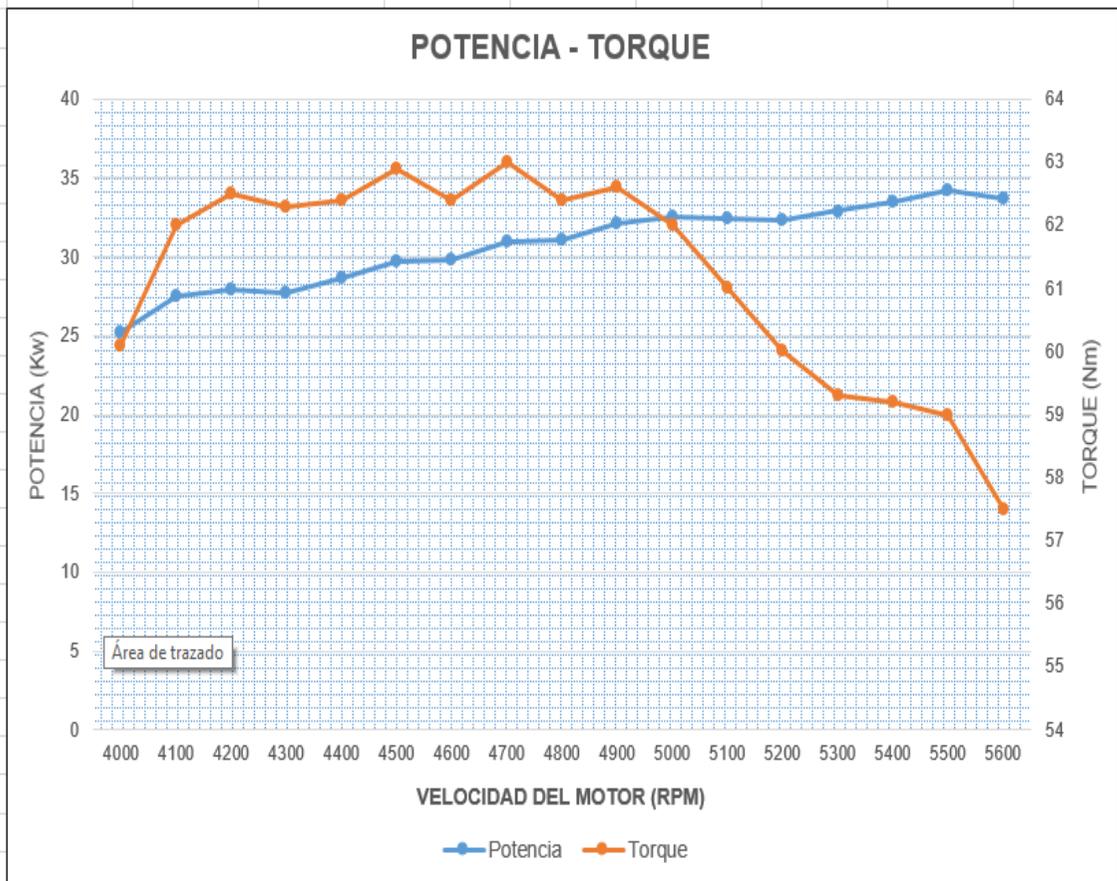
- Medición de la potencia con TI (5,60ms) AE (34,70°)



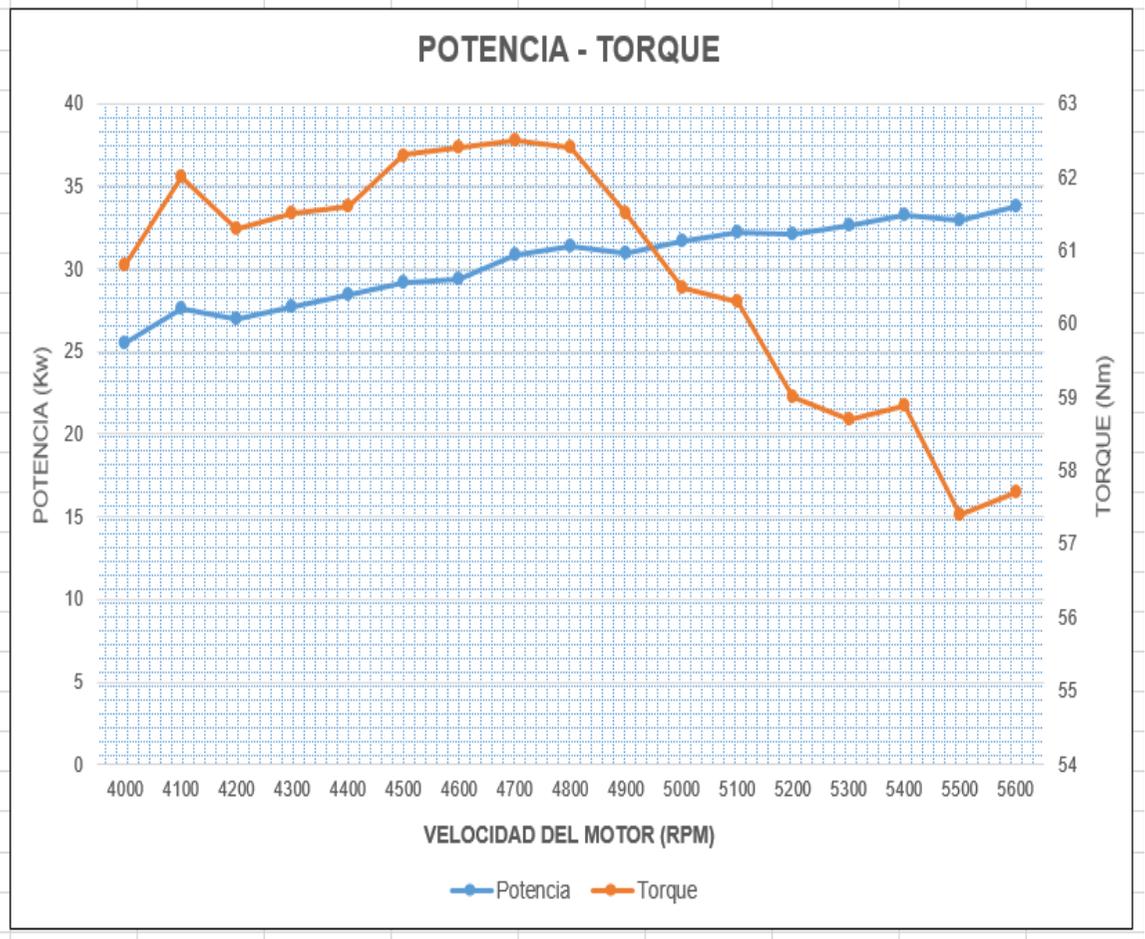
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	25,9	61,7
4100	27,9	64
4200	28,2	64,2
4300	29	64,3
4400	29,3	64,4
4500	30,7	65,2
4600	30,9	65,2
4700	32,6	65,8
4800	32,7	65,1
4900	33	64,3
5000	32,9	64
5100	34,2	64
5200	34,2	62,8
5300	34,4	62
5400	34,8	61,6
5500	35,4	61,4
5600	34,9	59,6



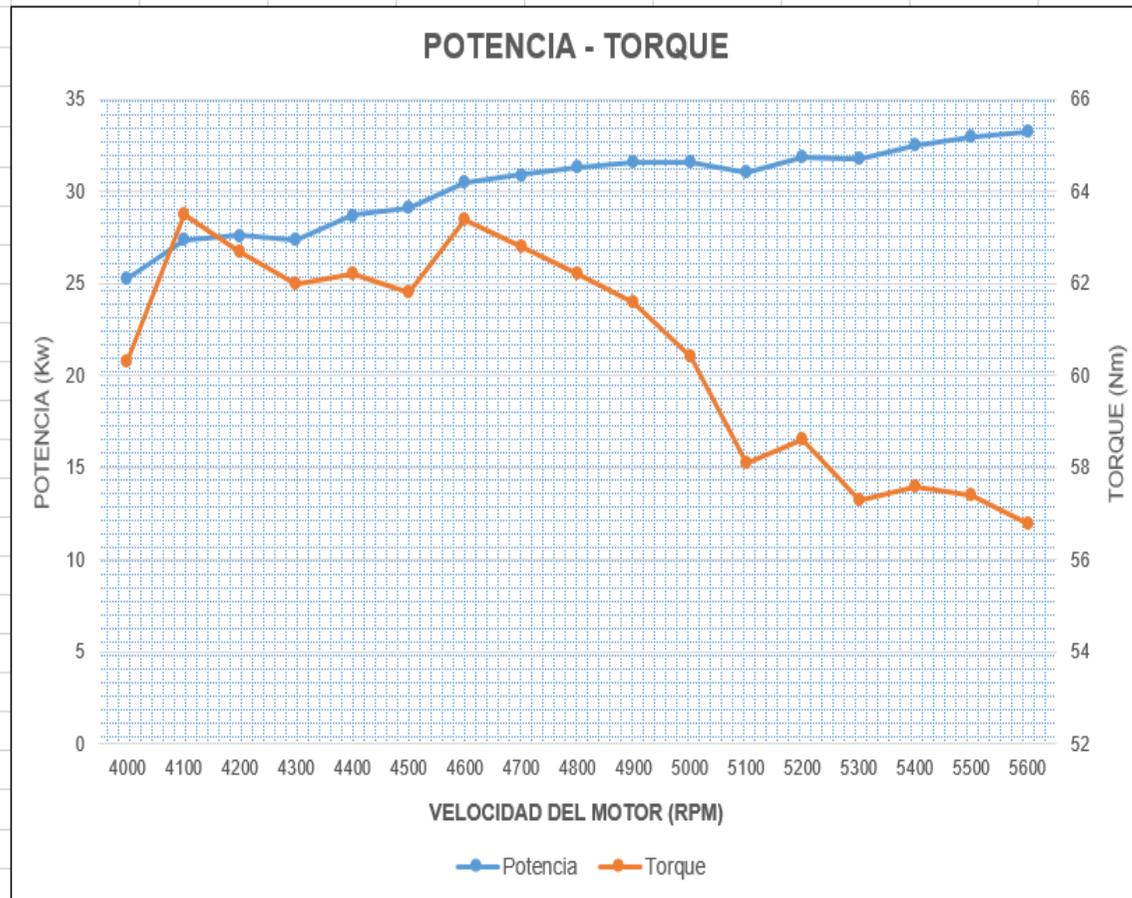
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	25,2	60,1
4100	27,5	62
4200	27,9	62,5
4300	27,7	62,3
4400	28,7	62,4
4500	29,7	62,9
4600	29,8	62,4
4700	31	63
4800	31,1	62,4
4900	32,1	62,6
5000	32,5	62
5100	32,4	61
5200	32,3	60
5300	32,9	59,3
5400	33,5	59,2
5500	34,2	59
5600	33,7	57,5



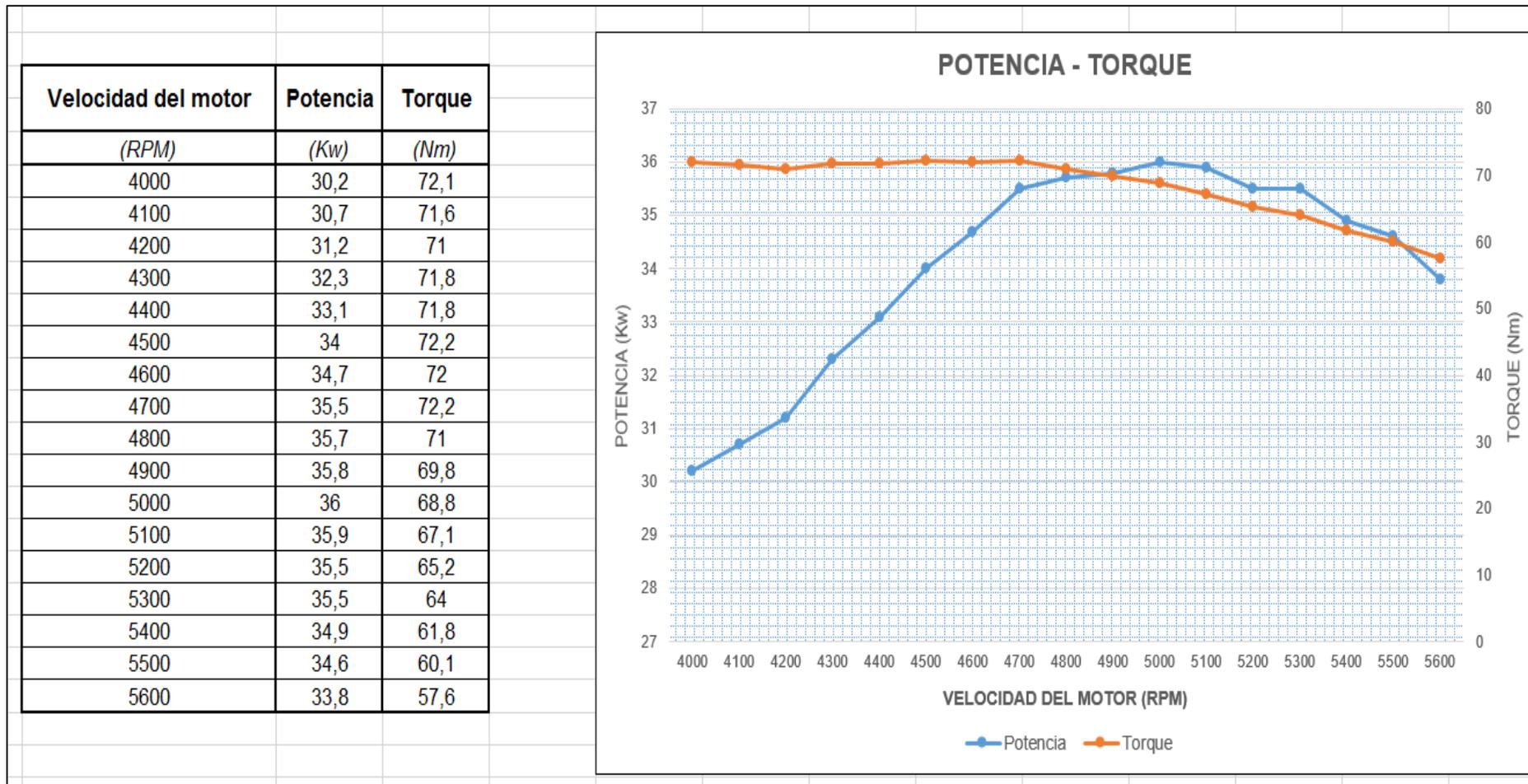
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	25,5	60,8
4100	27,6	62
4200	27	61,3
4300	27,7	61,5
4400	28,4	61,6
4500	29,2	62,3
4600	29,4	62,4
4700	30,9	62,5
4800	31,4	62,4
4900	31	61,5
5000	31,7	60,5
5100	32,2	60,3
5200	32,1	59
5300	32,6	58,7
5400	33,3	58,9
5500	33	57,4
5600	33,8	57,7



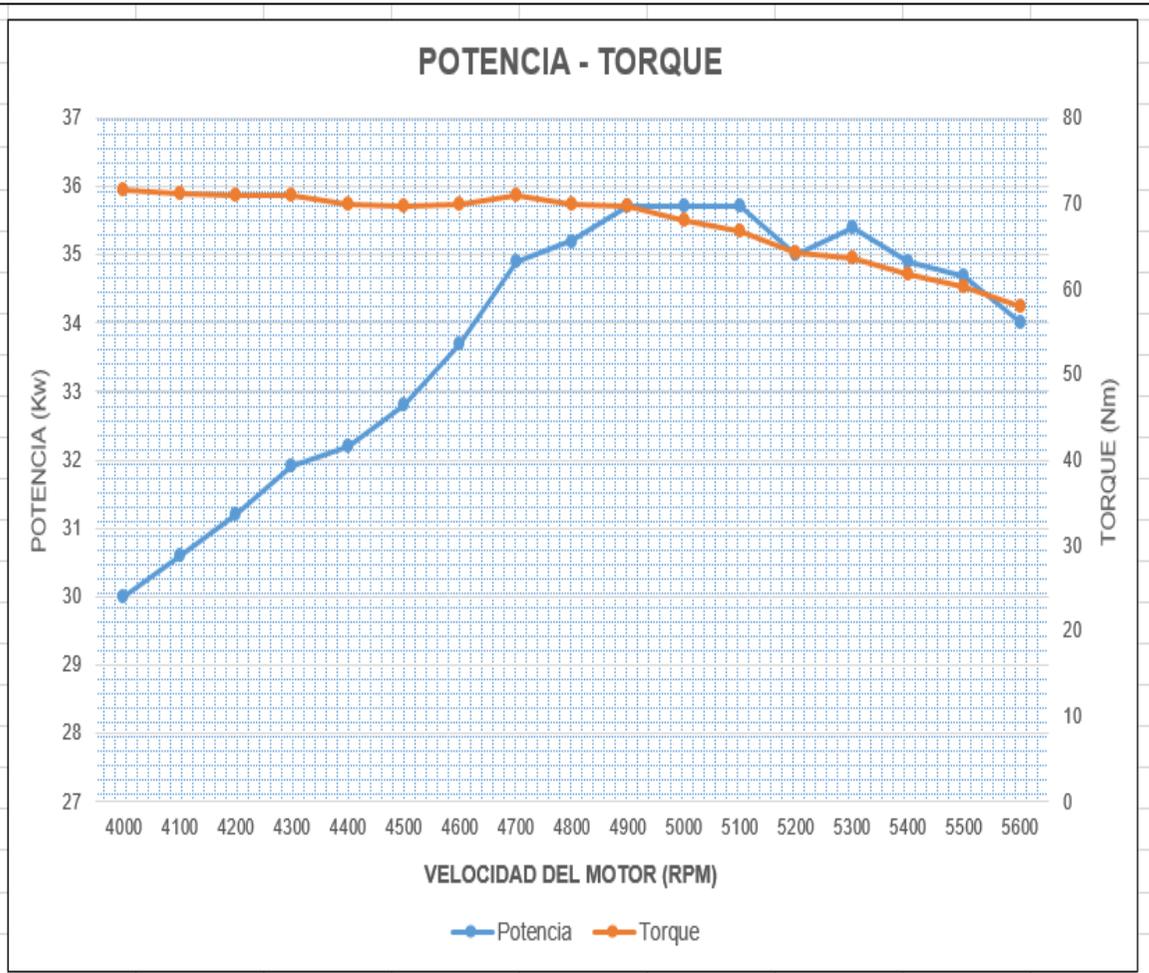
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	25,3	60,3
4100	27,4	63,5
4200	27,6	62,7
4300	27,4	62
4400	28,7	62,2
4500	29,1	61,8
4600	30,5	63,4
4700	30,9	62,8
4800	31,3	62,2
4900	31,6	61,6
5000	31,6	60,4
5100	31	58,1
5200	31,9	58,6
5300	31,8	57,3
5400	32,5	57,6
5500	33	57,4
5600	33,2	56,8



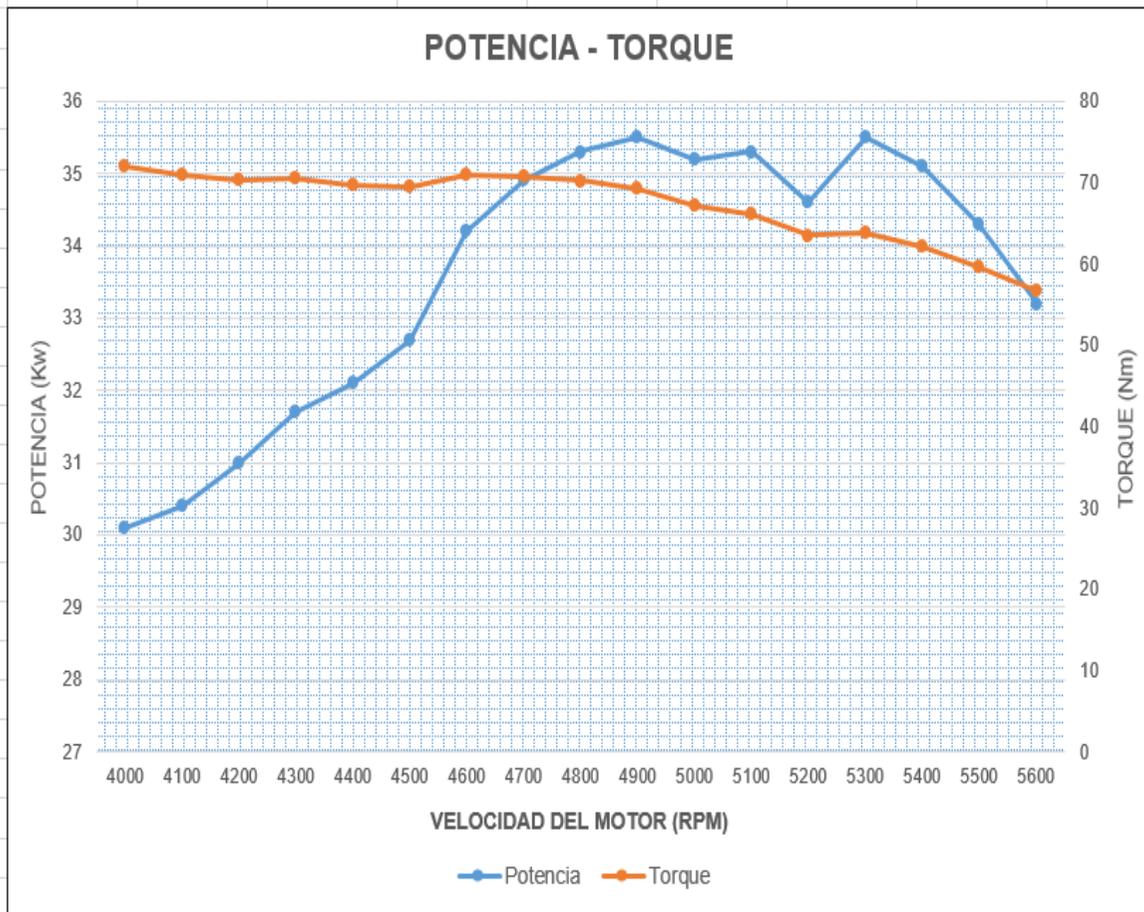
- Medición de la potencia con TI (7,41 ms) AE (34,70°)



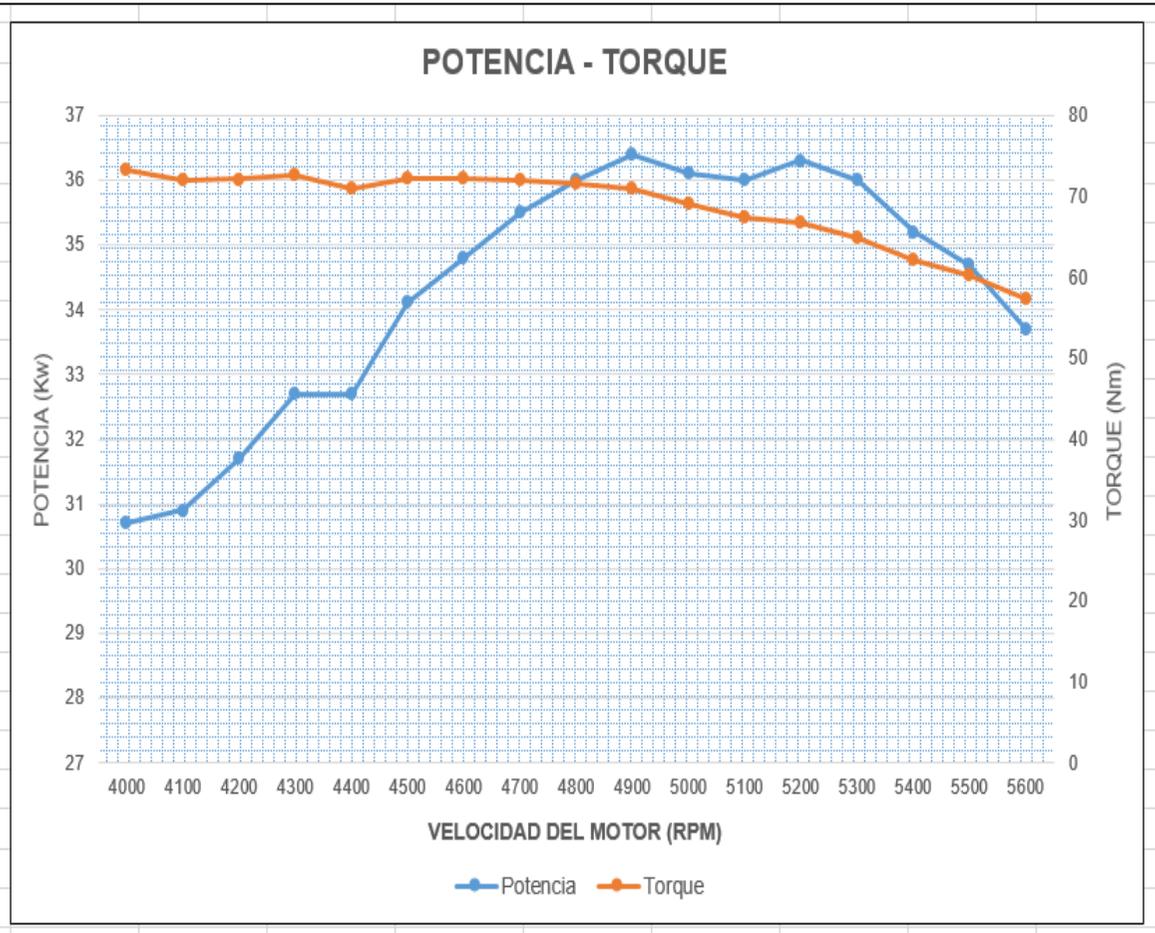
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30	71,6
4100	30,6	71,2
4200	31,2	70,9
4300	31,9	70,9
4400	32,2	69,9
4500	32,8	69,6
4600	33,7	69,9
4700	34,9	70,9
4800	35,2	70
4900	35,7	69,6
5000	35,7	68,1
5100	35,7	66,8
5200	35	64,3
5300	35,4	63,7
5400	34,9	61,7
5500	34,7	60,2
5600	34	58



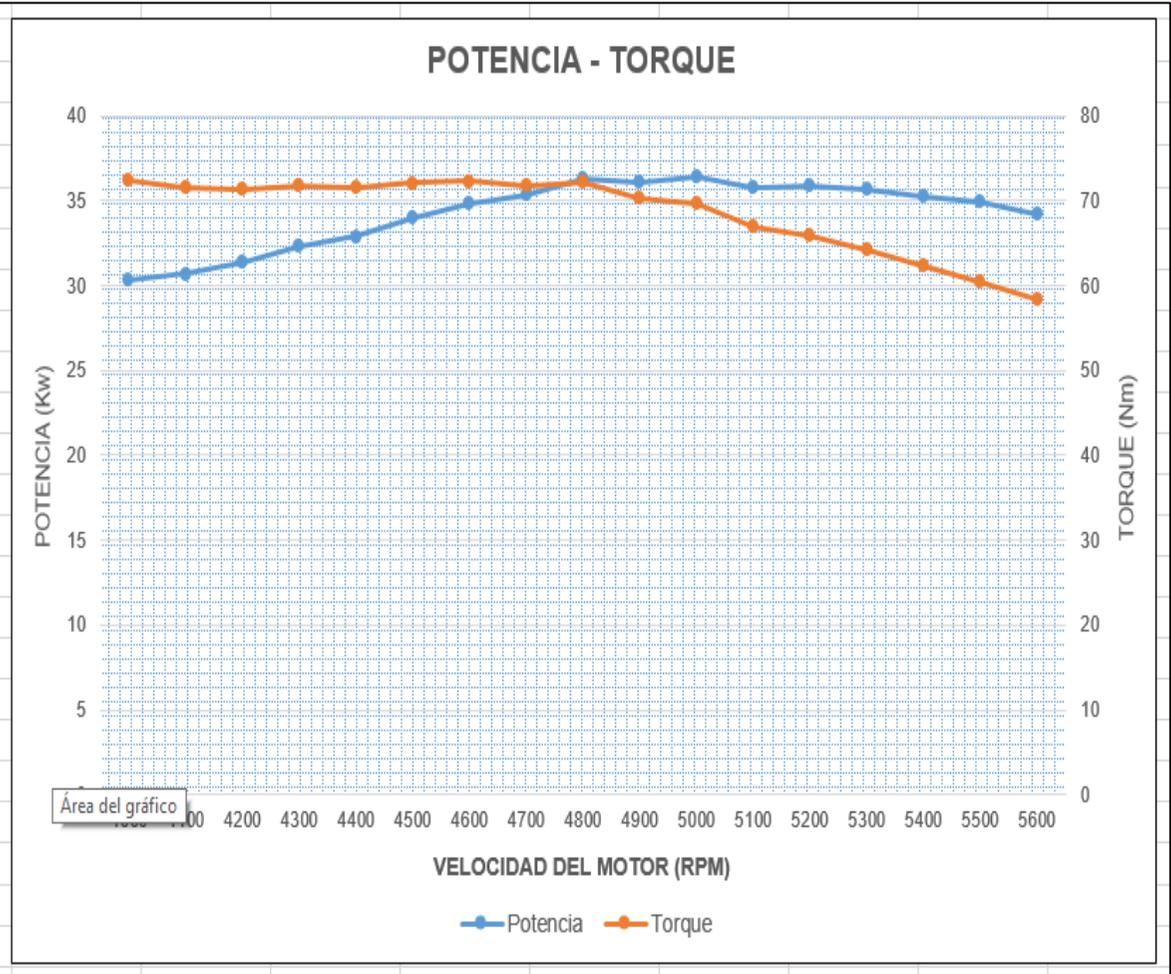
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,1	71,9
4100	30,4	70,9
4200	31	70,4
4300	31,7	70,5
4400	32,1	69,7
4500	32,7	69,4
4600	34,2	71
4700	34,9	70,8
4800	35,3	70,2
4900	35,5	69,2
5000	35,2	67,2
5100	35,3	66,2
5200	34,6	63,5
5300	35,5	63,9
5400	35,1	62,1
5500	34,3	59,6
5600	33,2	56,7



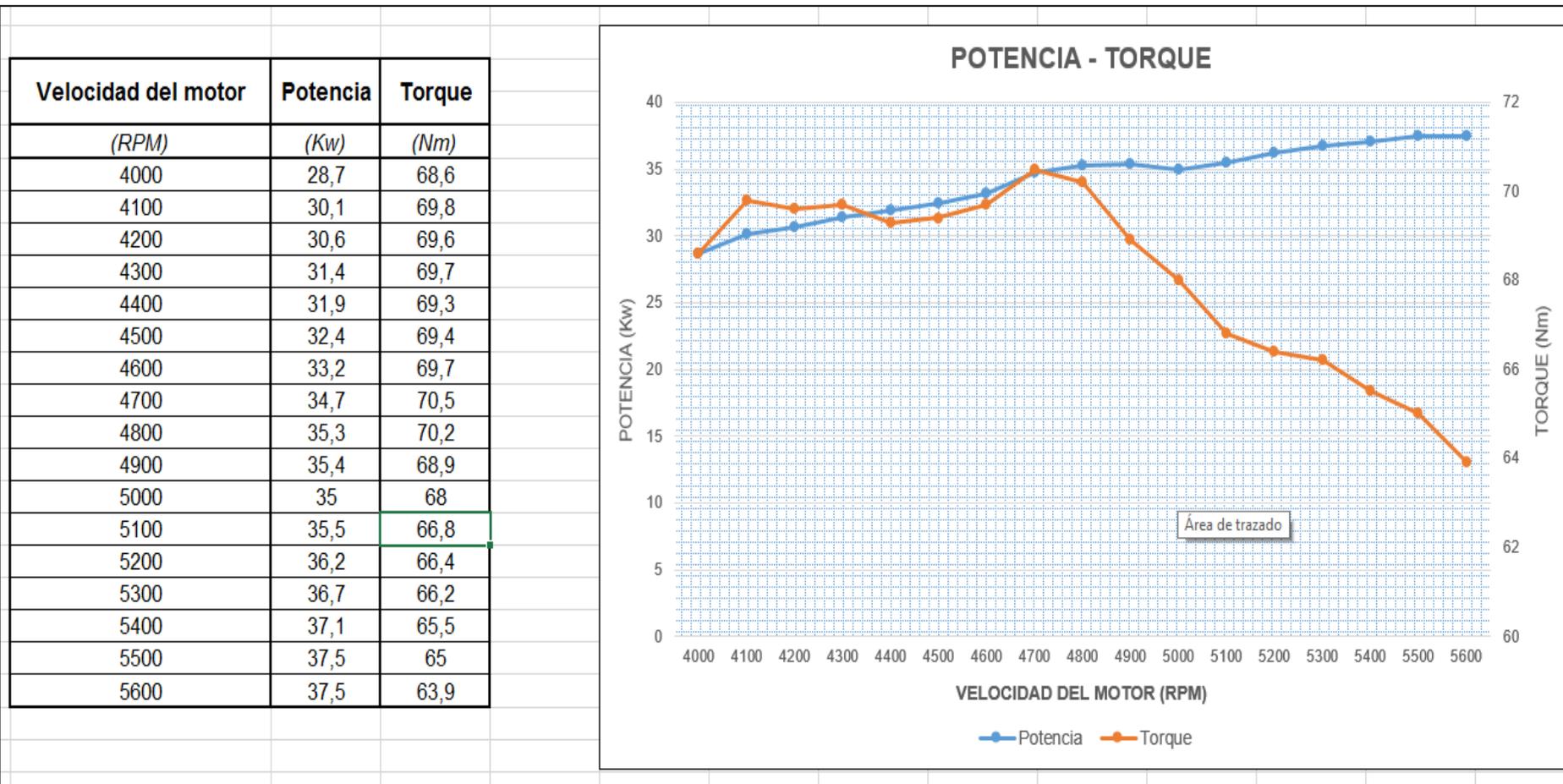
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,7	73,2
4100	30,9	72
4200	31,7	72,1
4300	32,7	72,7
4400	32,7	71
4500	34,1	72,3
4600	34,8	72,3
4700	35,5	72
4800	36	71,6
4900	36,4	71
5000	36,1	69
5100	36	67,4
5200	36,3	66,7
5300	36	64,9
5400	35,2	62,2
5500	34,7	60,3
5600	33,7	57,4



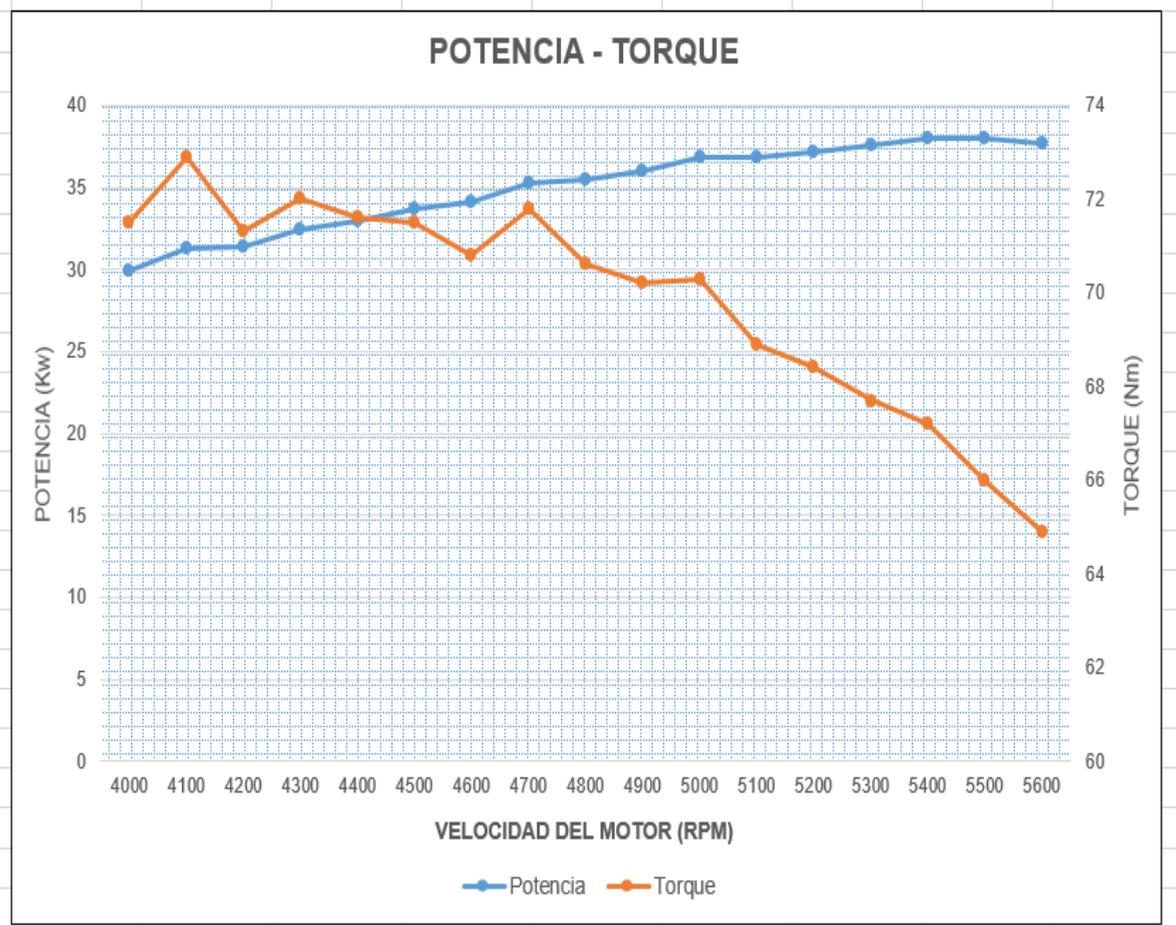
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,3	72,4
4100	30,7	71,6
4200	31,4	71,3
4300	32,3	71,7
4400	32,9	71,5
4500	34	72,1
4600	34,8	72,3
4700	35,4	71,8
4800	36,3	72,2
4900	36,1	70,3
5000	36,4	69,6
5100	35,8	66,9
5200	35,9	65,9
5300	35,7	64,3
5400	35,3	62,4
5500	34,9	60,5
5600	34,2	58,3



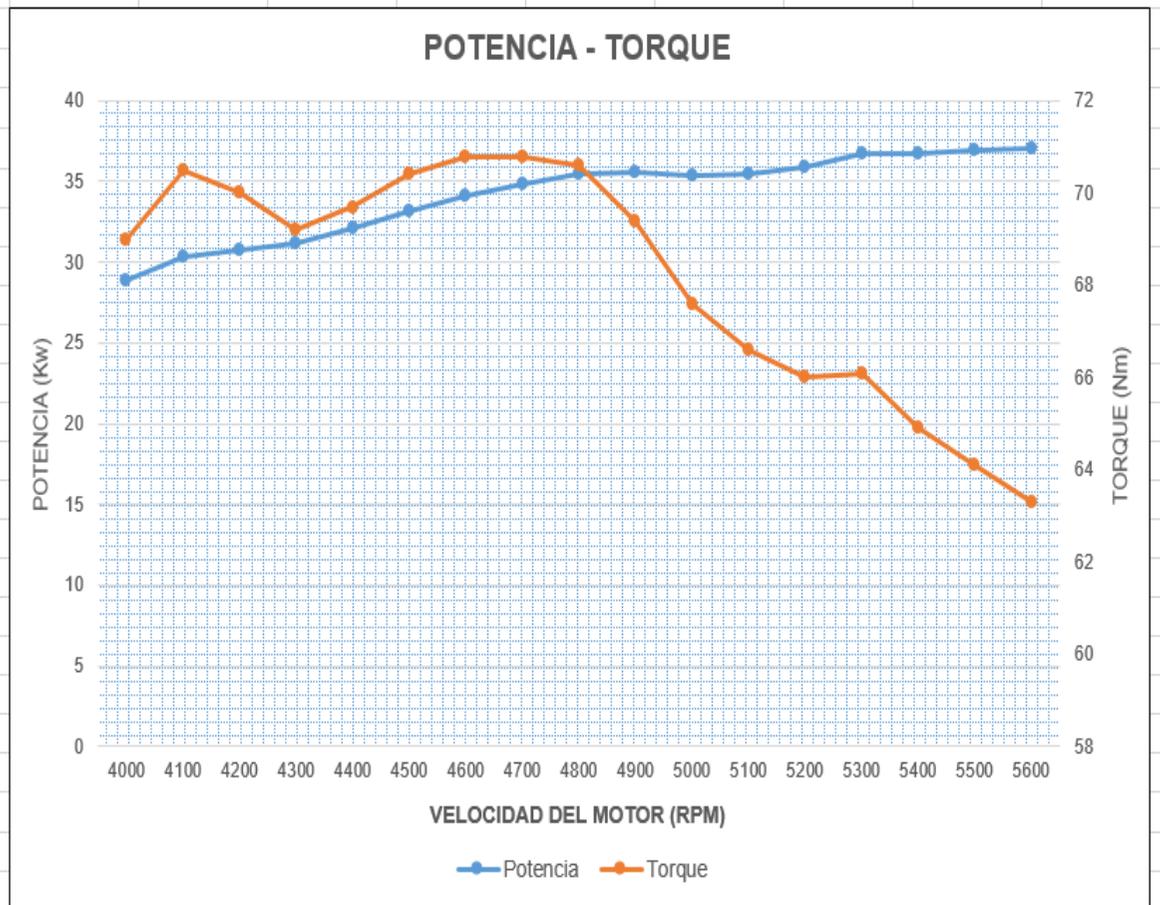
- Medición de la potencia con TI (5,60 ms) AE (38,90°)

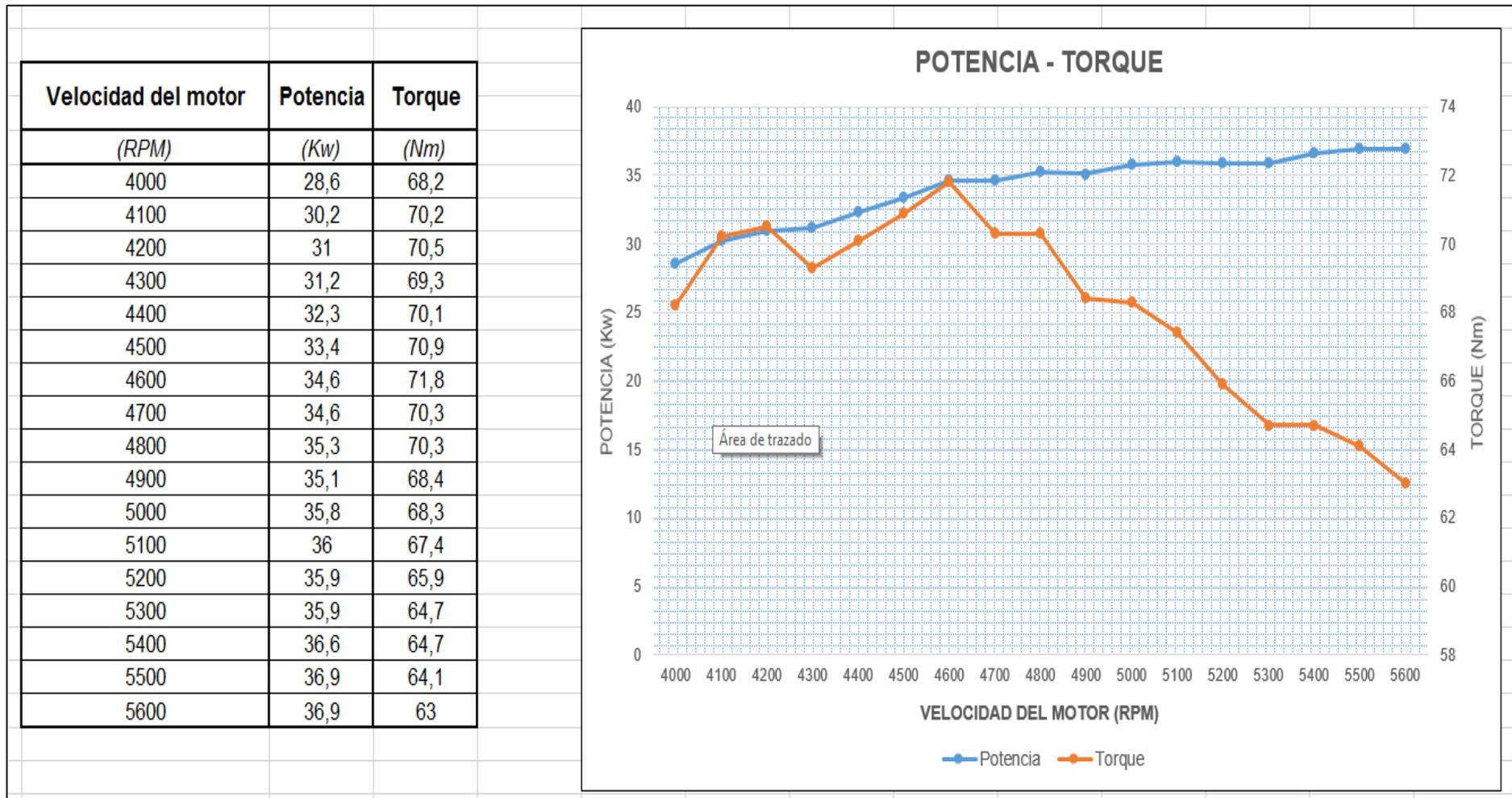


Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,9	71,5
4100	31,3	72,9
4200	31,4	71,3
4300	32,4	72
4400	33	71,6
4500	33,7	71,5
4600	34,1	70,8
4700	35,3	71,8
4800	35,5	70,6
4900	36	70,2
5000	36,8	70,3
5100	36,8	68,9
5200	37,2	68,4
5300	37,6	67,7
5400	38	67,2
5500	38	66
5600	37,7	64,9

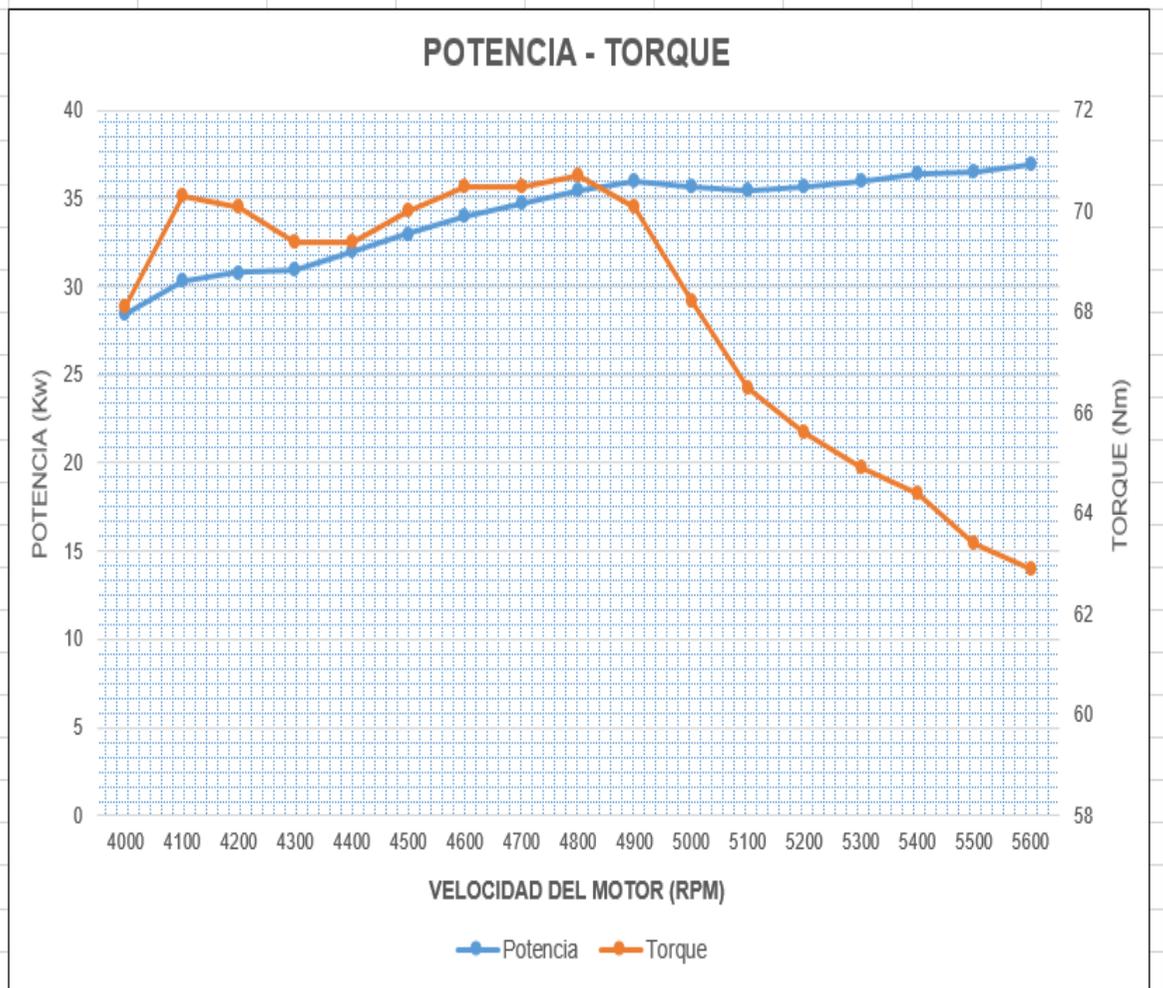


Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	28,9	69
4100	30,3	70,5
4200	30,8	70
4300	31,2	69,2
4400	32,1	69,7
4500	33,2	70,4
4600	34,1	70,8
4700	34,8	70,8
4800	35,5	70,6
4900	35,6	69,4
5000	35,4	67,6
5100	35,5	66,6
5200	35,9	66
5300	36,7	66,1
5400	36,7	64,9
5500	36,9	64,1
5600	37,1	63,3

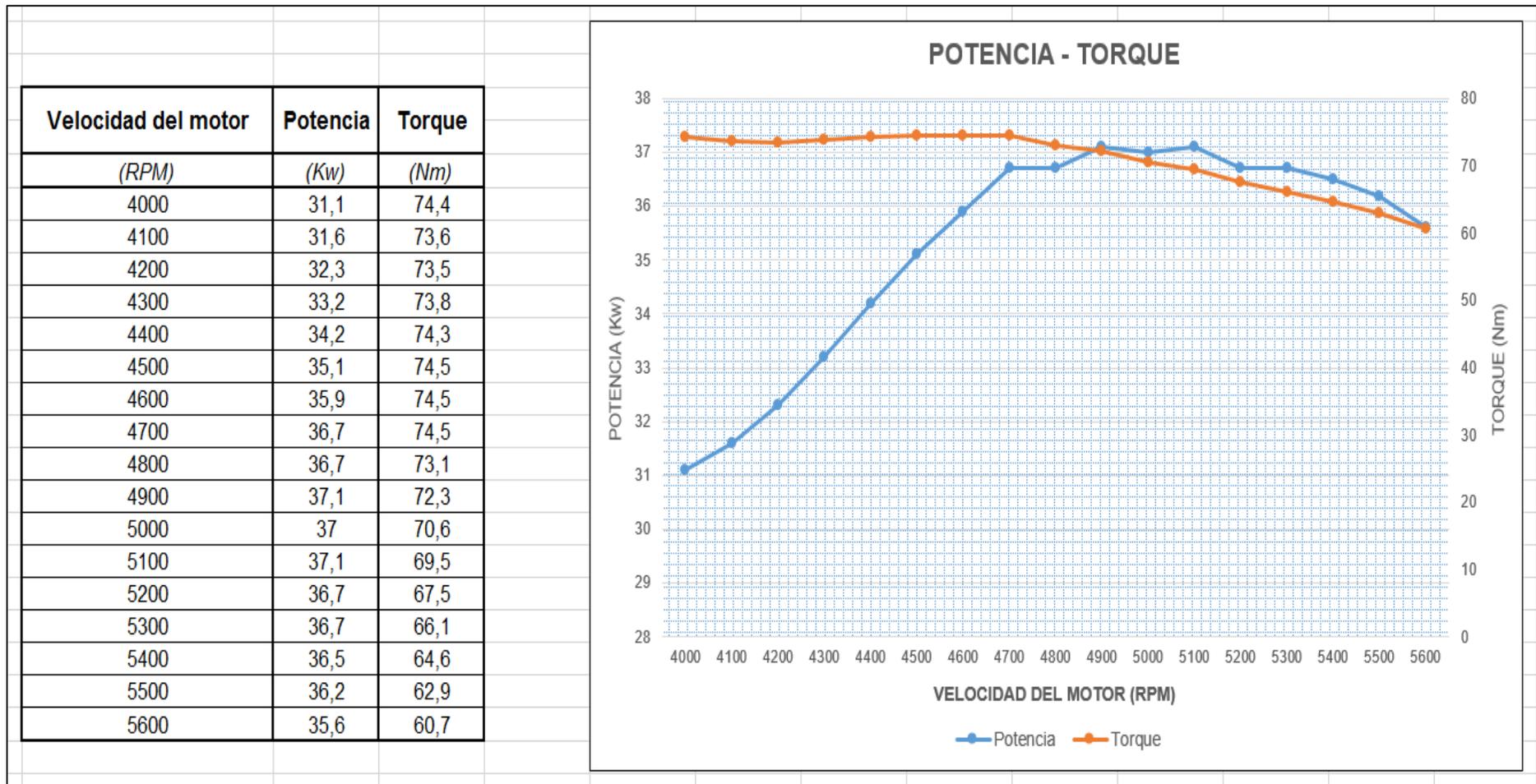




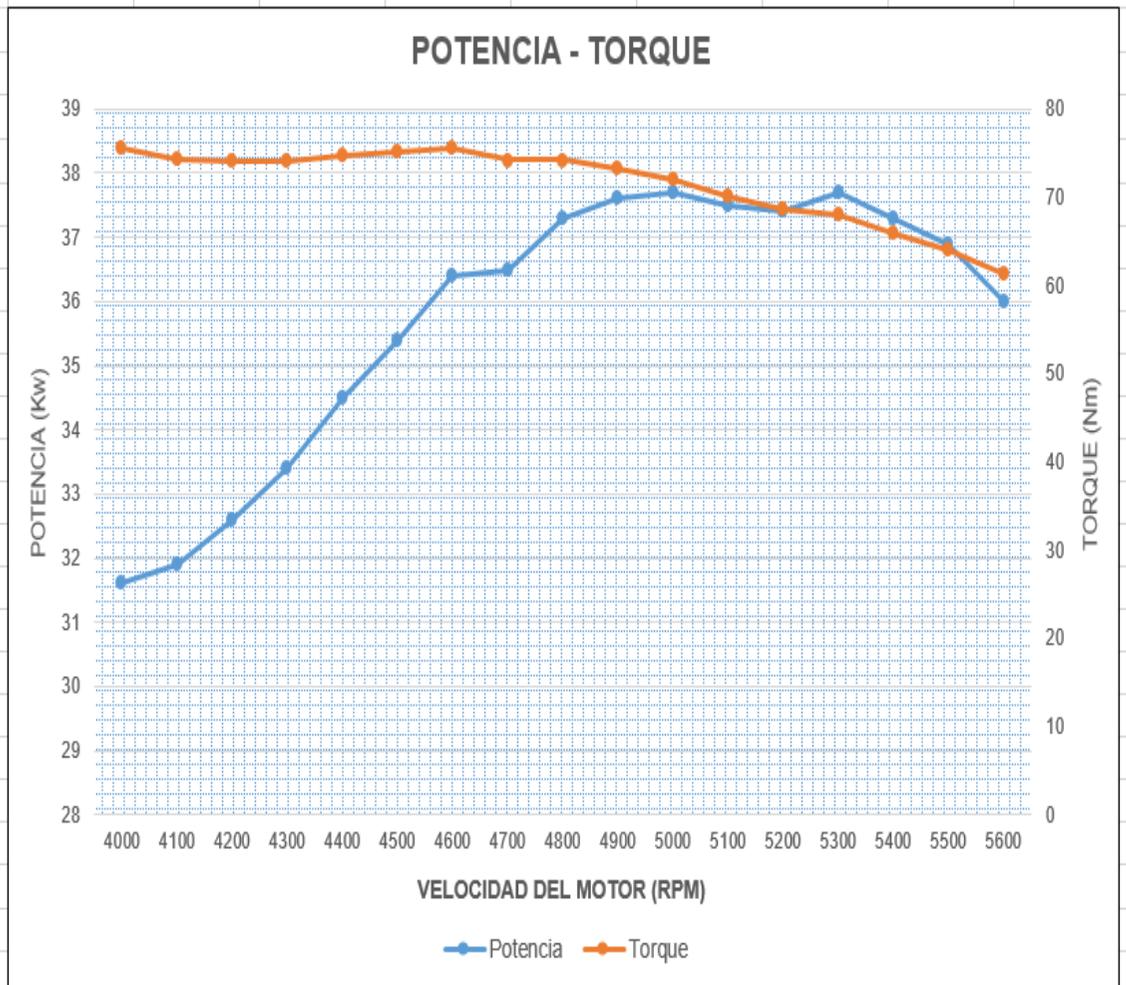
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	28,5	68,1
4100	30,3	70,3
4200	30,8	70,1
4300	31	69,4
4400	32	69,4
4500	33	70
4600	34	70,5
4700	34,7	70,5
4800	35,5	70,7
4900	36	70,1
5000	35,7	68,2
5100	35,5	66,5
5200	35,7	65,6
5300	36	64,9
5400	36,4	64,4
5500	36,5	63,4
5600	36,9	62,9



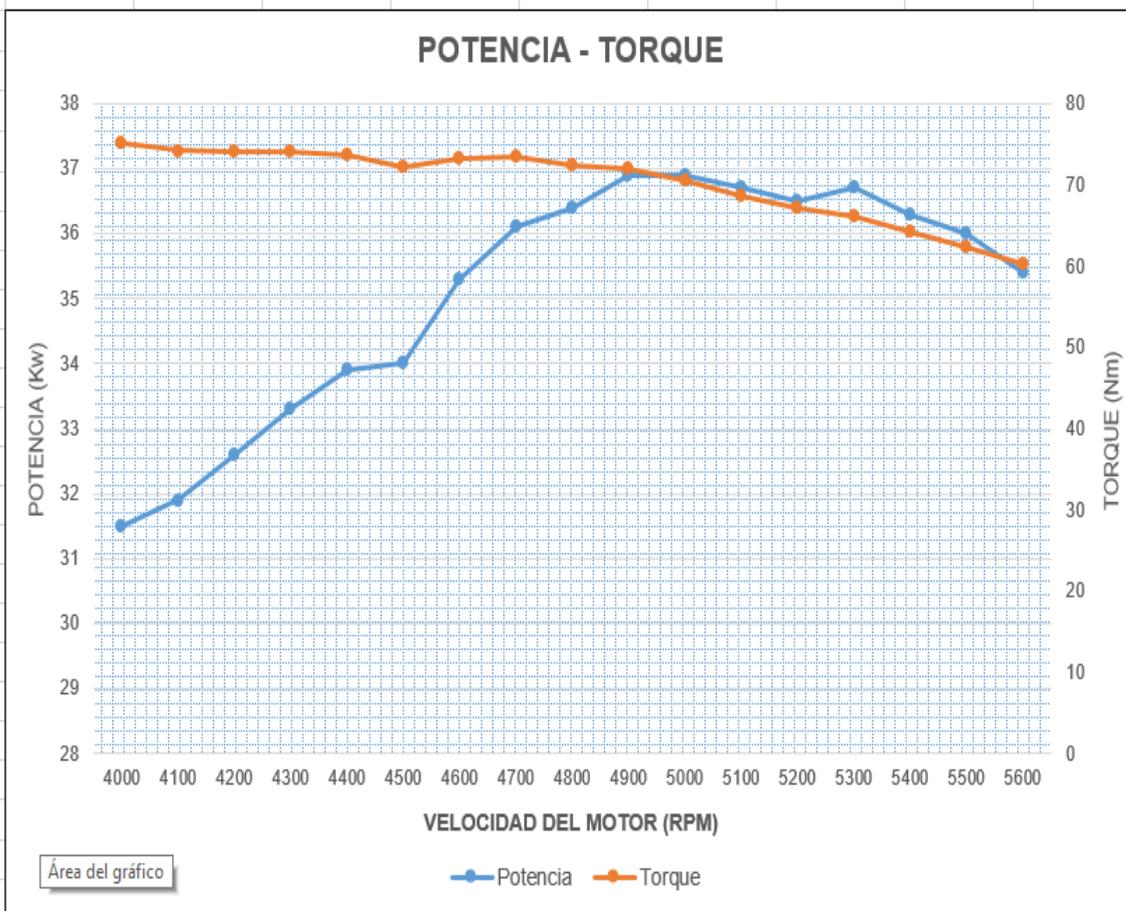
- Medición de la potencia con TI (7,41ms) AE (38,90°)



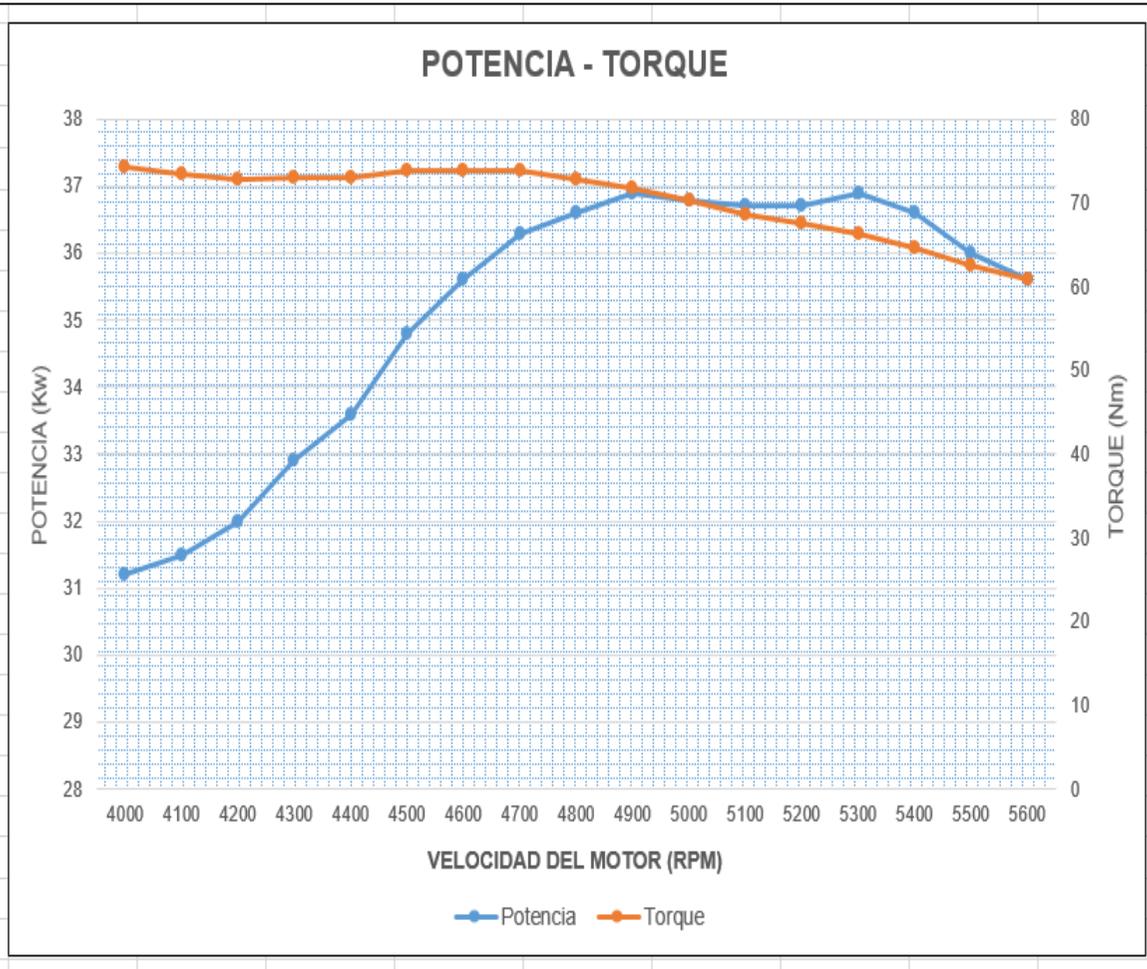
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	31,6	75,5
4100	31,9	74,4
4200	32,6	74,1
4300	33,4	74,1
4400	34,5	74,8
4500	35,4	75,2
4600	36,4	75,5
4700	36,5	74,2
4800	37,3	74,2
4900	37,6	73,3
5000	37,7	72
5100	37,5	70,2
5200	37,4	68,6
5300	37,7	68
5400	37,3	66
5500	36,9	64,1
5600	36	61,4



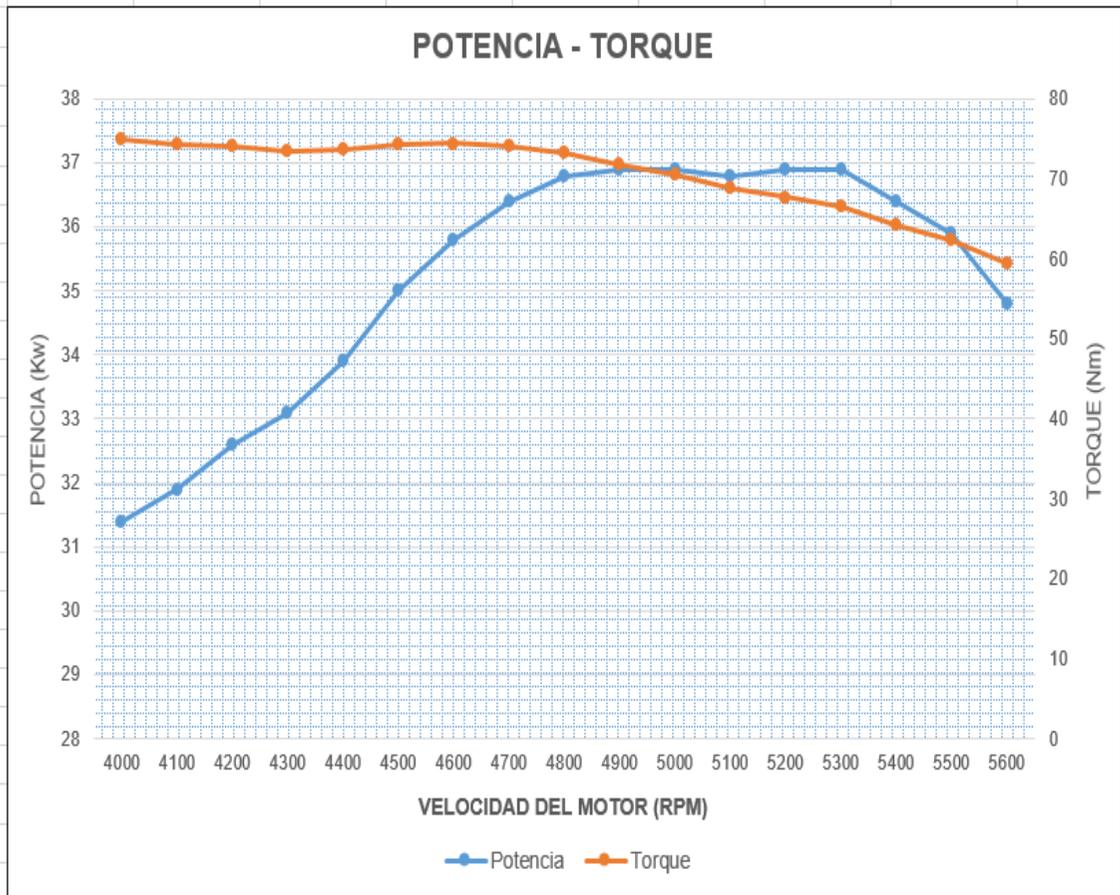
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	31,5	75,1
4100	31,9	74,2
4200	32,6	74,1
4300	33,3	74
4400	33,9	73,6
4500	34	72,2
4600	35,3	73,2
4700	36,1	73,4
4800	36,4	72,5
4900	36,9	71,9
5000	36,9	70,6
5100	36,7	68,6
5200	36,5	67,1
5300	36,7	66,2
5400	36,3	64,2
5500	36	62,4
5600	35,4	60,3



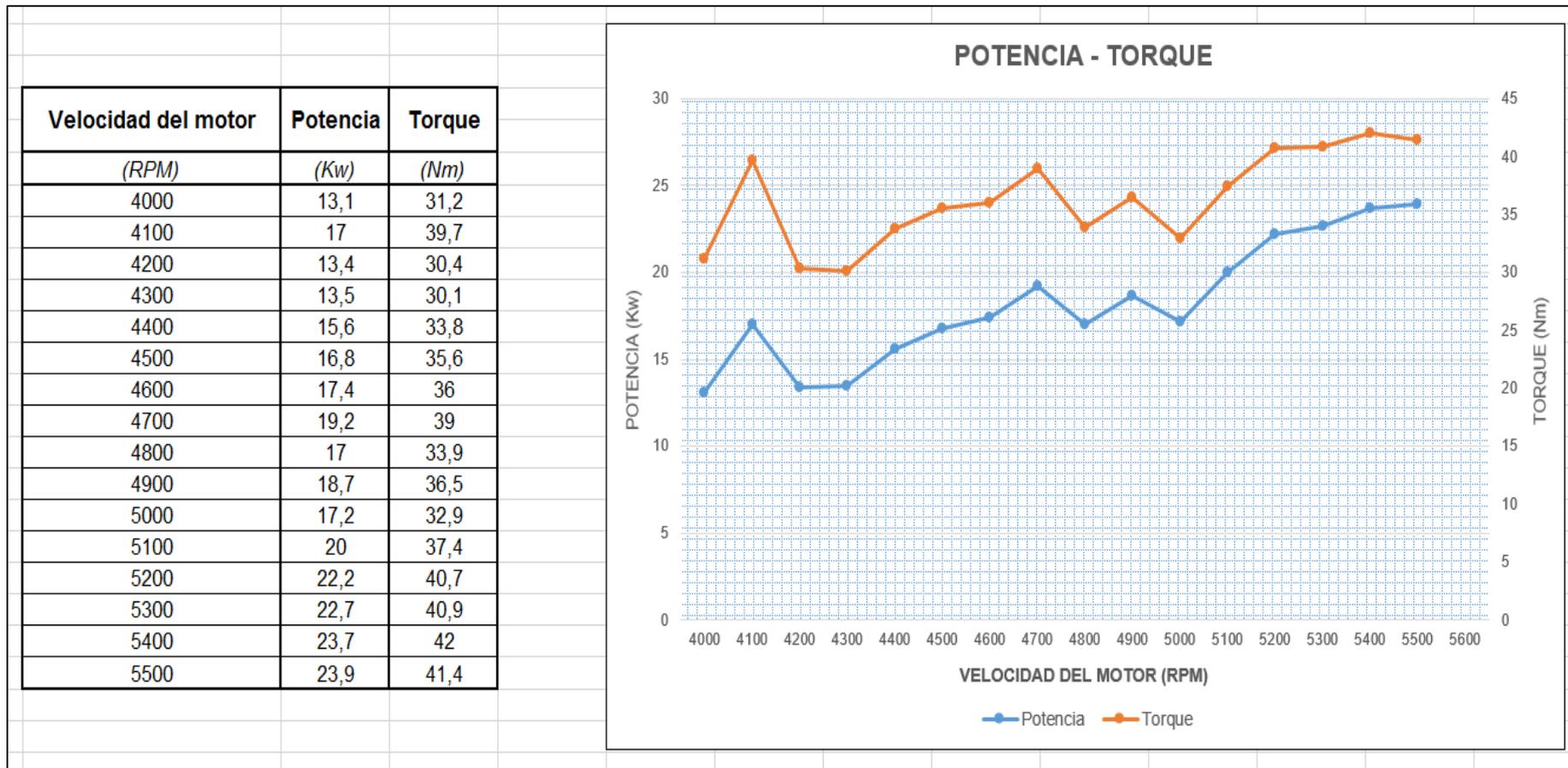
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	31,2	74,4
4100	31,5	73,5
4200	32	72,8
4300	32,9	73,1
4400	33,6	73
4500	34,8	73,9
4600	35,6	73,9
4700	36,3	73,8
4800	36,6	72,9
4900	36,9	71,8
5000	36,8	70,3
5100	36,7	68,7
5200	36,7	67,5
5300	36,9	66,4
5400	36,6	64,7
5500	36	62,5
5600	35,6	60,8



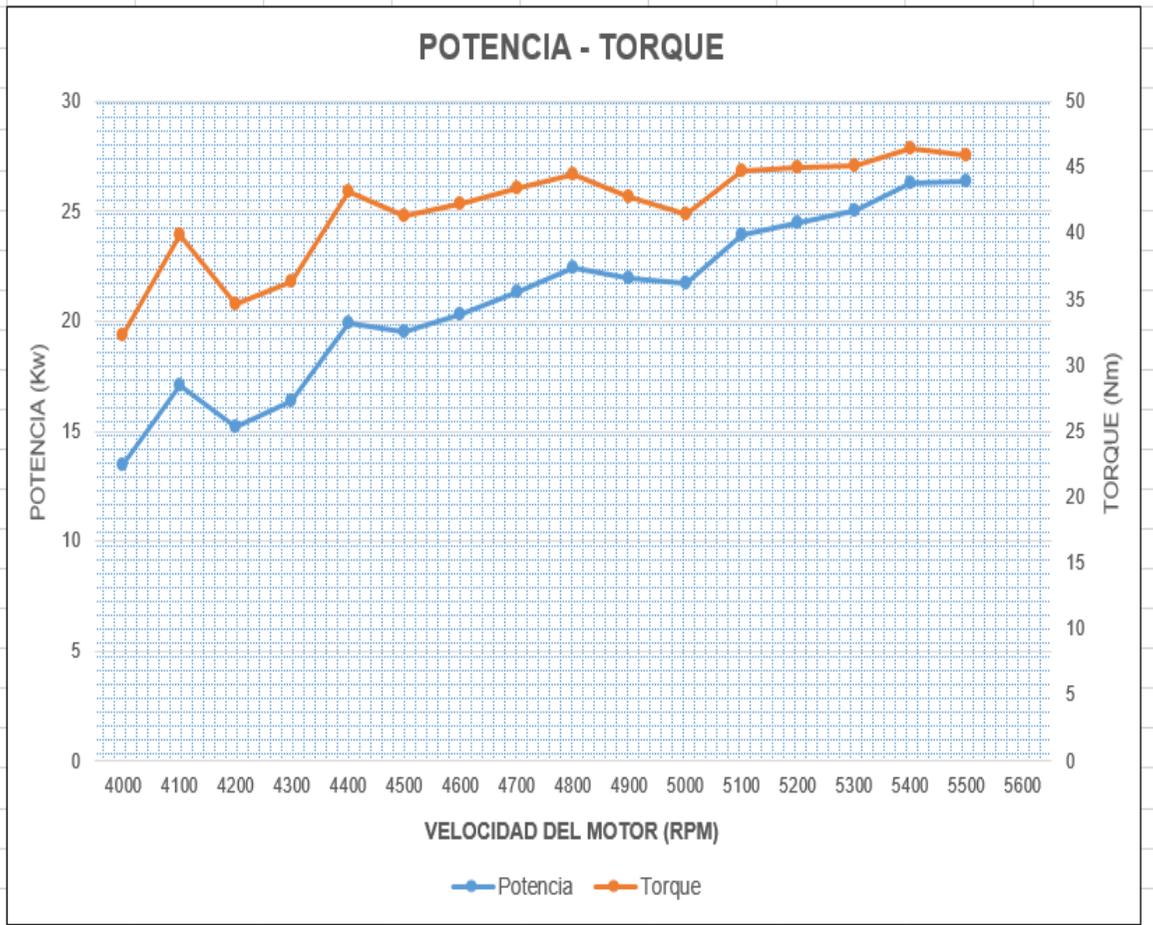
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	31,4	75
4100	31,9	74,3
4200	32,6	74
4300	33,1	73,5
4400	33,9	73,6
4500	35	74,3
4600	35,8	74,4
4700	36,4	74
4800	36,8	73,2
4900	36,9	71,8
5000	36,9	70,5
5100	36,8	68,8
5200	36,9	67,7
5300	36,9	66,5
5400	36,4	64,3
5500	35,9	62,3
5600	34,8	59,4



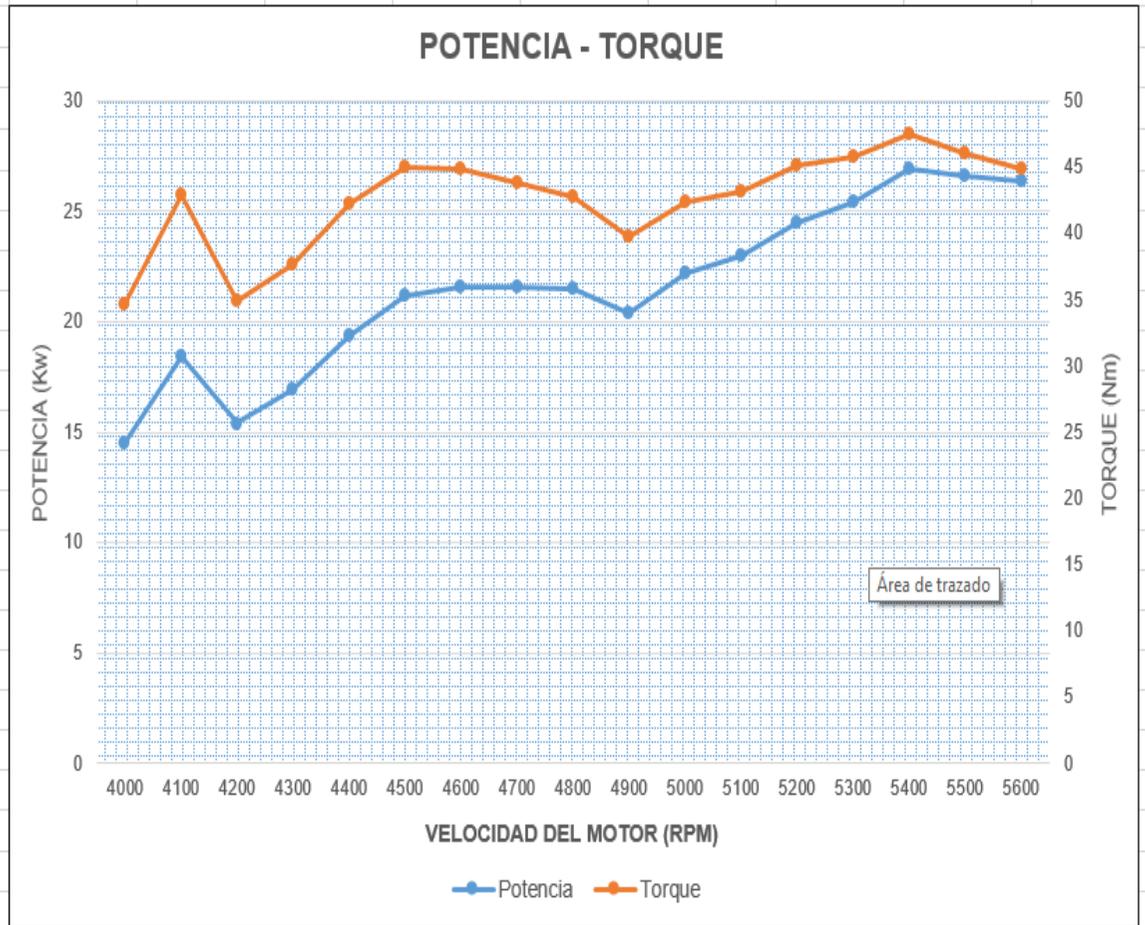
▪ Medición de la potencia con TI (5,22ms) AE (36,8°)



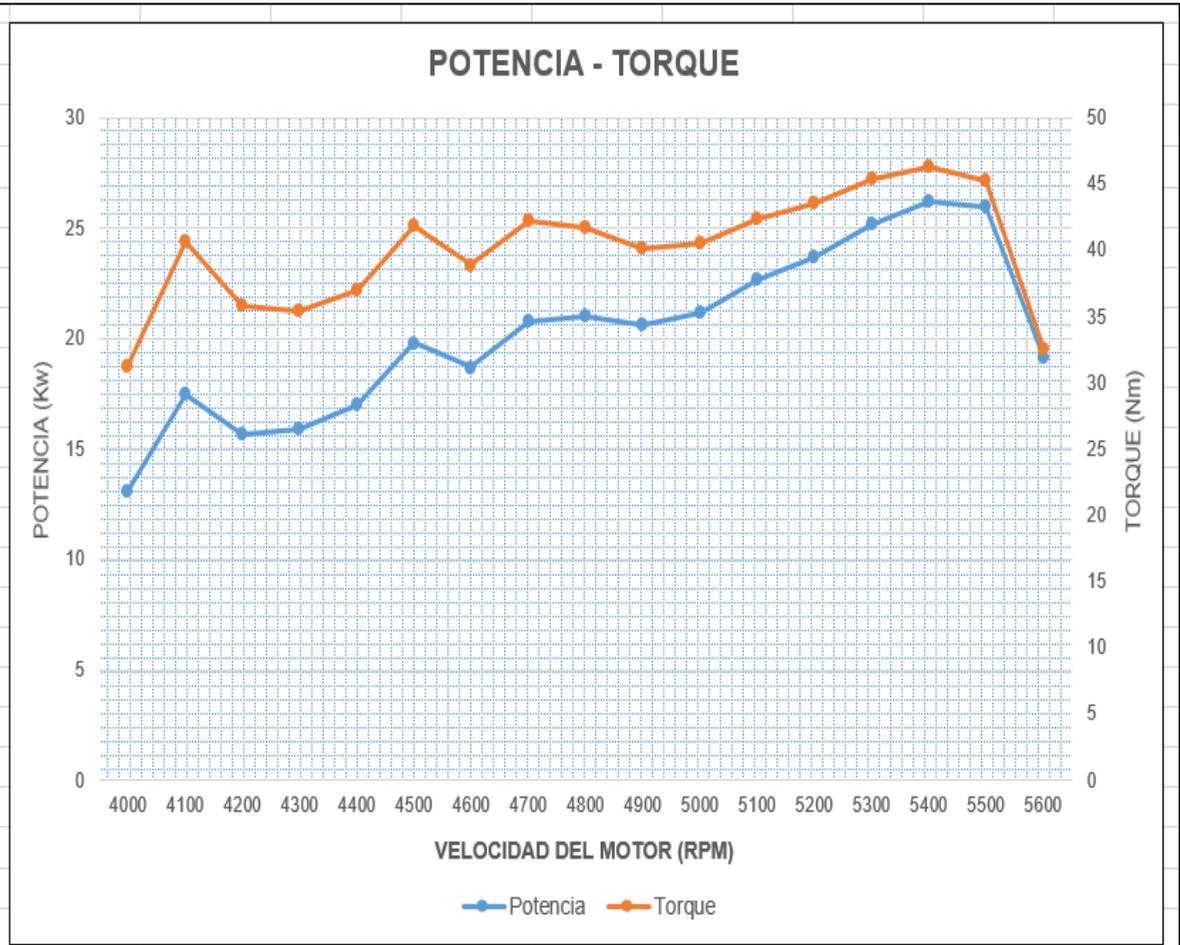
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	13,5	32,3
4100	17,1	39,9
4200	15,2	34,6
4300	16,4	36,4
4400	19,9	43,2
4500	19,5	41,3
4600	20,3	42,2
4700	21,3	43,4
4800	22,4	44,5
4900	22	42,8
5000	21,7	41,4
5100	23,9	44,7
5200	24,5	45
5300	25	45,1
5400	26,3	46,5
5500	26,4	45,9



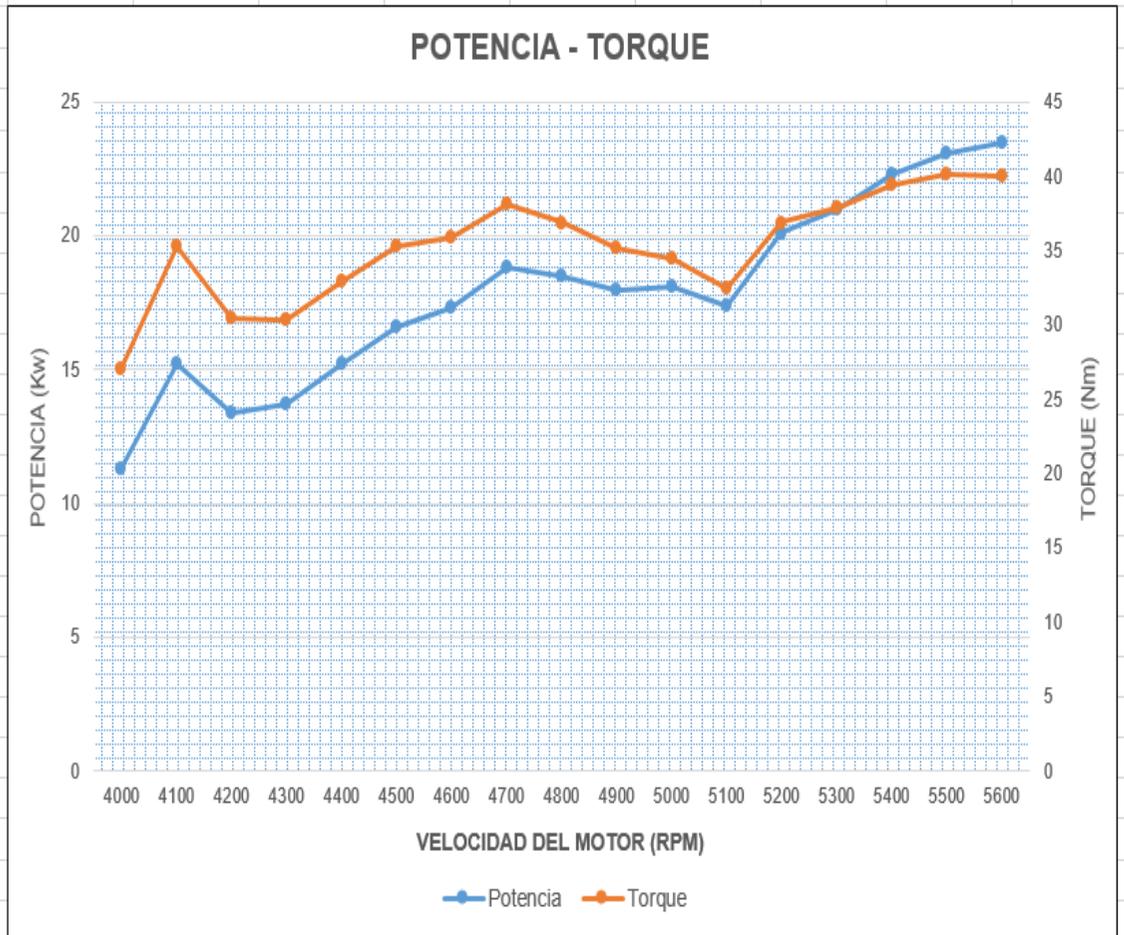
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	14,5	34,6
4100	18,4	42,9
4200	15,4	34,9
4300	16,9	37,6
4400	19,4	42,2
4500	21,2	45
4600	21,6	44,9
4700	21,6	43,8
4800	21,5	42,8
4900	20,4	39,8
5000	22,2	42,4
5100	23	43,1
5200	24,5	45,1
5300	25,4	45,8
5400	26,9	47,5
5500	26,6	46,1
5600	26,4	44,9



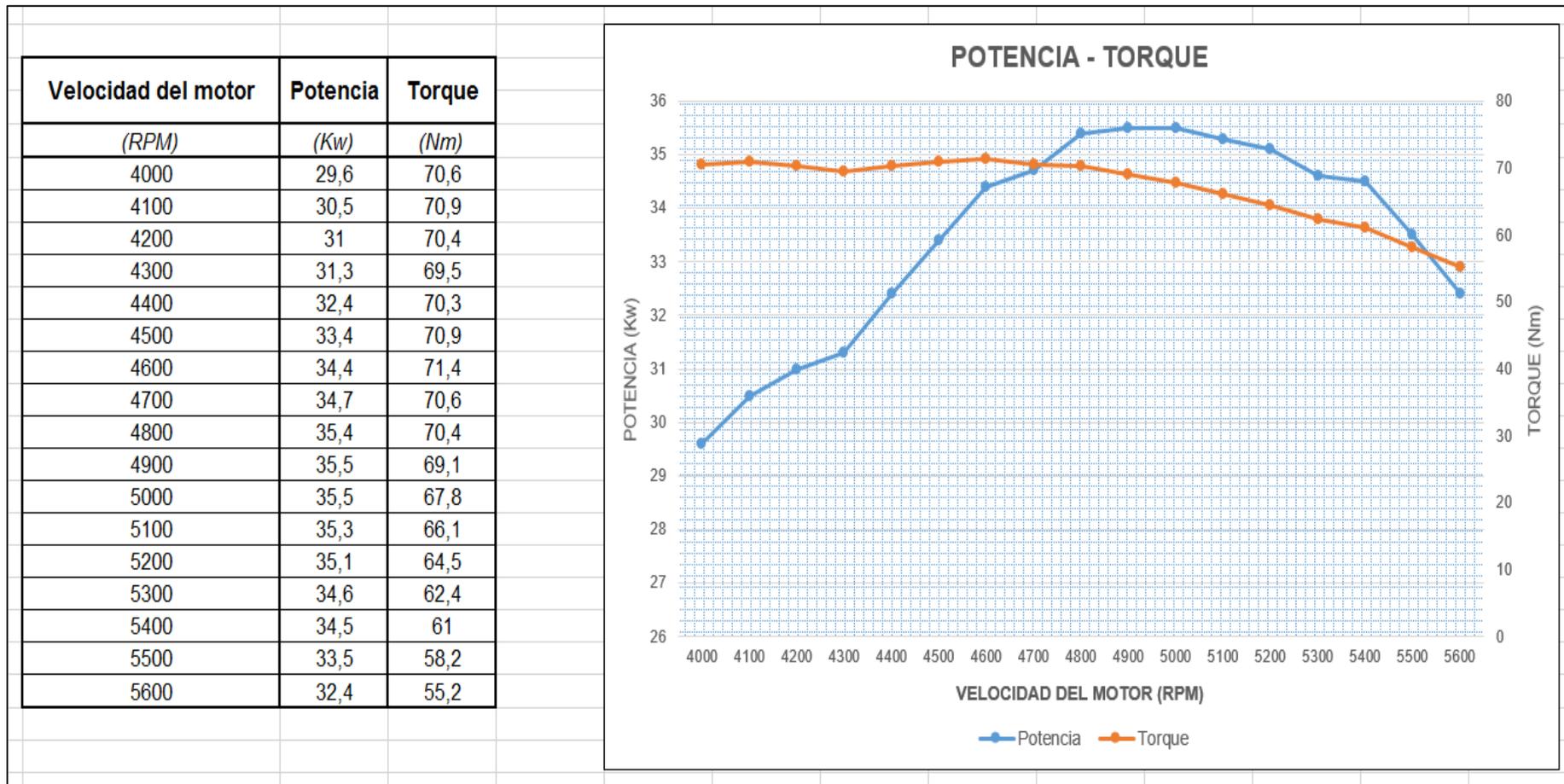
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	13,1	31,2
4100	17,5	40,7
4200	15,7	35,8
4300	15,9	35,4
4400	17	37
4500	19,8	41,9
4600	18,7	38,9
4700	20,8	42,3
4800	21	41,7
4900	20,6	40,2
5000	21,2	40,5
5100	22,7	42,4
5200	23,7	43,5
5300	25,2	45,4
5400	26,2	46,3
5500	26	45,2
5600	19,1	32,6



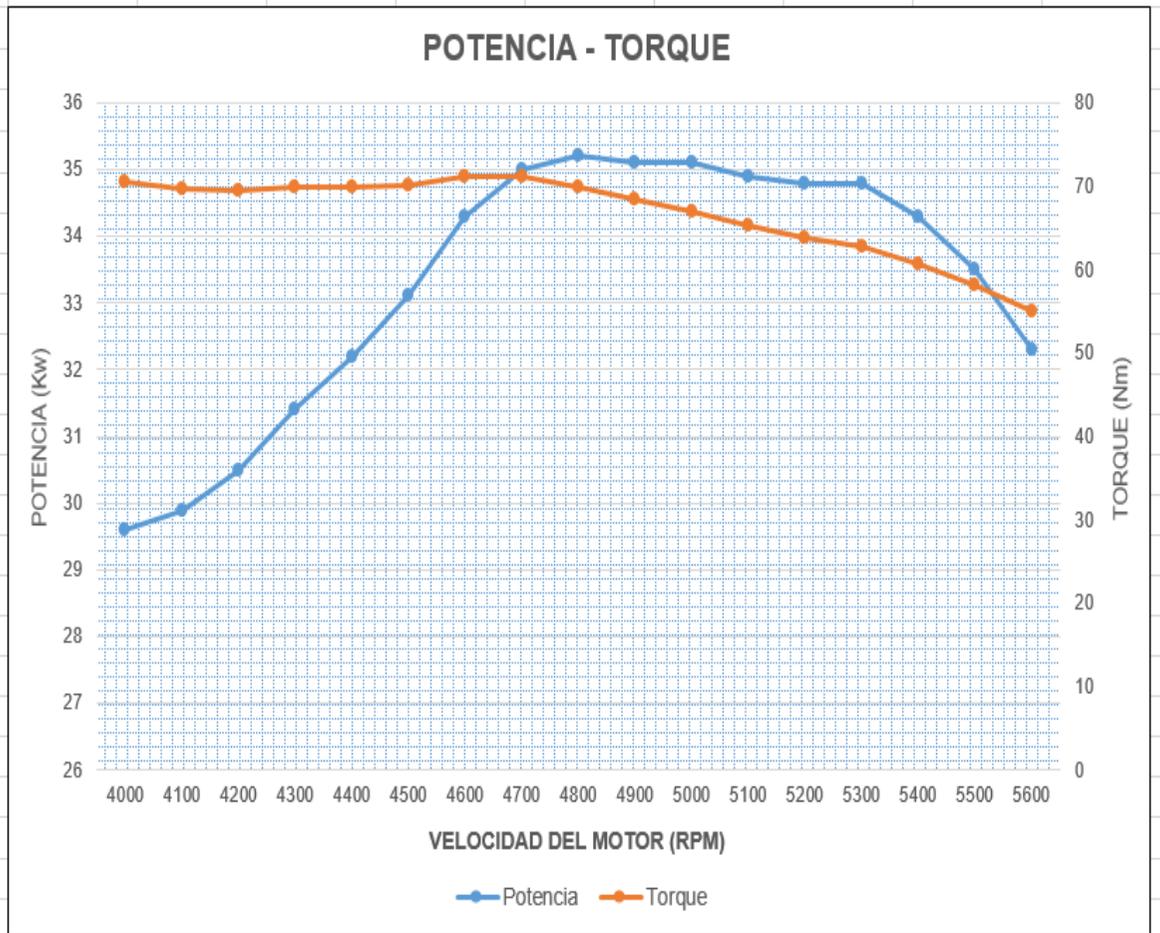
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	11,3	27
4100	15,2	35,3
4200	13,4	30,5
4300	13,7	30,3
4400	15,2	32,9
4500	16,6	35,3
4600	17,3	35,9
4700	18,8	38,1
4800	18,5	36,9
4900	18	35,2
5000	18,1	34,5
5100	17,4	32,5
5200	20,1	36,9
5300	21	37,9
5400	22,3	39,4
5500	23,1	40,1
5600	23,5	40



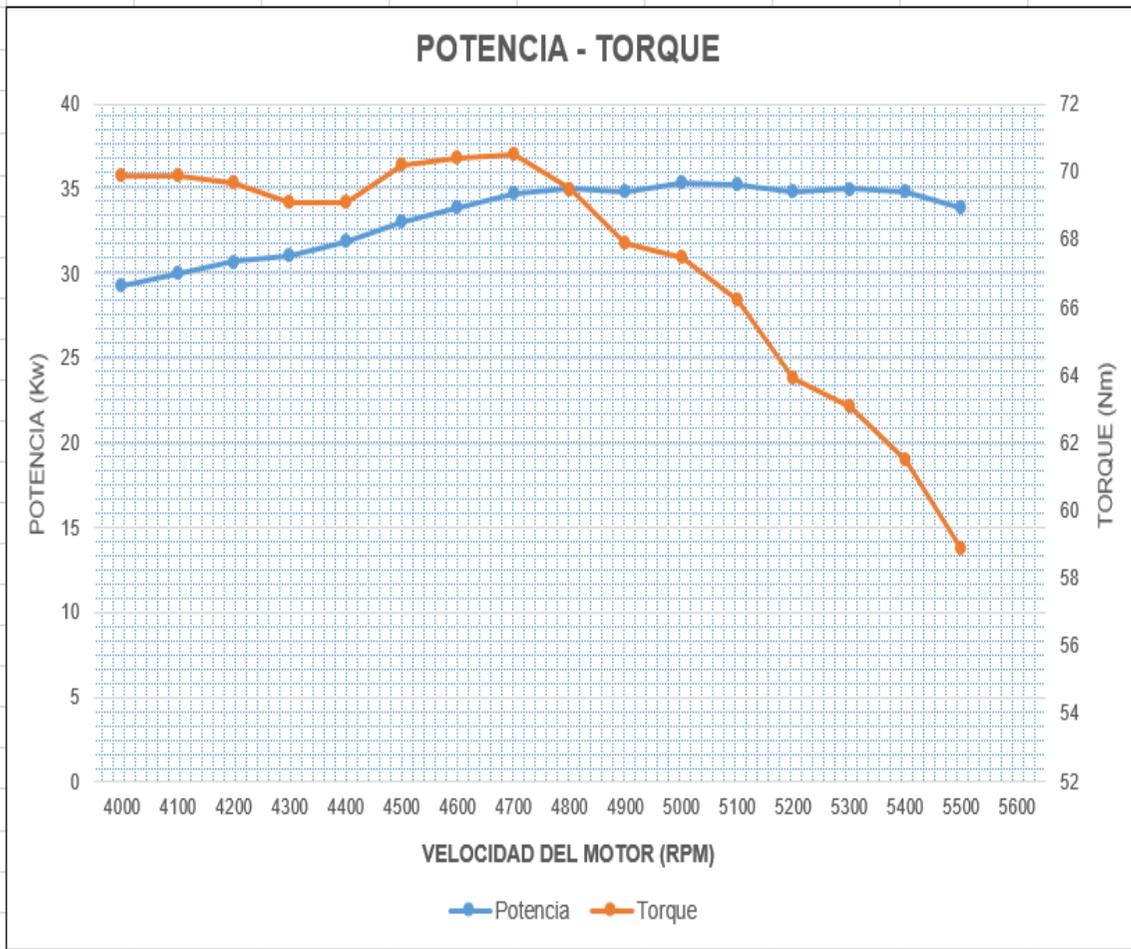
▪ **Medición de la potencia con TI (7,78ms) AE (36,80°)**



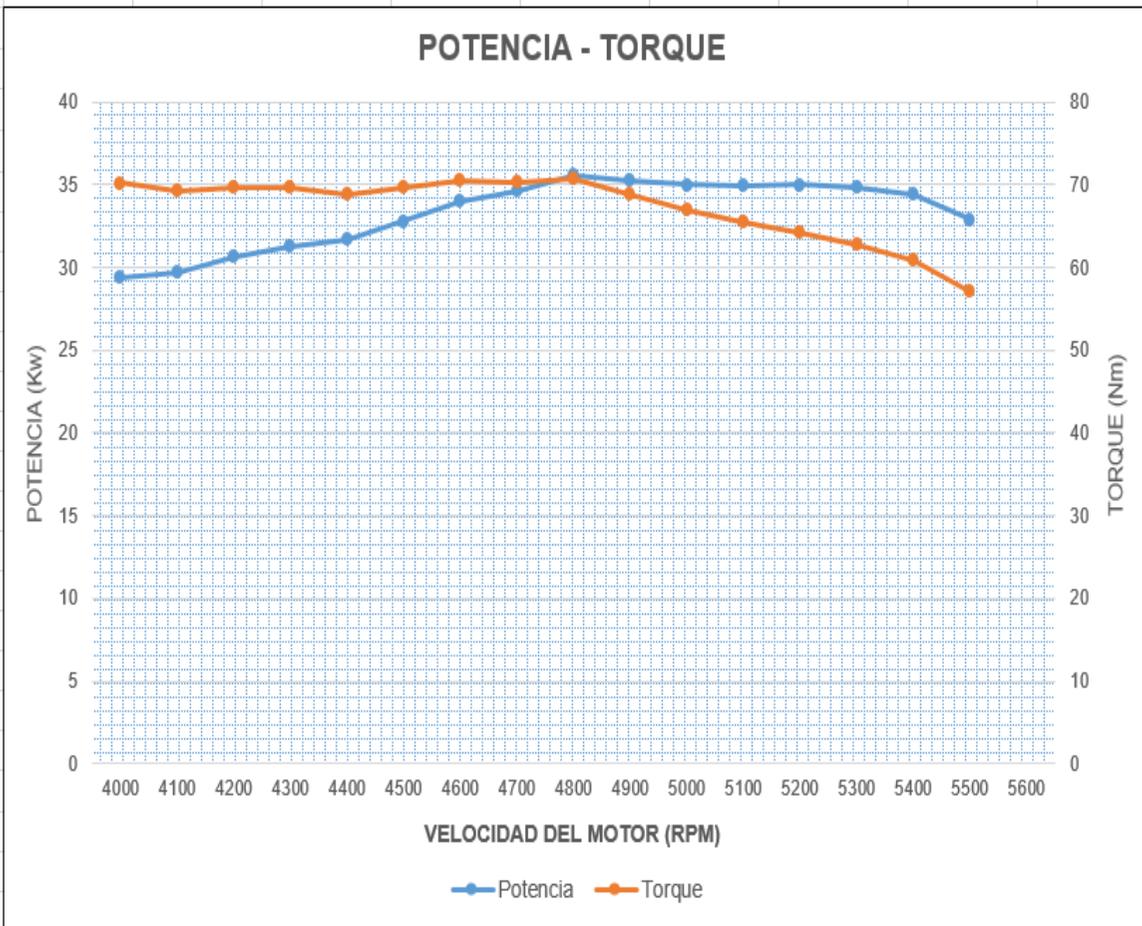
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,6	70,6
4100	29,9	69,7
4200	30,5	69,4
4300	31,4	69,8
4400	32,2	69,8
4500	33,1	70,2
4600	34,3	71,1
4700	35	71,1
4800	35,2	70
4900	35,1	68,5
5000	35,1	67
5100	34,9	65,3
5200	34,8	63,8
5300	34,8	62,7
5400	34,3	60,6
5500	33,5	58,1
5600	32,3	55,1



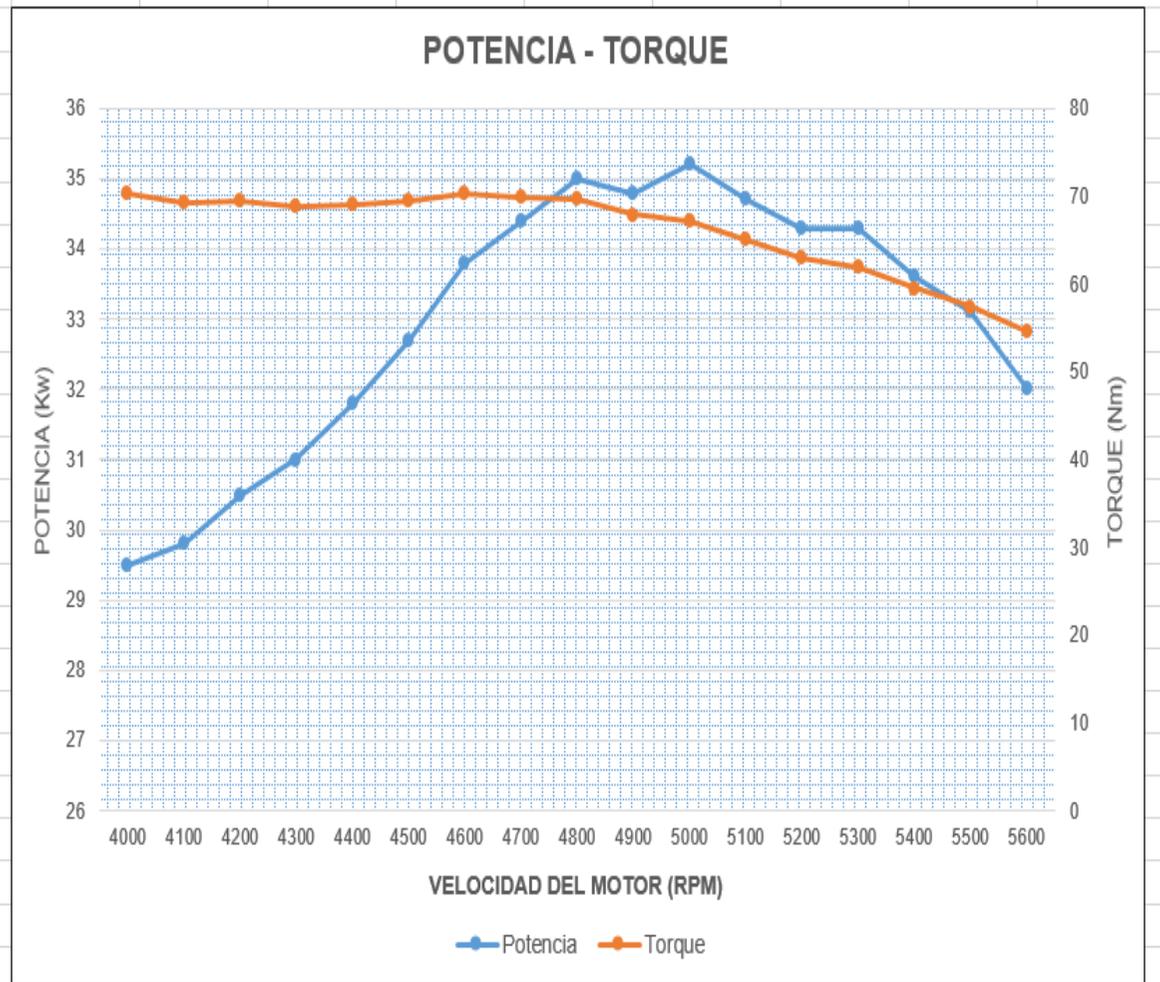
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,3	69,9
4100	30	69,9
4200	30,7	69,7
4300	31,1	69,1
4400	31,9	69,1
4500	33,1	70,2
4600	33,9	70,4
4700	34,7	70,5
4800	35	69,5
4900	34,8	67,9
5000	35,4	67,5
5100	35,3	66,2
5200	34,8	63,9
5300	35	63,1
5400	34,8	61,5
5500	33,9	58,9



Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,4	70,2
4100	29,7	69,3
4200	30,6	69,6
4300	31,3	69,6
4400	31,7	68,9
4500	32,8	69,7
4600	34	70,6
4700	34,6	70,4
4800	35,6	70,7
4900	35,3	68,8
5000	35	66,9
5100	34,9	65,4
5200	35	64,3
5300	34,8	62,8
5400	34,4	60,9
5500	32,9	57,2

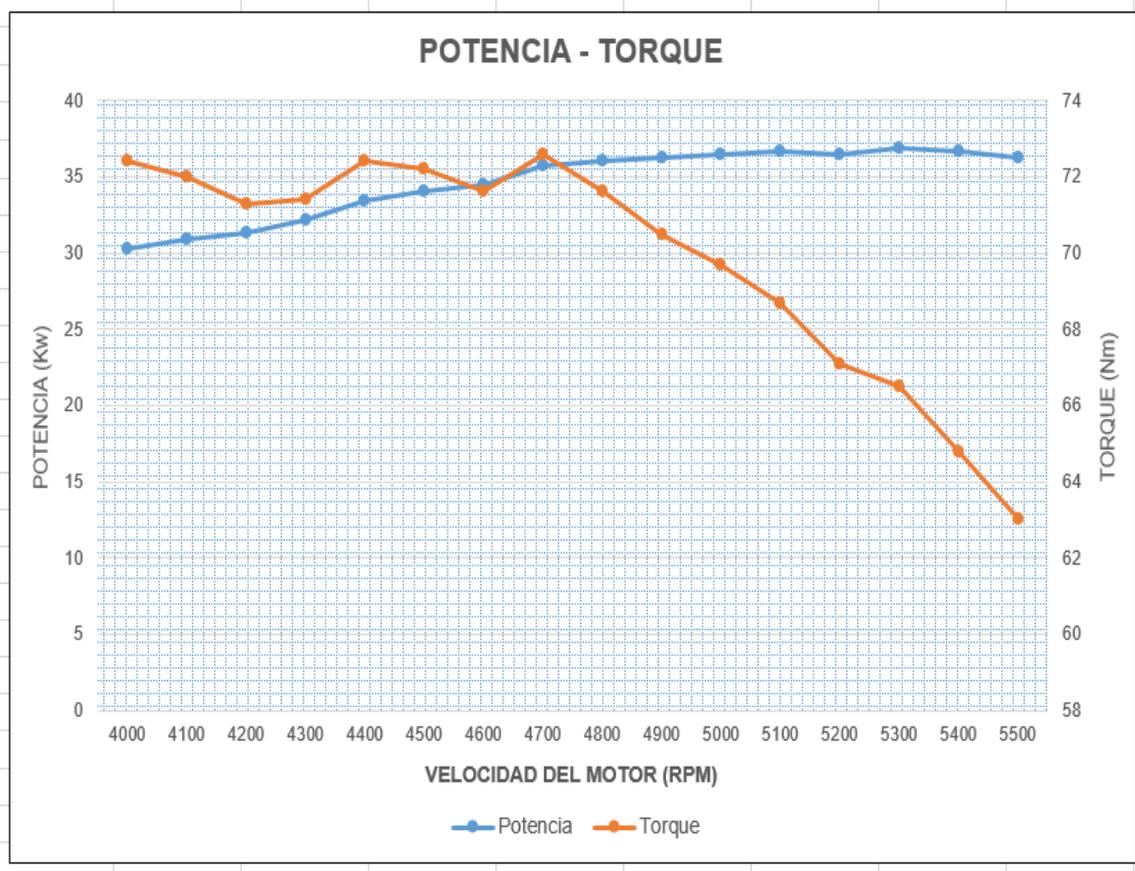


Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,5	70,4
4100	29,8	69,3
4200	30,5	69,4
4300	31	68,9
4400	31,8	69
4500	32,7	69,5
4600	33,8	70,3
4700	34,4	69,9
4800	35	69,6
4900	34,8	67,9
5000	35,2	67,2
5100	34,7	65
5200	34,3	63
5300	34,3	61,9
5400	33,6	59,5
5500	33,1	57,4
5600	32	54,5

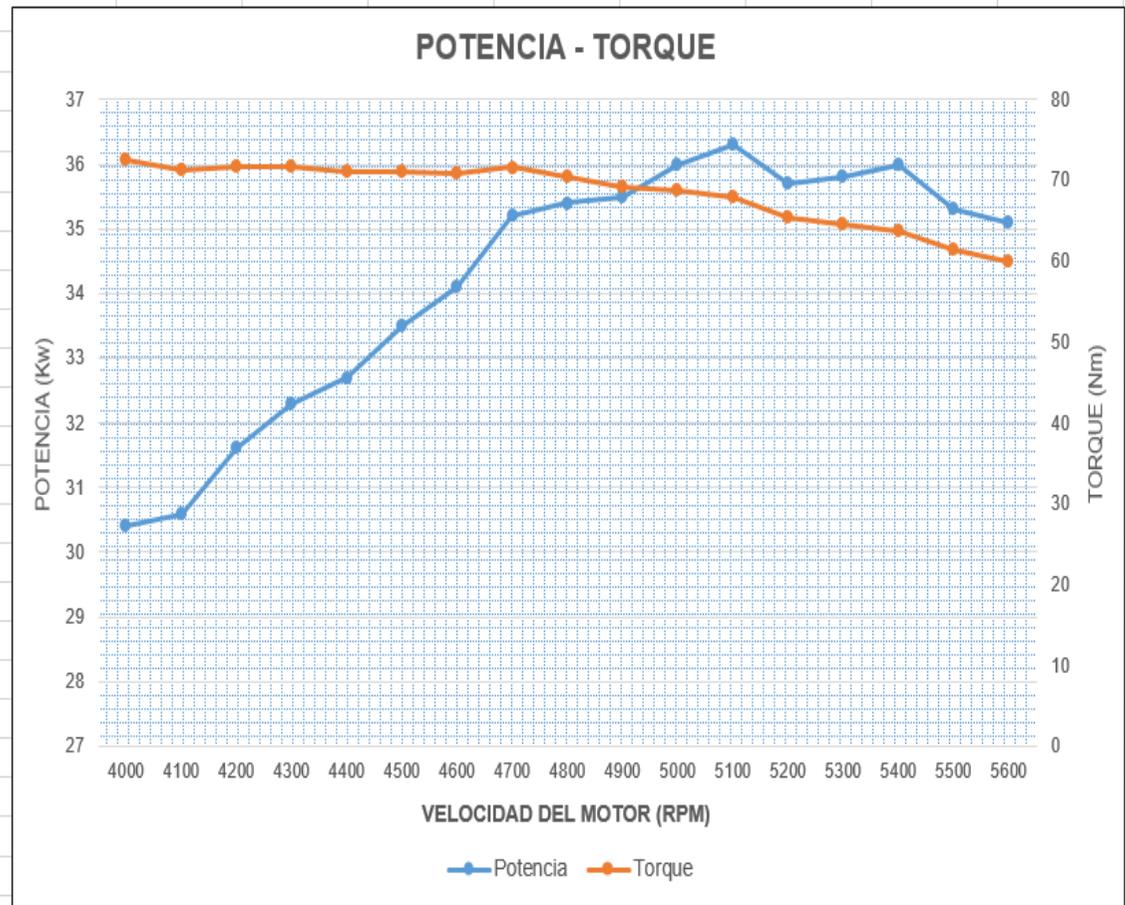


- Medición de la potencia con TI (6,50ms) AE (33,83°)

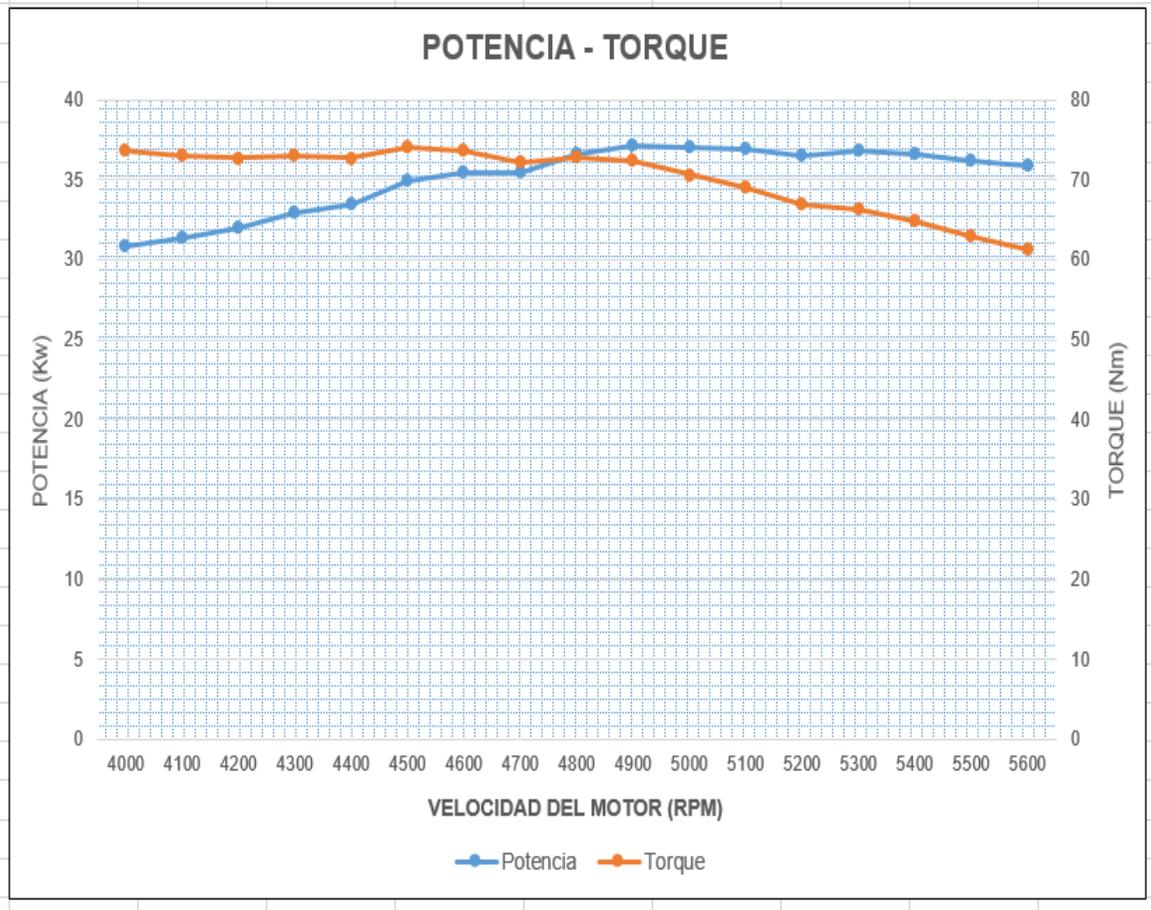
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,3	72,4
4100	30,9	72
4200	31,3	71,3
4300	32,2	71,4
4400	33,4	72,4
4500	34	72,2
4600	34,5	71,6
4700	35,7	72,6
4800	36	71,6
4900	36,2	70,5
5000	36,5	69,7
5100	36,7	68,7
5200	36,5	67,1
5300	36,9	66,5
5400	36,7	64,8
5500	36,3	63



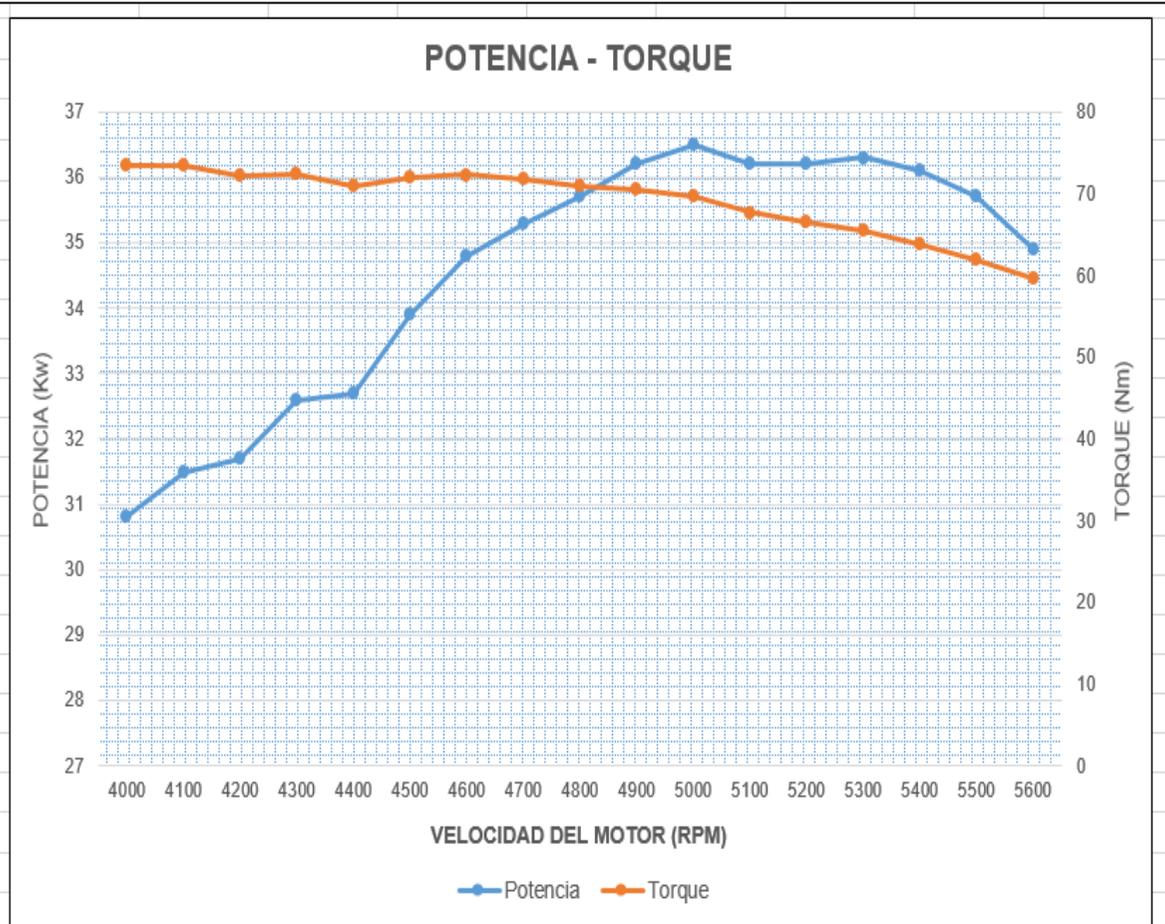
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	30,4	72,6
4100	30,6	71,2
4200	31,6	71,7
4300	32,3	71,7
4400	32,7	71
4500	33,5	71,1
4600	34,1	70,9
4700	35,2	71,6
4800	35,4	70,5
4900	35,5	69,2
5000	36	68,8
5100	36,3	67,9
5200	35,7	65,5
5300	35,8	64,5
5400	36	63,7
5500	35,3	61,4
5600	35,1	59,9



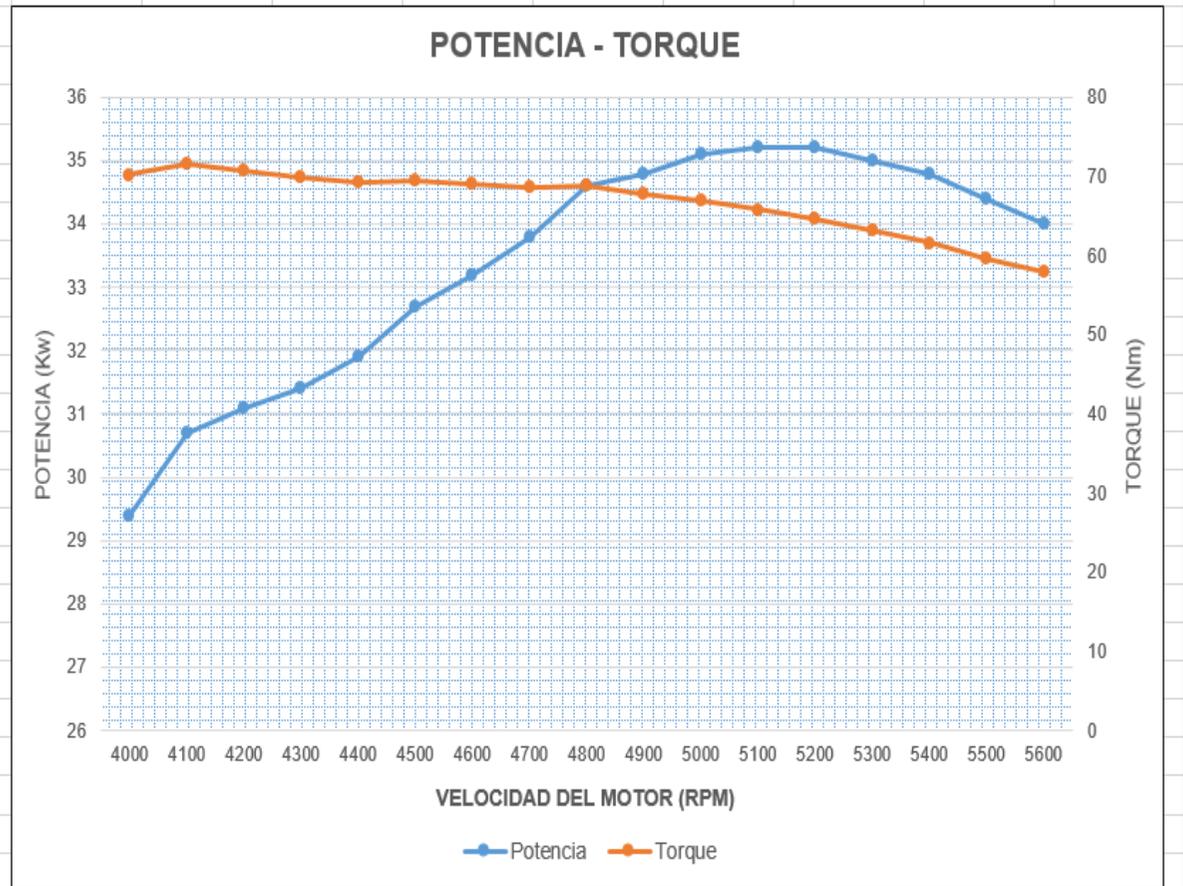
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,8	73,6
4100	31,4	73,1
4200	32	72,7
4300	32,9	73,1
4400	33,5	72,7
4500	34,9	74
4600	35,5	73,6
4700	35,5	72,2
4800	36,6	72,9
4900	37,1	72,4
5000	37	70,6
5100	36,9	69,1
5200	36,5	67
5300	36,8	66,3
5400	36,6	64,8
5500	36,2	62,9
5600	35,9	61,2



Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,8	73,5
4100	31,5	73,4
4200	31,7	72,2
4300	32,6	72,4
4400	32,7	70,9
4500	33,9	71,9
4600	34,8	72,3
4700	35,3	71,7
4800	35,7	71
4900	36,2	70,5
5000	36,5	69,7
5100	36,2	67,7
5200	36,2	66,5
5300	36,3	65,4
5400	36,1	63,9
5500	35,7	62
5600	34,9	59,6

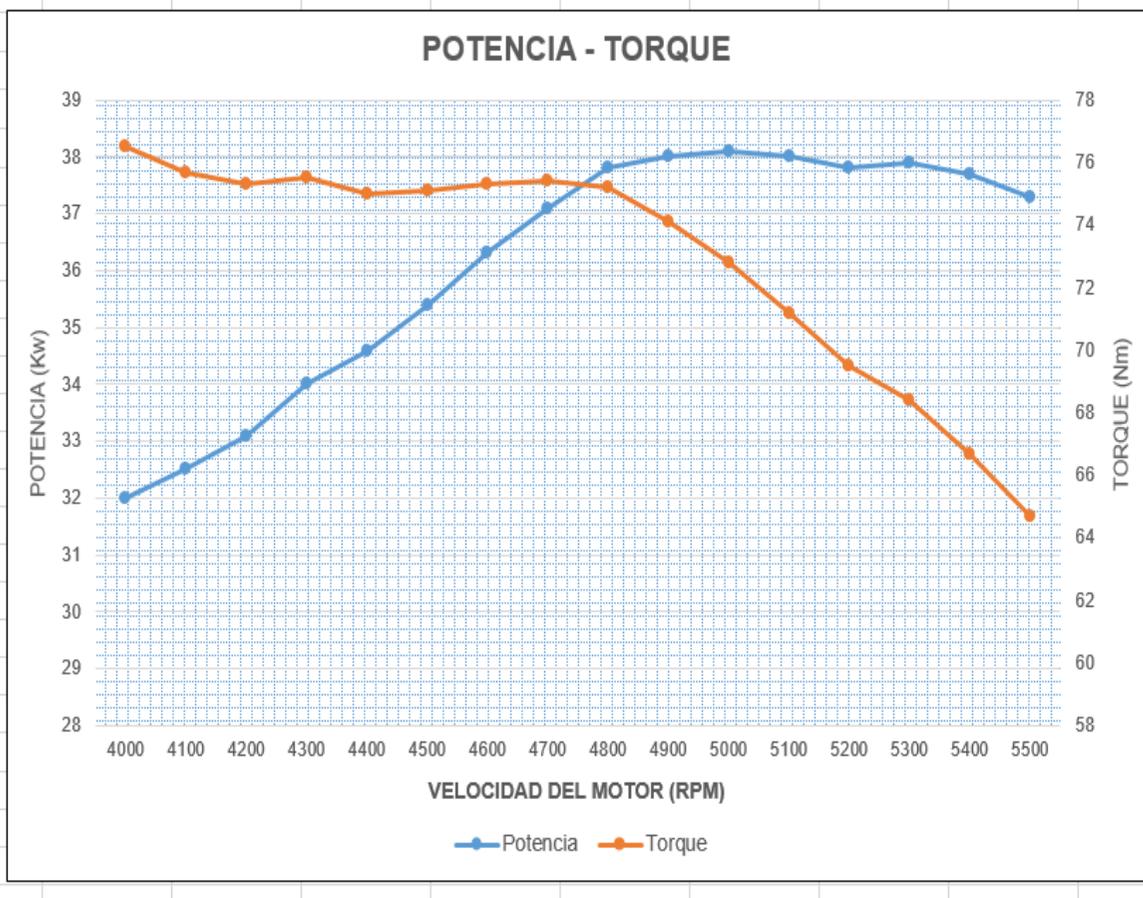


Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,4	70,2
4100	30,7	71,6
4200	31,1	70,7
4300	31,4	69,8
4400	31,9	69,3
4500	32,7	69,4
4600	33,2	69
4700	33,8	68,7
4800	34,6	68,9
4900	34,8	67,8
5000	35,1	67
5100	35,2	65,8
5200	35,2	64,6
5300	35	63,1
5400	34,8	61,6
5500	34,4	59,7
5600	34	58

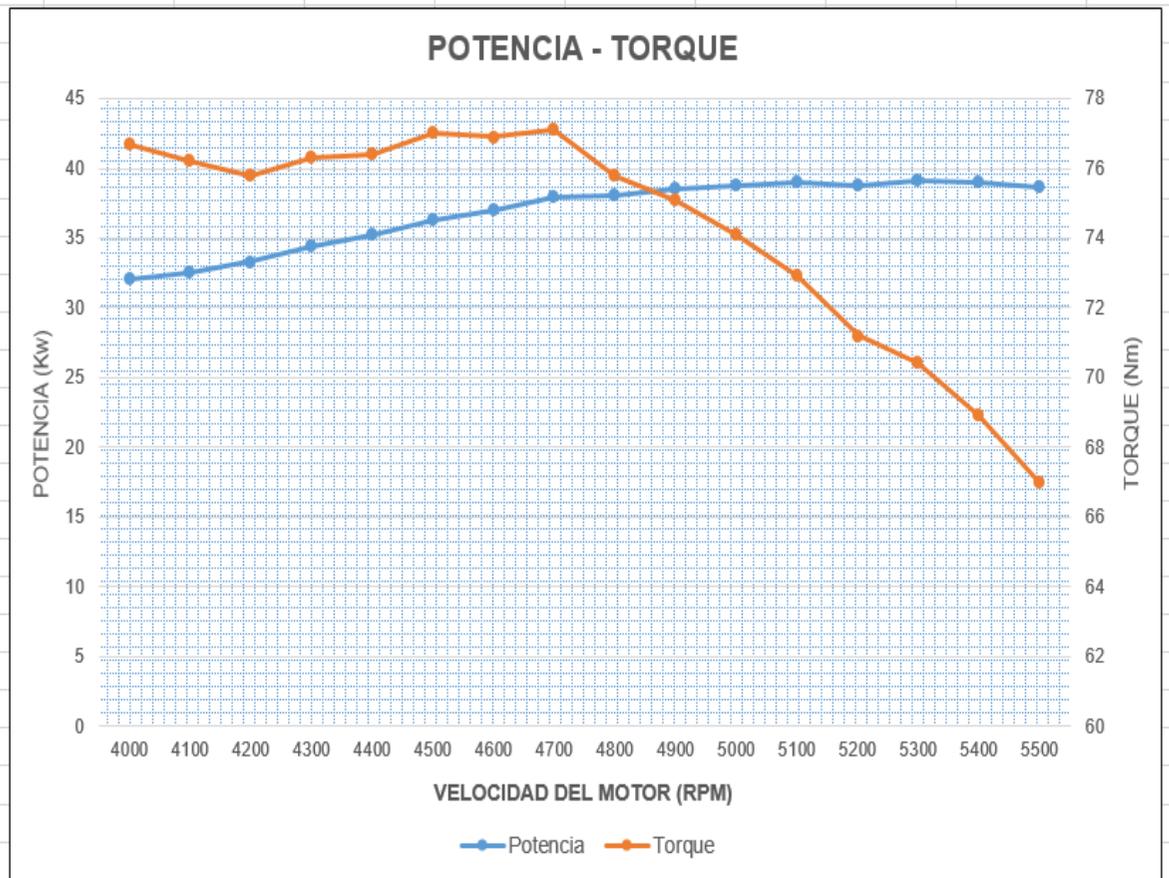


- Medición de la potencia con TI (6,50ms) AE (39,76°)

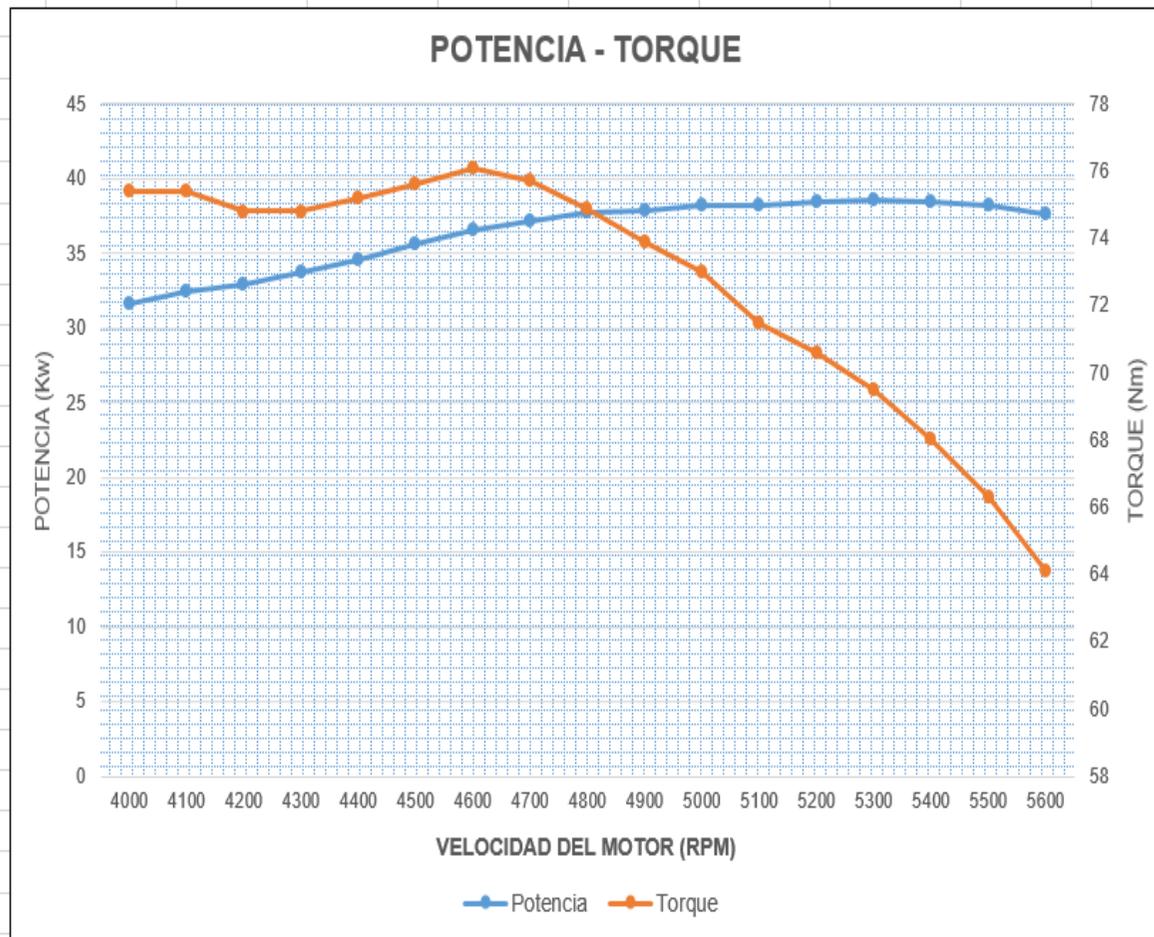
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	32	76,5
4100	32,5	75,7
4200	33,1	75,3
4300	34	75,5
4400	34,6	75
4500	35,4	75,1
4600	36,3	75,3
4700	37,1	75,4
4800	37,8	75,2
4900	38	74,1
5000	38,1	72,8
5100	38	71,2
5200	37,8	69,5
5300	37,9	68,4
5400	37,7	66,7
5500	37,3	64,7



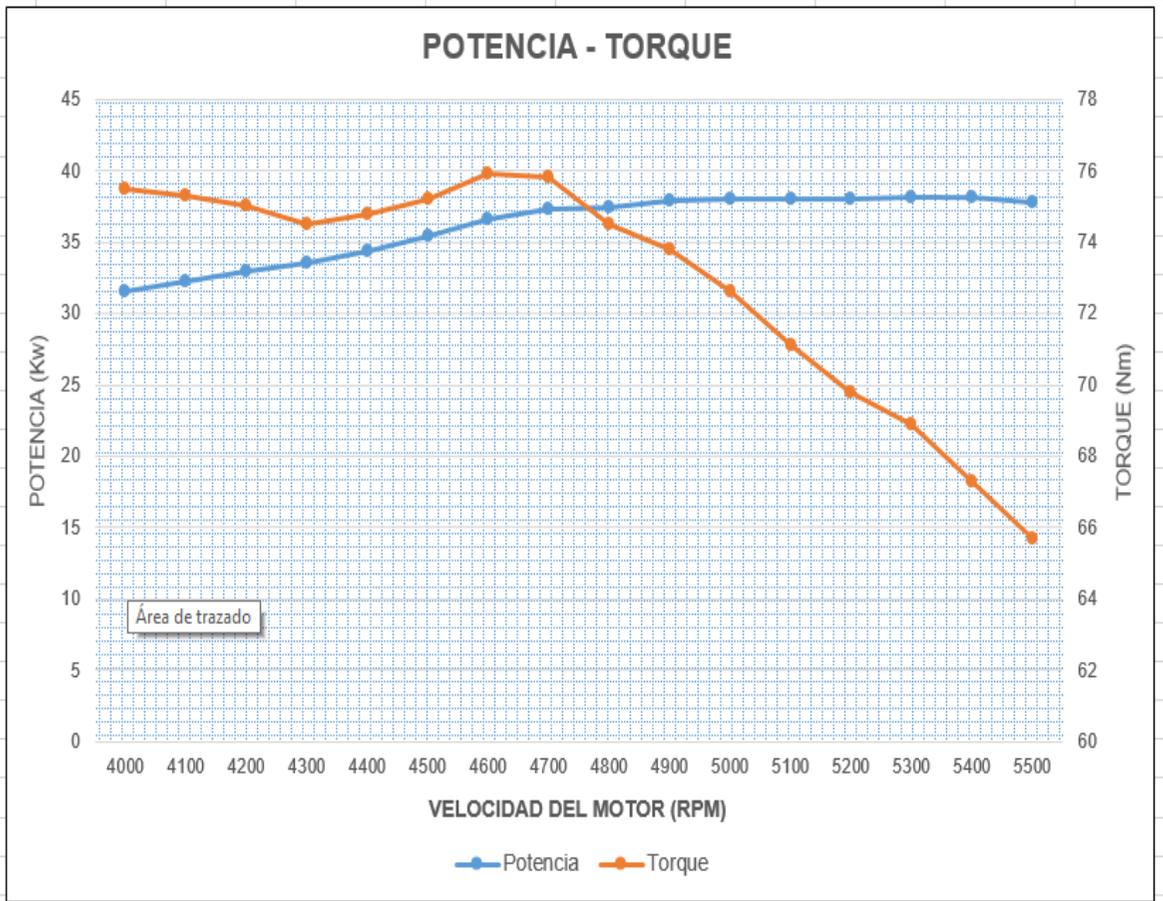
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	32,1	76,7
4100	32,5	76,2
4200	33,3	75,8
4300	34,4	76,3
4400	35,2	76,4
4500	36,3	77
4600	37	76,9
4700	37,9	77,1
4800	38,1	75,8
4900	38,5	75,1
5000	38,8	74,1
5100	39	72,9
5200	38,8	71,2
5300	39,1	70,4
5400	39	68,9
5500	38,6	67



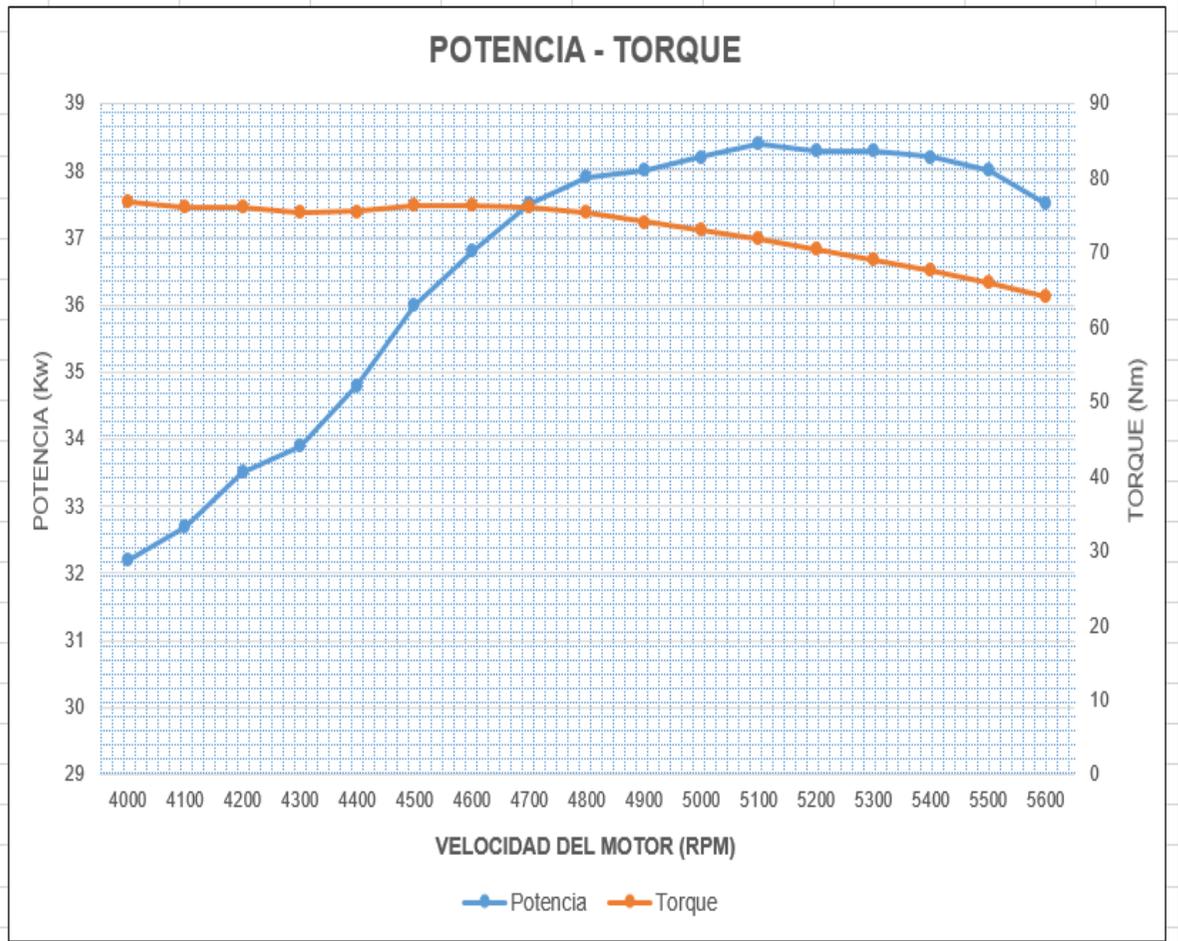
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	31,6	75,4
4100	32,4	75,4
4200	32,9	74,8
4300	33,7	74,8
4400	34,6	75,2
4500	35,6	75,6
4600	36,6	76,1
4700	37,2	75,7
4800	37,7	74,9
4900	37,9	73,9
5000	38,2	73
5100	38,2	71,5
5200	38,4	70,6
5300	38,6	69,5
5400	38,4	68
5500	38,2	66,3
5600	37,6	64,1



Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	31,6	75,5
4100	32,3	75,3
4200	33	75
4300	33,5	74,5
4400	34,4	74,8
4500	35,4	75,2
4600	36,6	75,9
4700	37,3	75,8
4800	37,4	74,5
4900	37,9	73,8
5000	38	72,6
5100	38	71,1
5200	38	69,8
5300	38,2	68,9
5400	38,1	67,3
5500	37,8	65,7

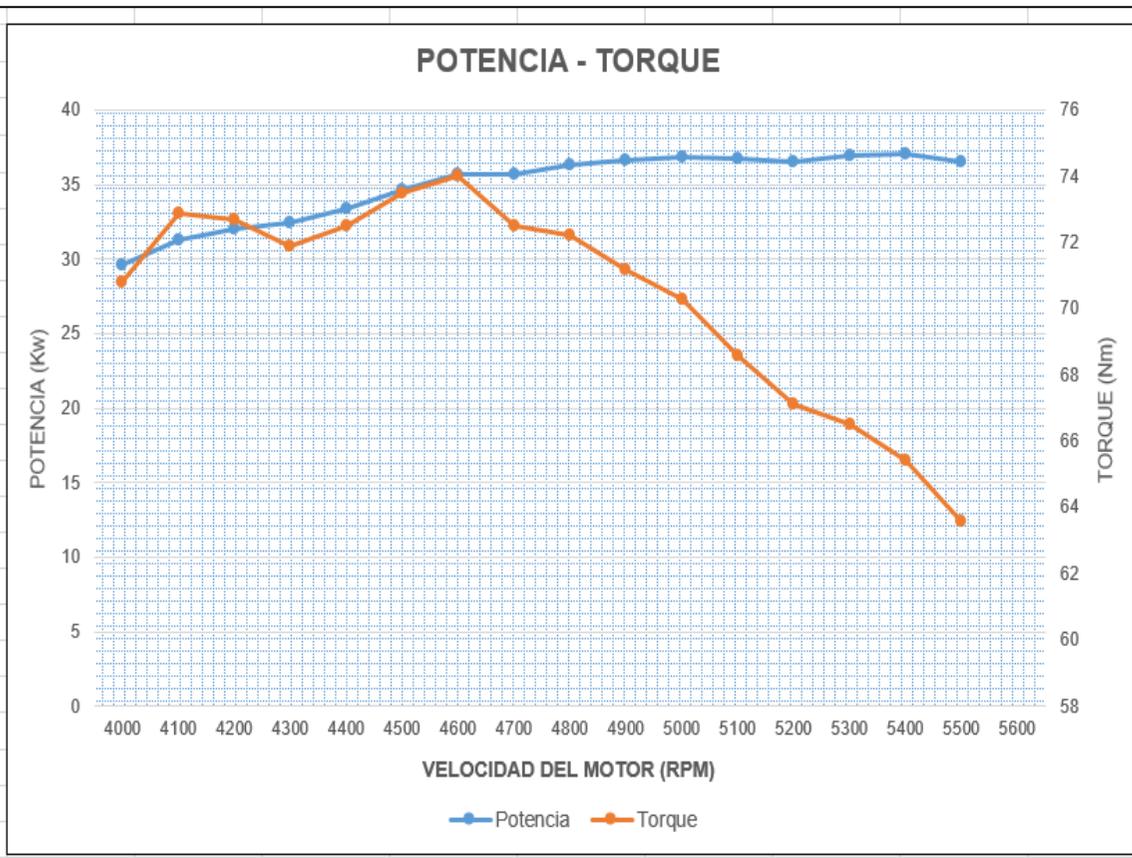


Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	32,2	76,9
4100	32,7	76,2
4200	33,5	76,1
4300	33,9	75,4
4400	34,8	75,5
4500	36	76,4
4600	36,8	76,4
4700	37,5	76,1
4800	37,9	75,4
4900	38	74,1
5000	38,2	73
5100	38,4	71,9
5200	38,3	70,4
5300	38,3	69,1
5400	38,2	67,6
5500	38	65,9
5600	37,5	64

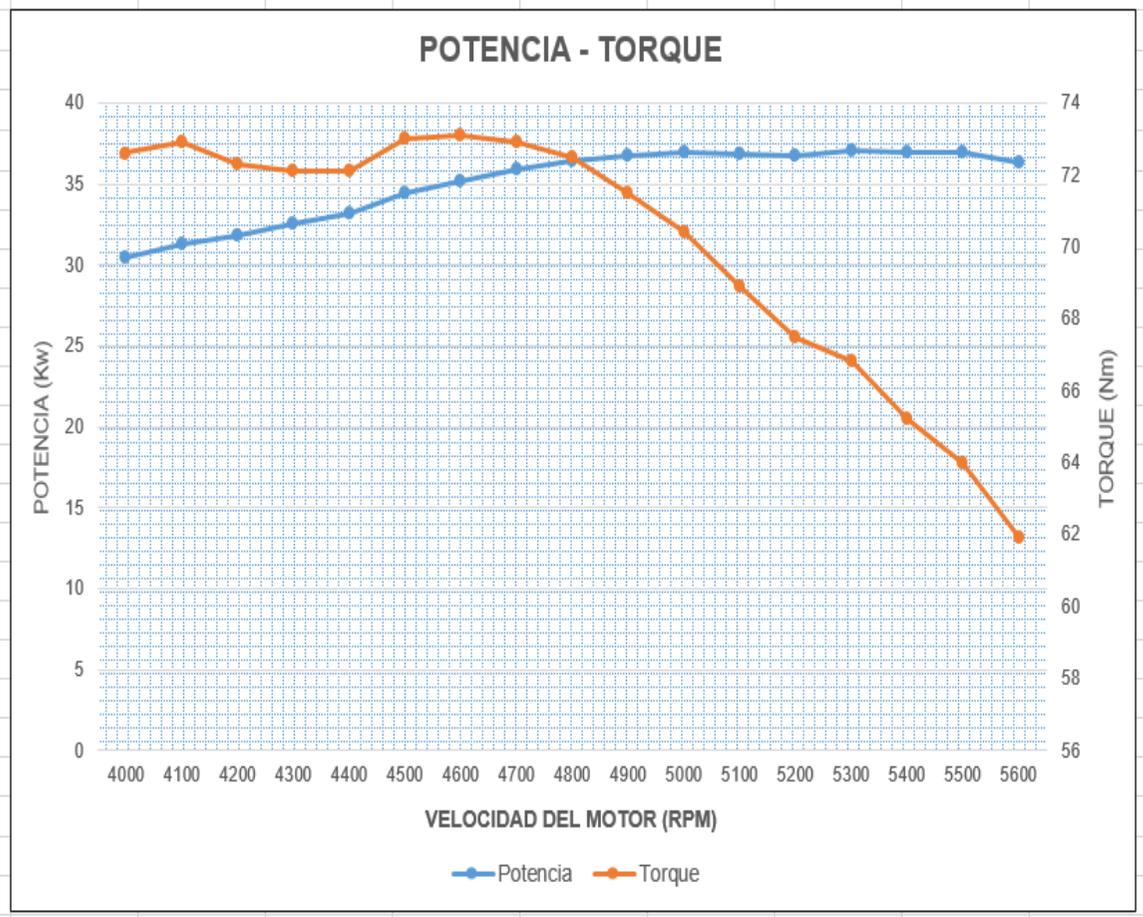


▪ Medición de la potencia con TI (6,50ms) AE (36,8°)

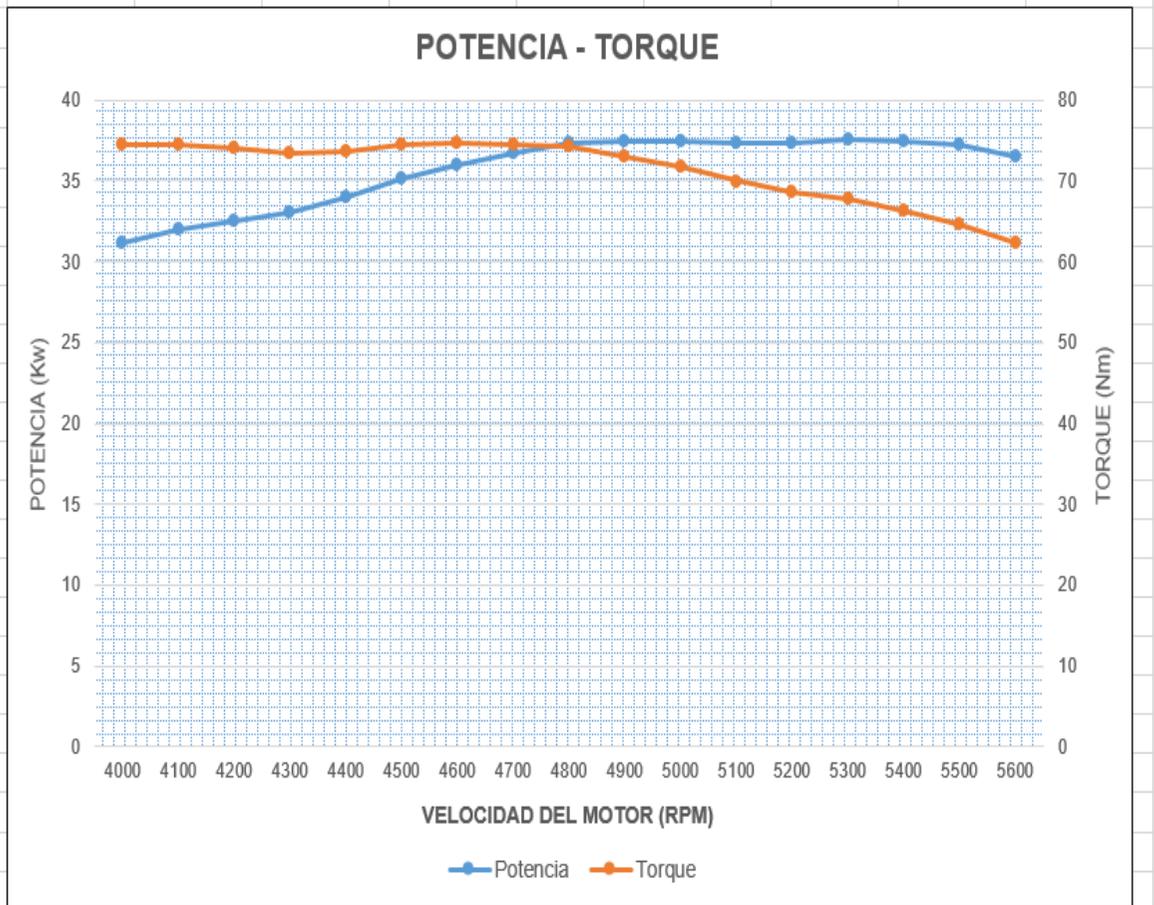
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	29,6	70,8
4100	31,3	72,9
4200	32	72,7
4300	32,4	71,9
4400	33,4	72,5
4500	34,6	73,5
4600	35,7	74
4700	35,7	72,5
4800	36,3	72,2
4900	36,6	71,2
5000	36,8	70,3
5100	36,7	68,6
5200	36,5	67,1
5300	36,9	66,5
5400	37	65,4
5500	36,5	63,6



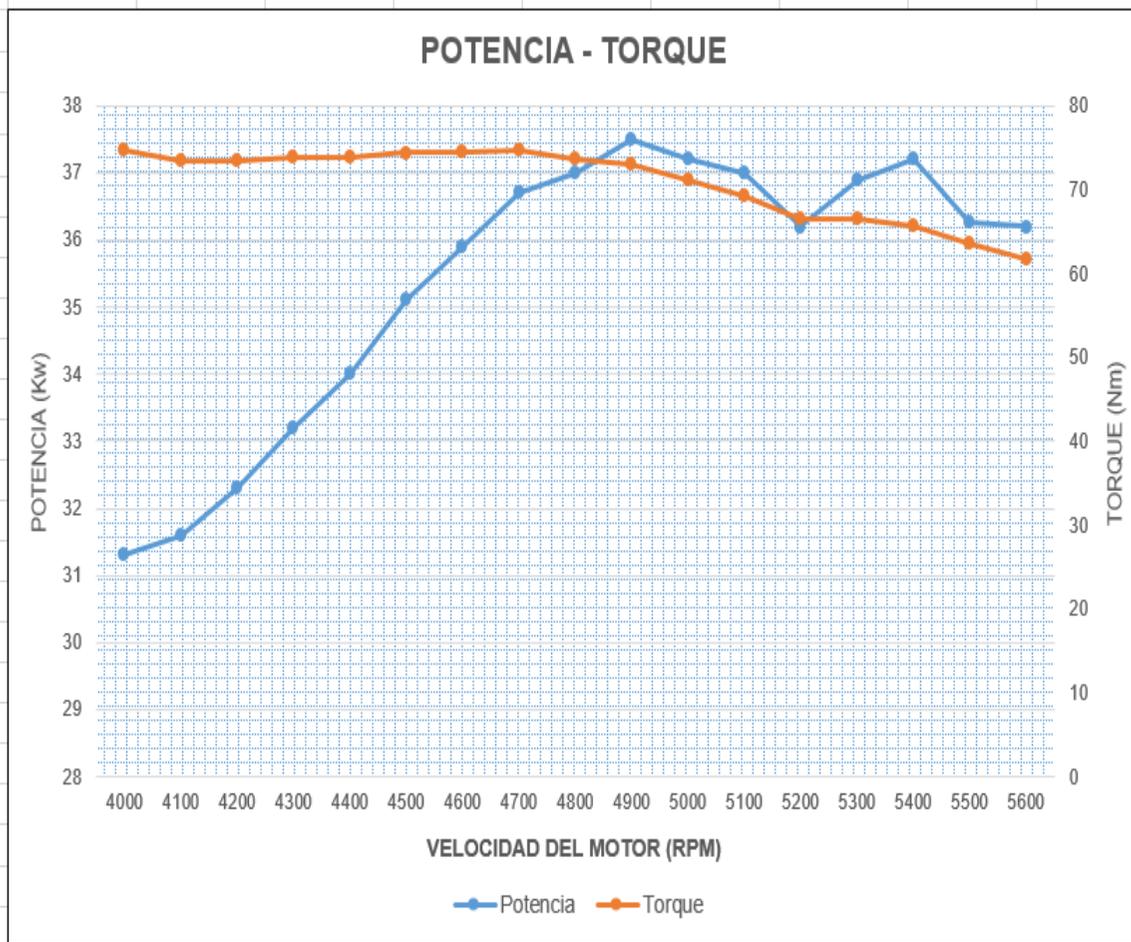
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	30,4	72,6
4100	31,3	72,9
4200	31,8	72,3
4300	32,5	72,1
4400	33,2	72,1
4500	34,4	73
4600	35,2	73,1
4700	35,9	72,9
4800	36,4	72,5
4900	36,7	71,5
5000	36,9	70,4
5100	36,8	68,9
5200	36,7	67,5
5300	37,1	66,8
5400	36,9	65,2
5500	36,9	64
5600	36,3	61,9



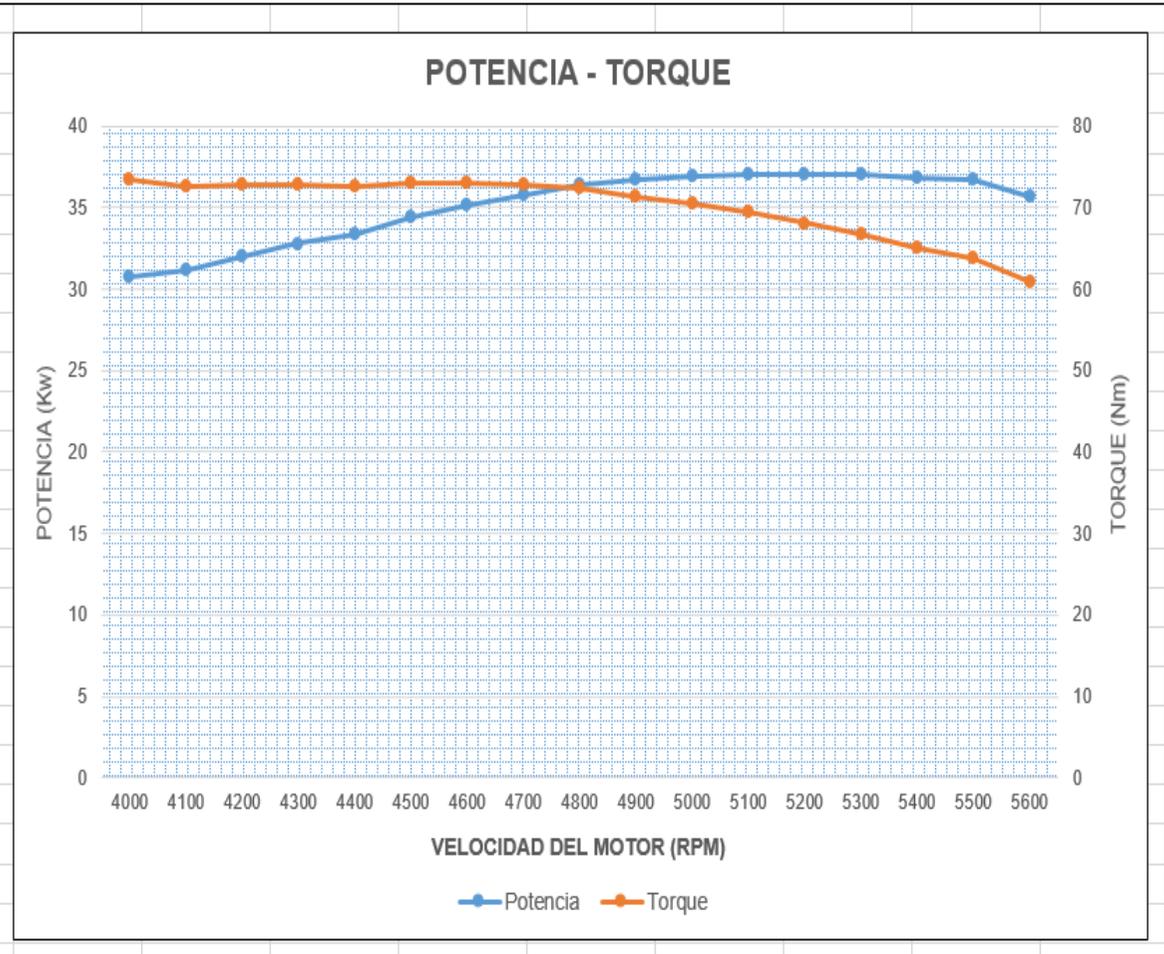
Velocidad del motor (RPM)	Potencia (Kw)	Torque (Nm)
4000	31,2	74,5
4100	32	74,5
4200	32,5	74
4300	33,1	73,5
4400	34	73,7
4500	35,2	74,6
4600	36	74,8
4700	36,7	74,6
4800	37,4	74,3
4900	37,5	73,1
5000	37,5	71,7
5100	37,4	70
5200	37,4	68,7
5300	37,6	67,8
5400	37,5	66,3
5500	37,3	64,7
5600	36,5	62,3



Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	31,3	74,8
4100	31,6	73,5
4200	32,3	73,5
4300	33,2	73,8
4400	34	73,8
4500	35,1	74,4
4600	35,9	74,6
4700	36,7	74,7
4800	37	73,6
4900	37,5	73,1
5000	37,2	71,1
5100	37	69,3
5200	36,2	66,5
5300	36,9	66,5
5400	37,2	65,7
5500	36,27	63,6
5600	36,2	61,8



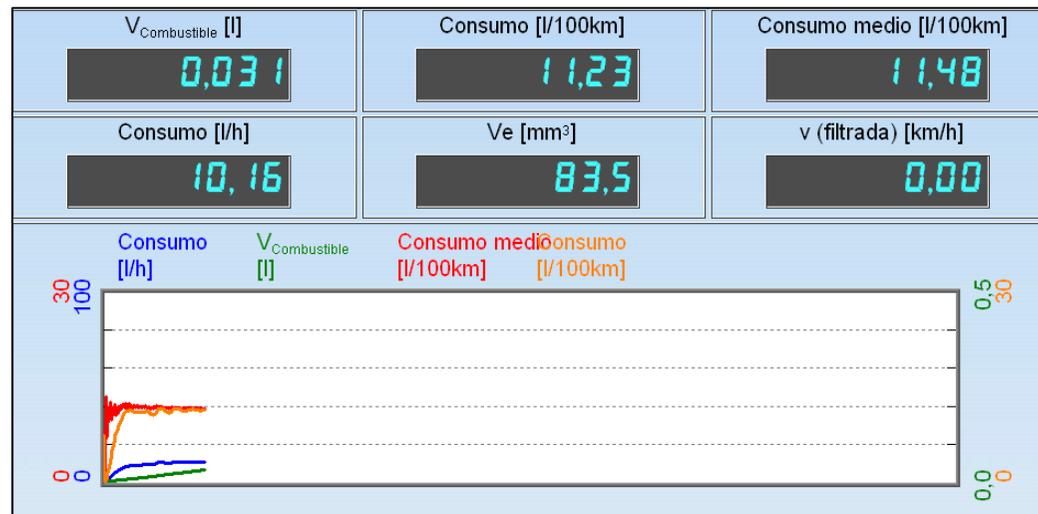
Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
4000	30,8	73,4
4100	31,2	72,7
4200	32	72,8
4300	32,8	72,8
4400	33,4	72,6
4500	34,4	73,1
4600	35,2	73,1
4700	35,8	72,8
4800	36,4	72,4
4900	36,7	71,4
5000	36,9	70,5
5100	37,1	69,4
5200	37,1	68,1
5300	37,1	66,8
5400	36,8	65,1
5500	36,7	63,8
5600	35,7	60,8

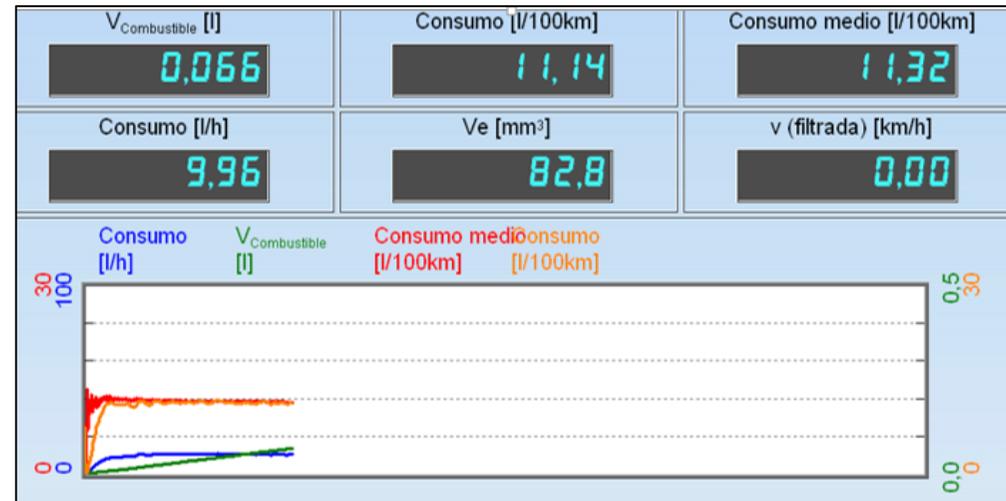


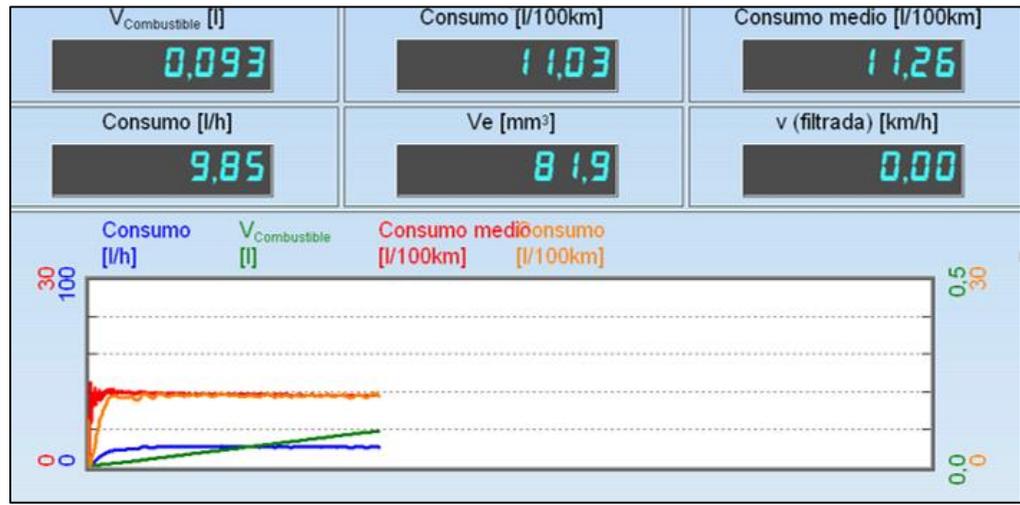
ANEXO A-2.

MUESTRAS DE CONSUMO DEL MOTOR

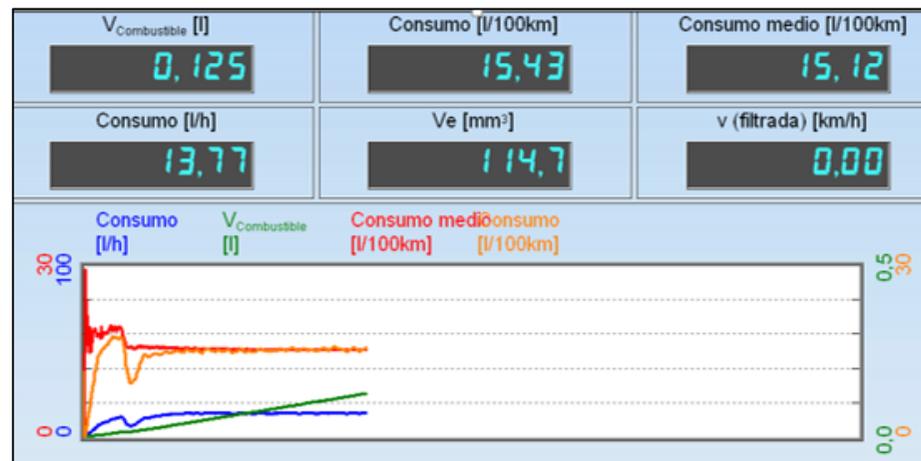
- Medición del consumo con TI (5,60ms) AE (34,70°)







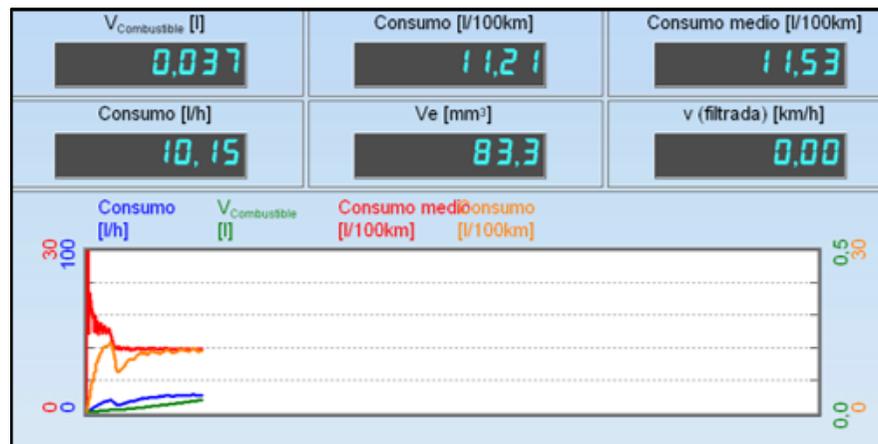
- Medición de la potencia con TI (7,41ms) AE (34,70°)

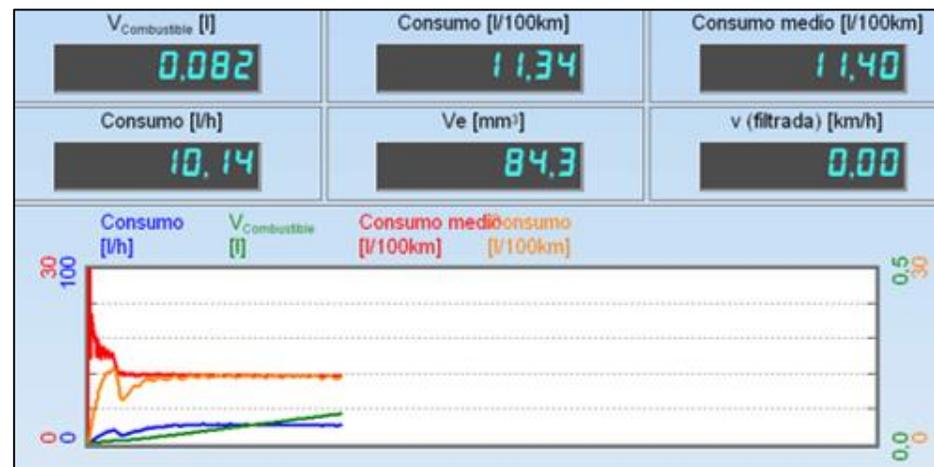


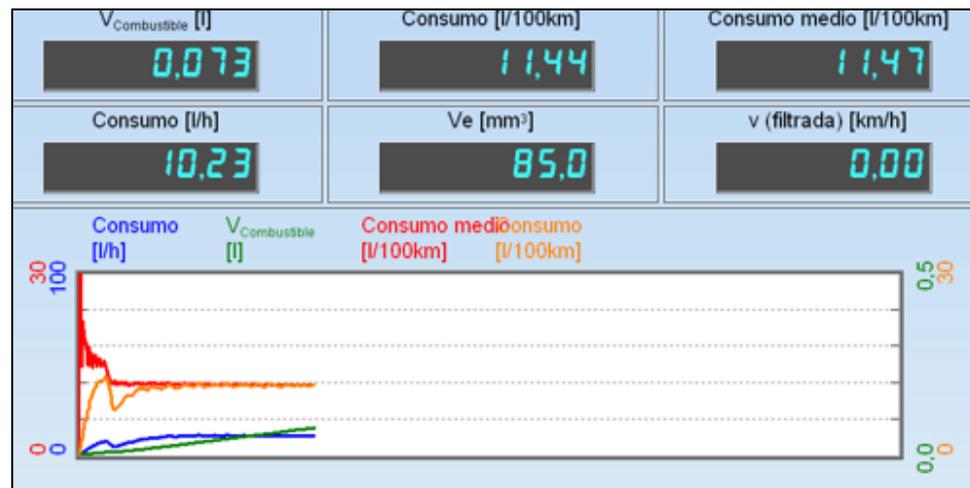




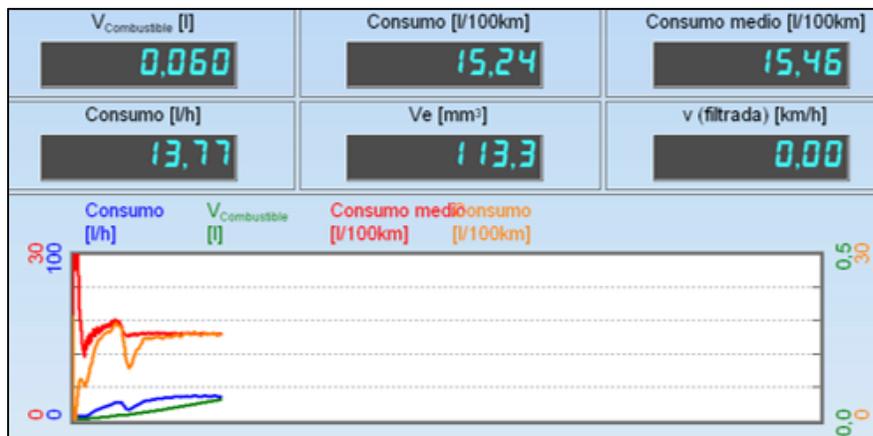
- Medición del consumo con TI (5,60ms) AE (38,90°)

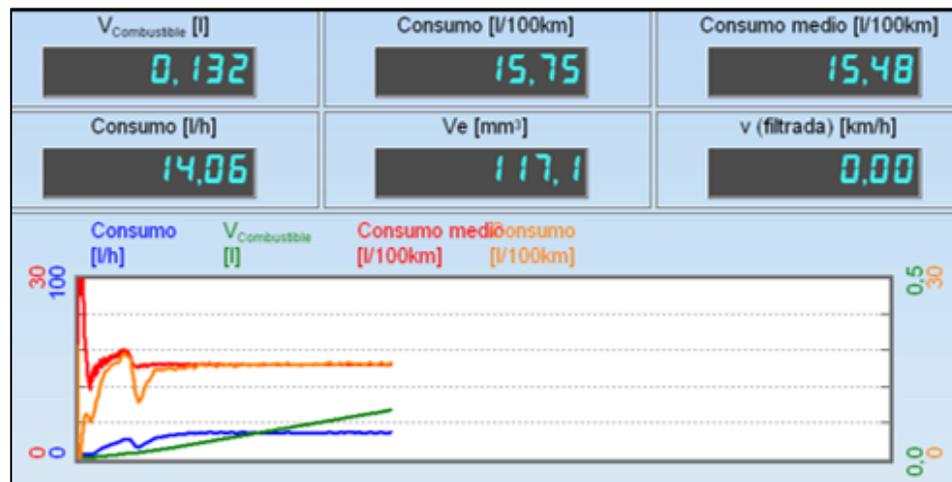


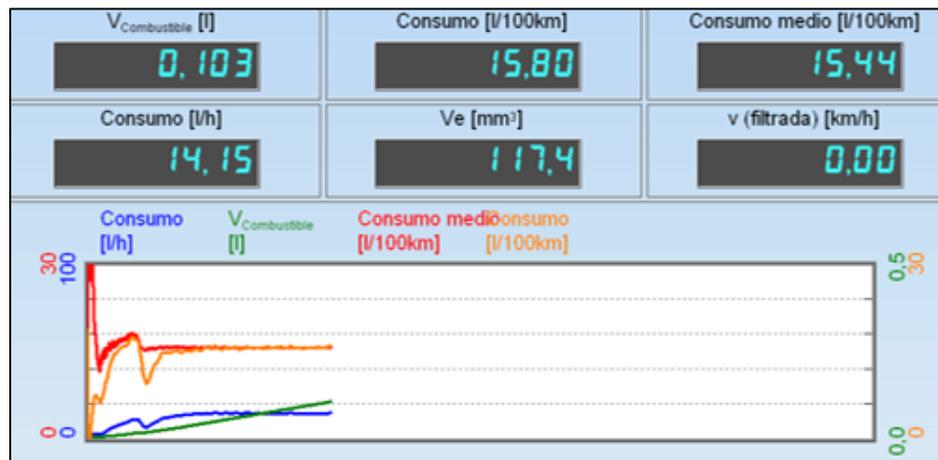




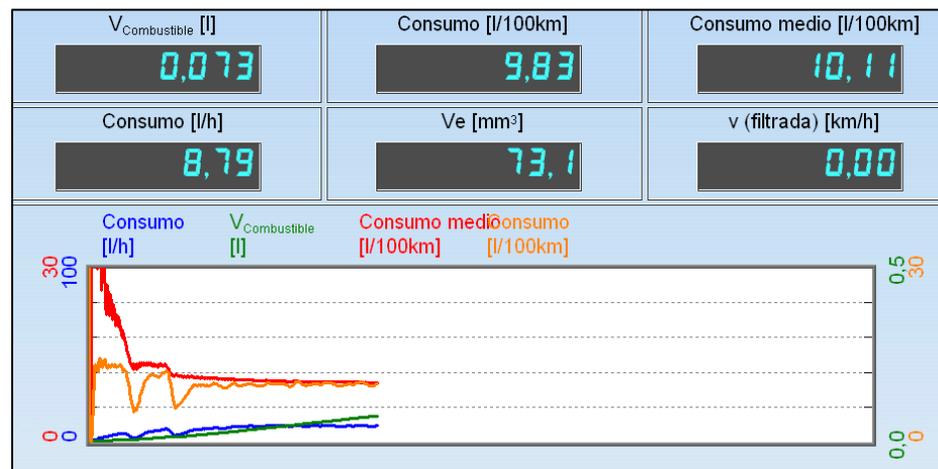
- Medición del consumo con TI (7,41ms) AE (38,90°)

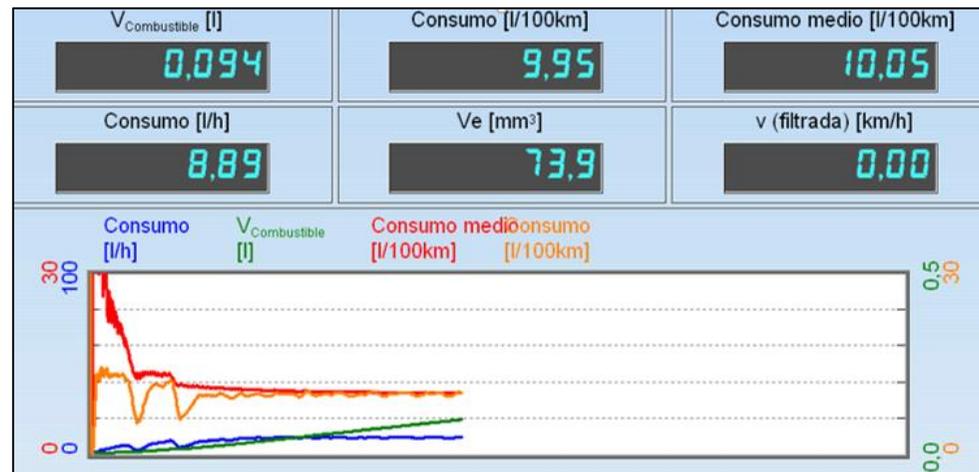
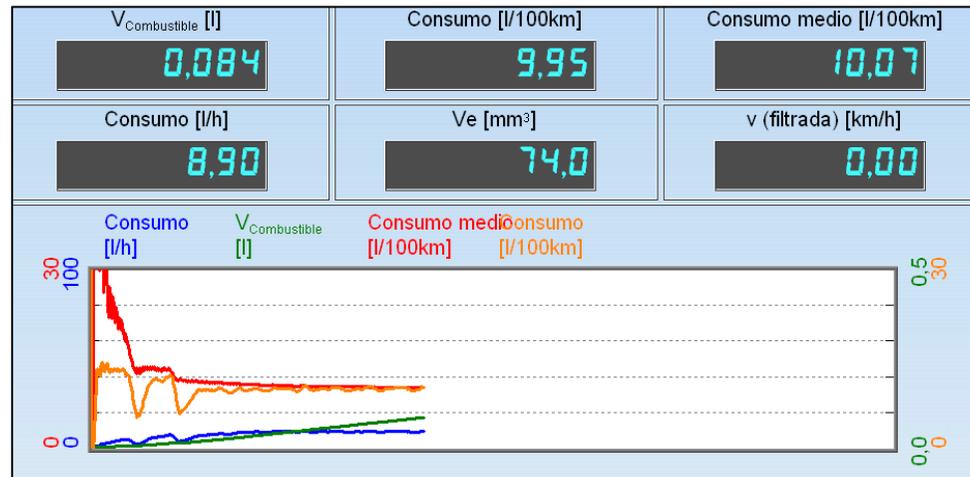


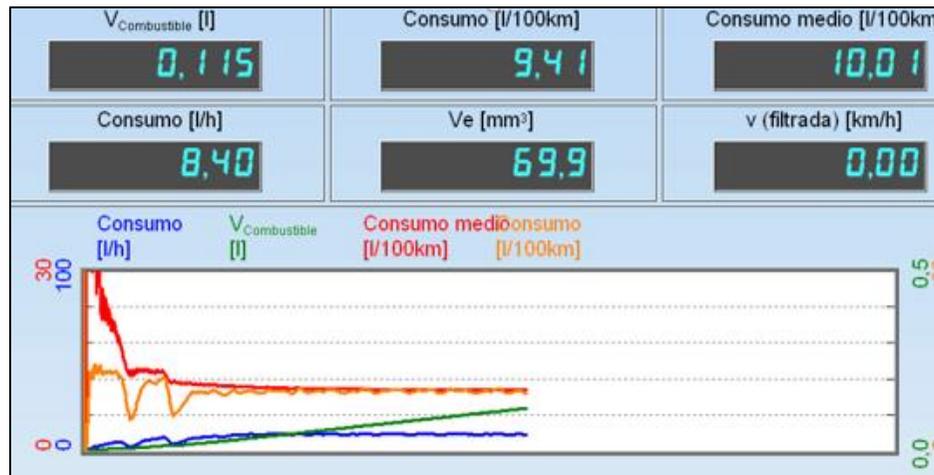
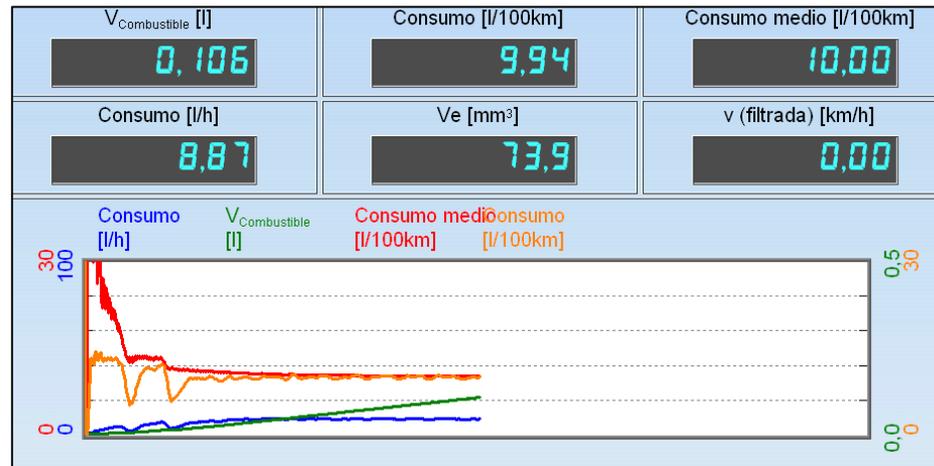




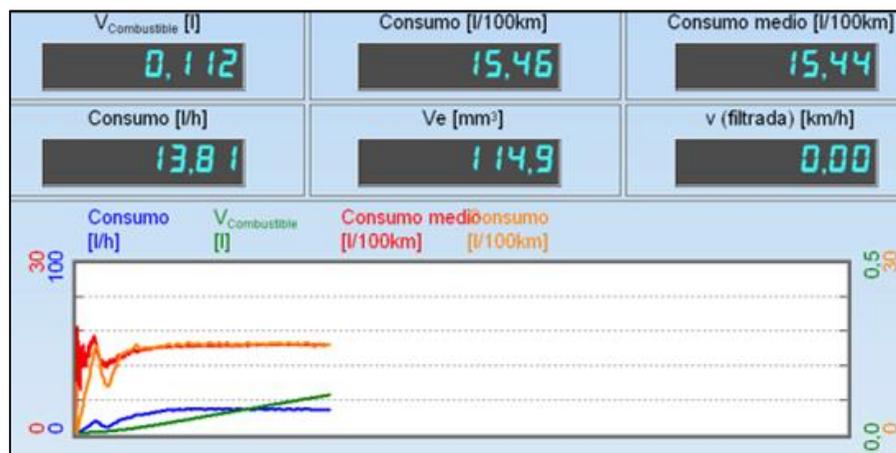
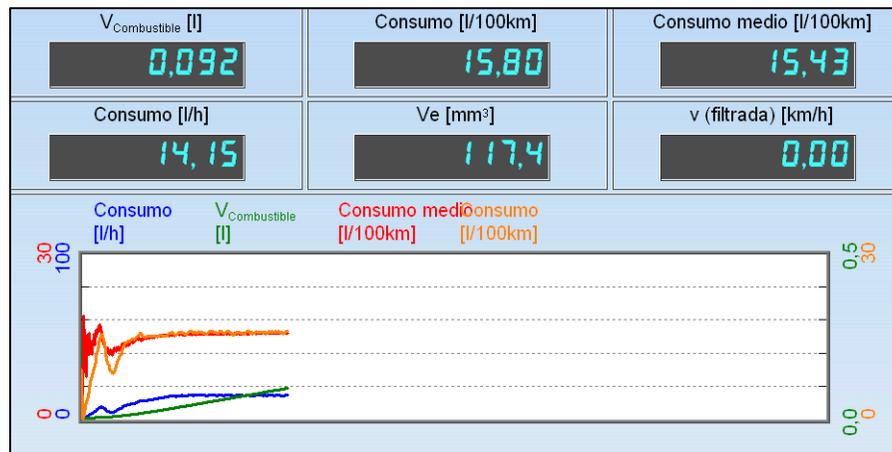
- Medición del consumo con TI (5,22ms) AE (36,8°)

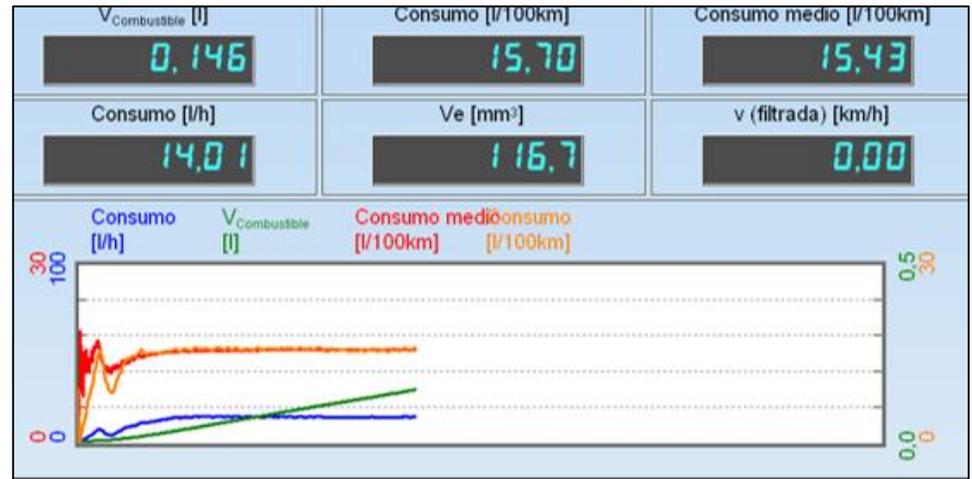
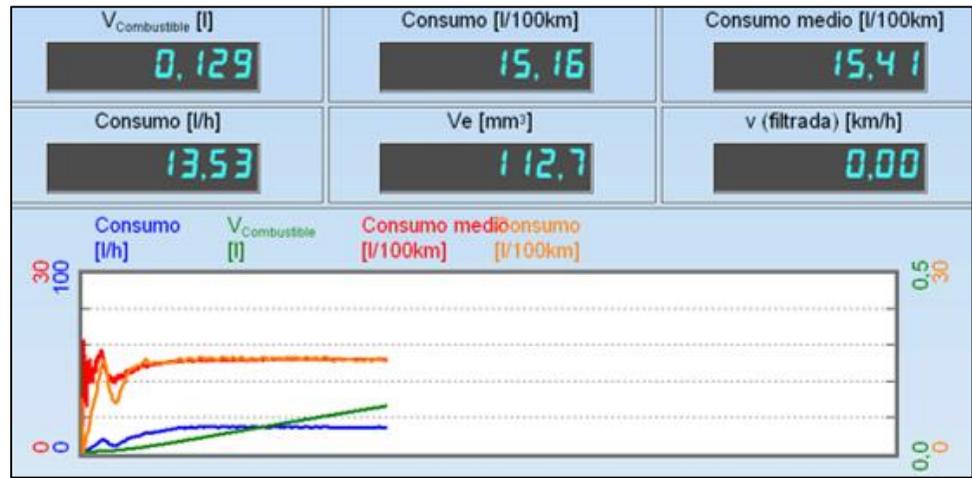






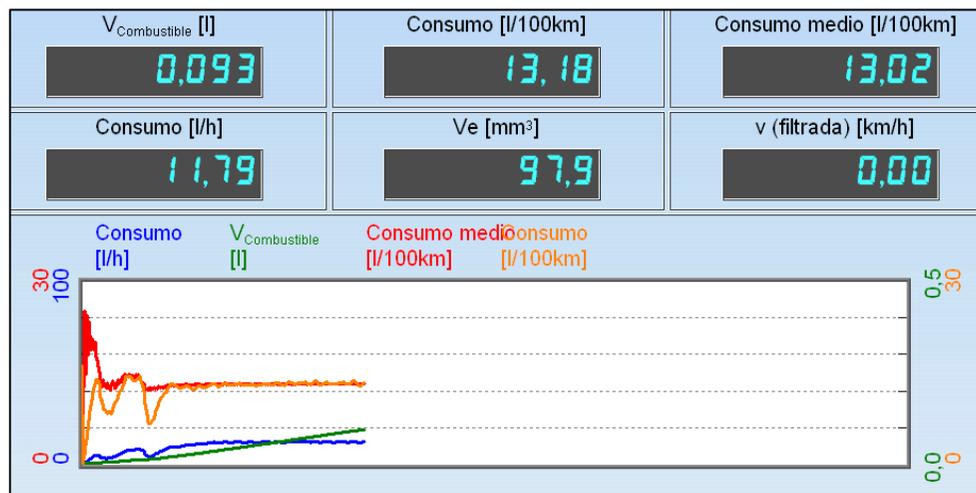
- Medición del consumo con TI (7,78ms) AE (36,8°)

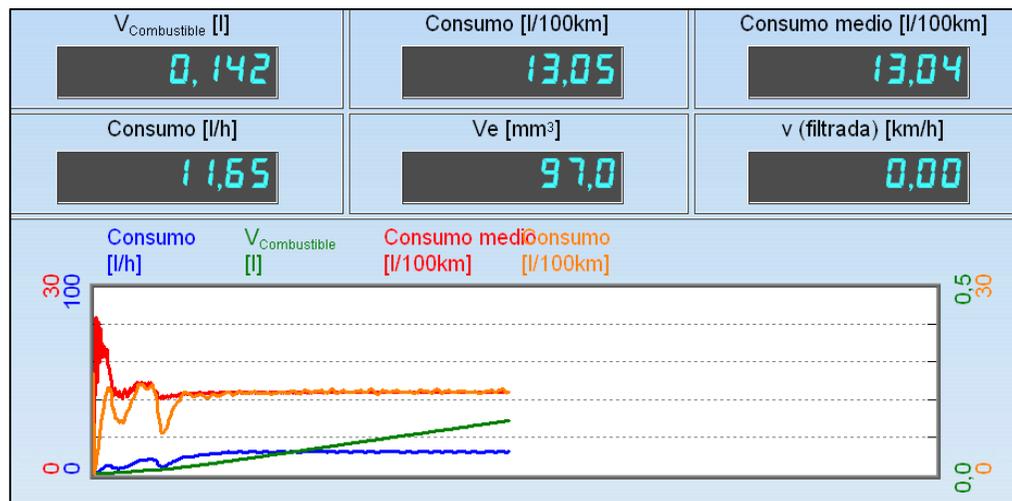
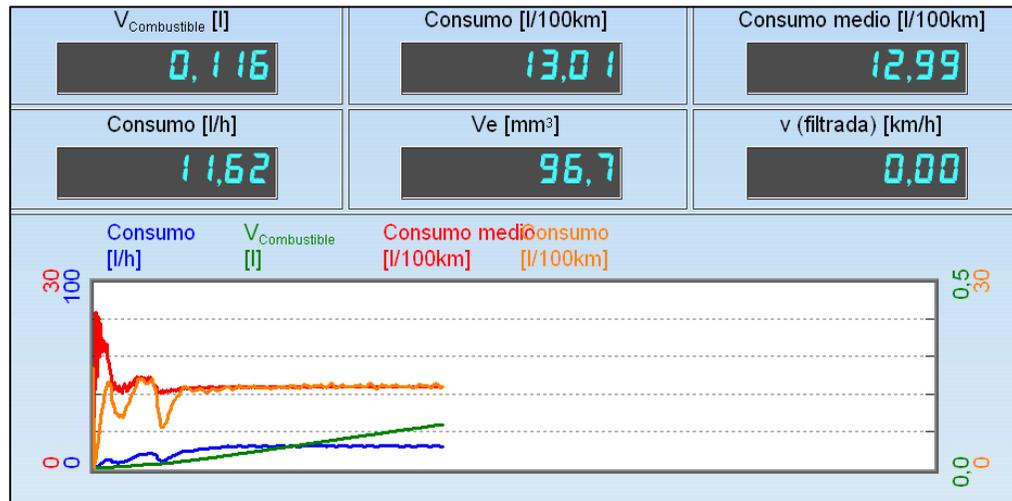


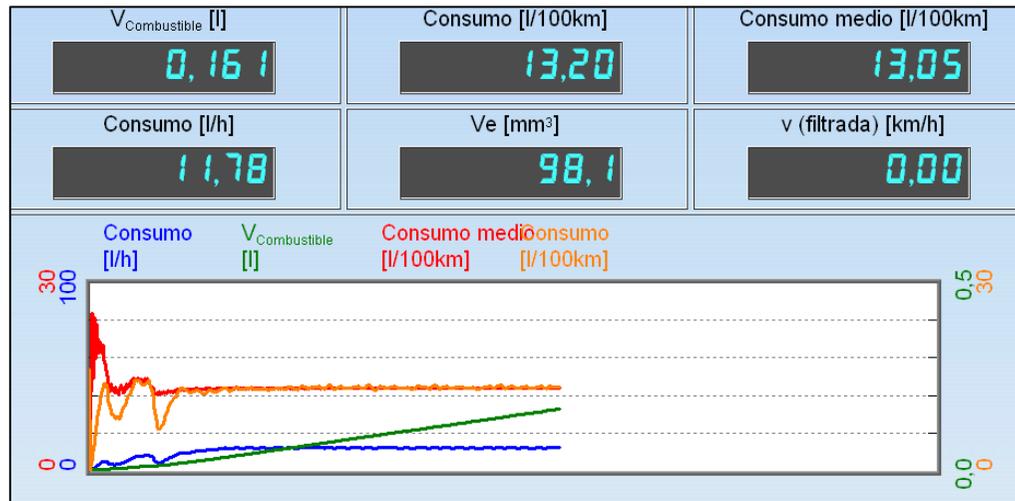




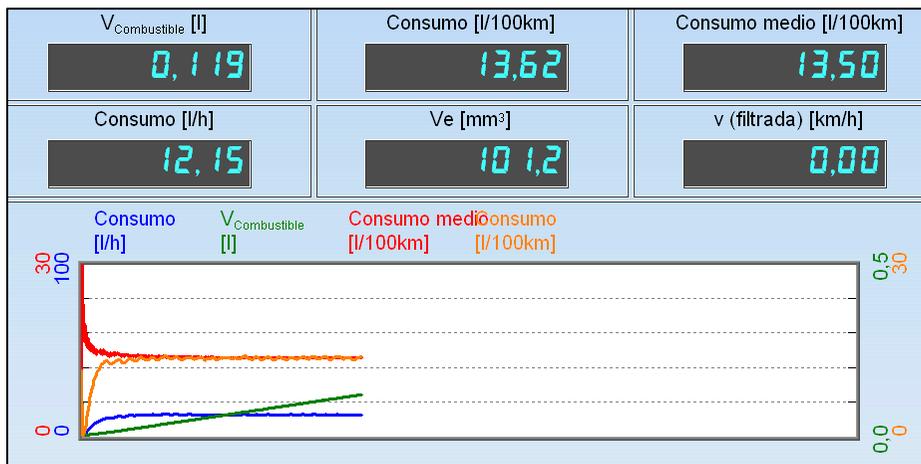
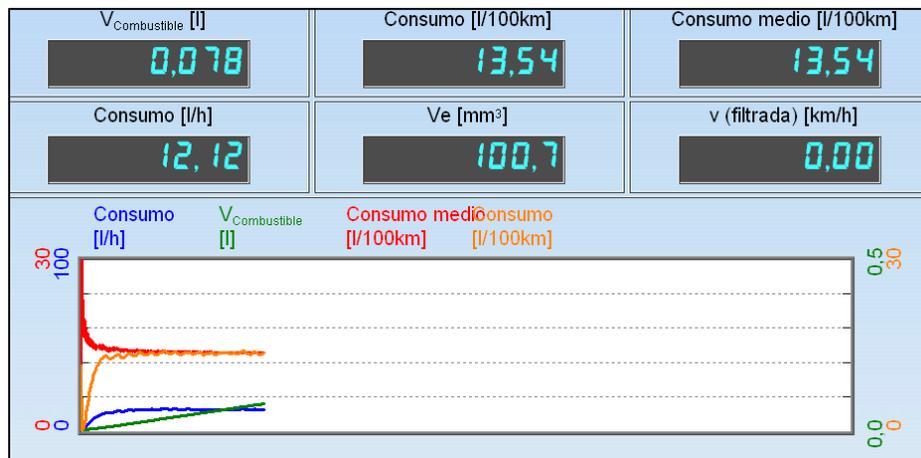
- Medición del consumo con TI (5,60ms) AE (33,83°)

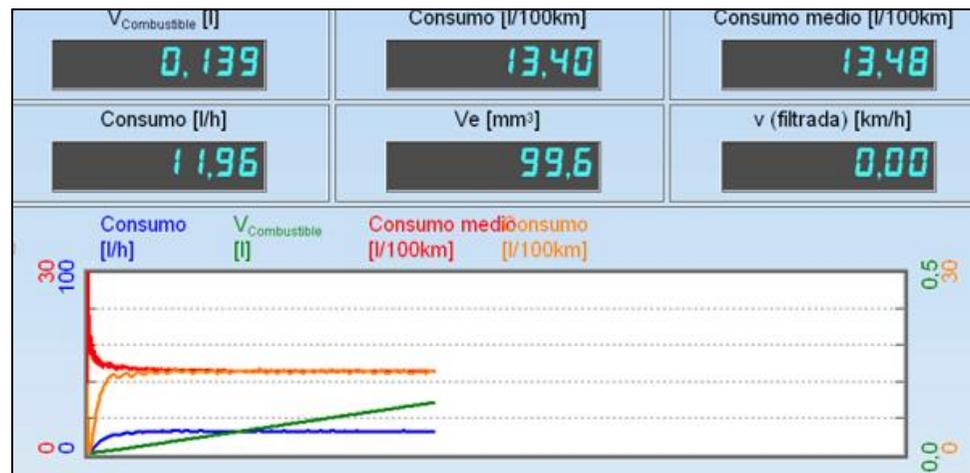


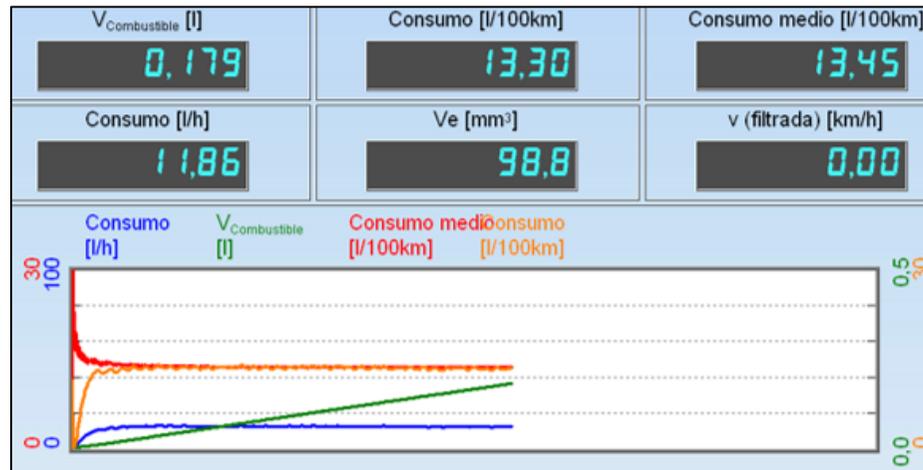




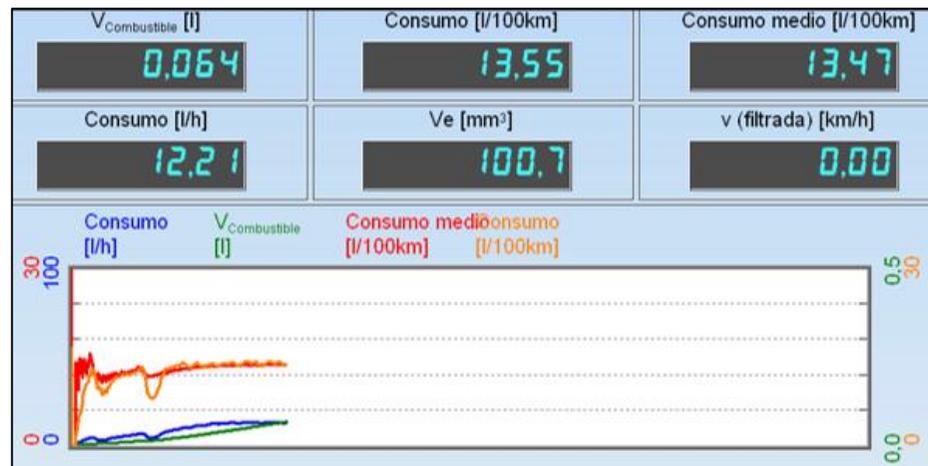
- Medición del consumo con TI (5,60ms) AE (39,76°)

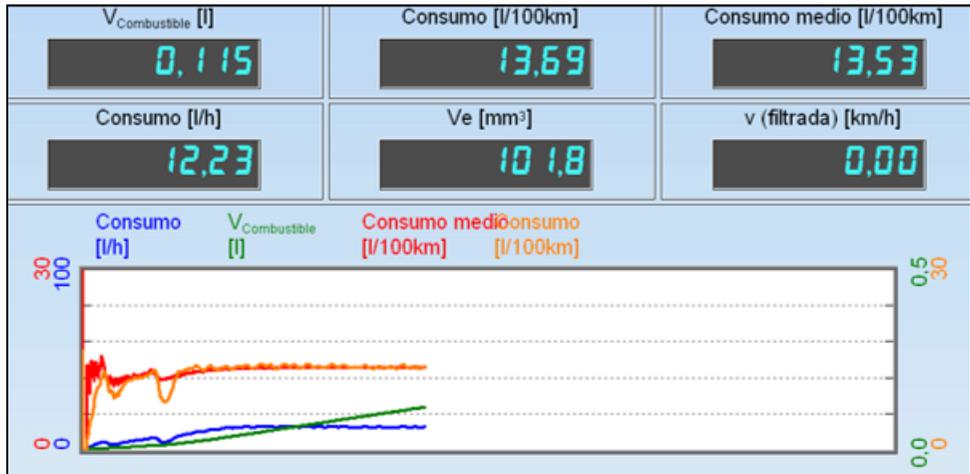
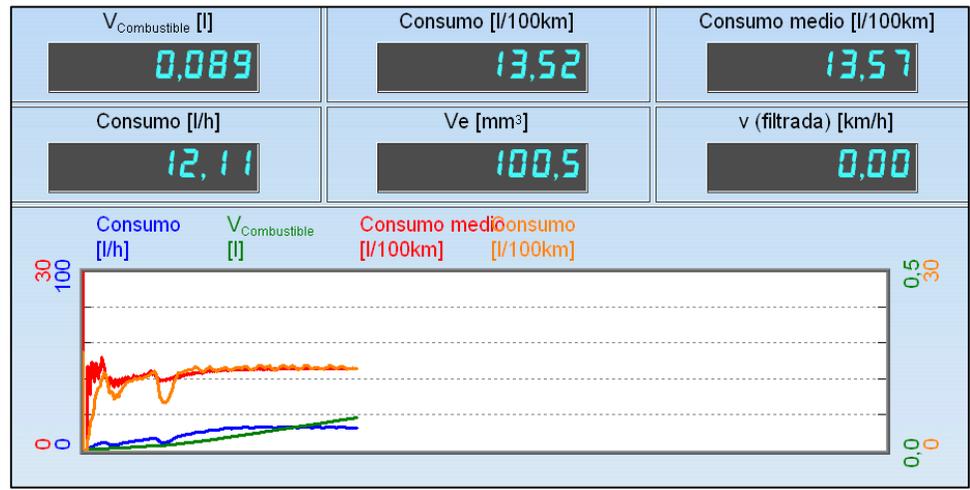


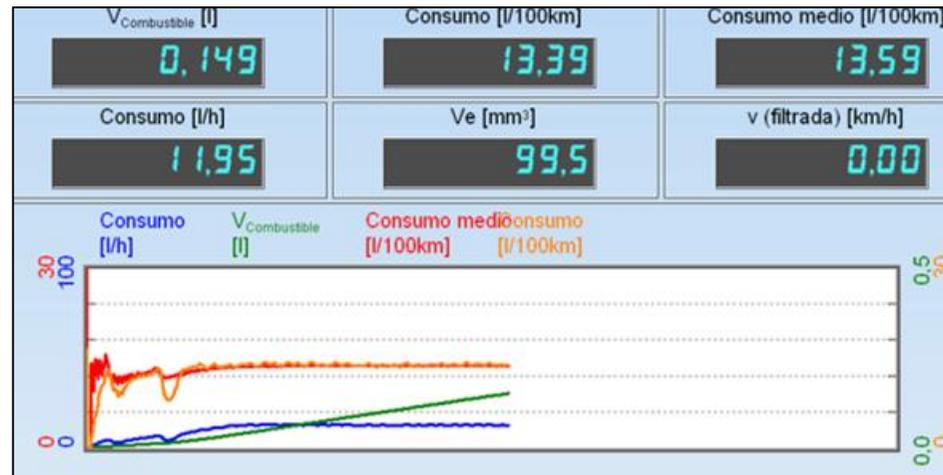




- Medición del consumo con TI (6,50ms) AE (36,8°)



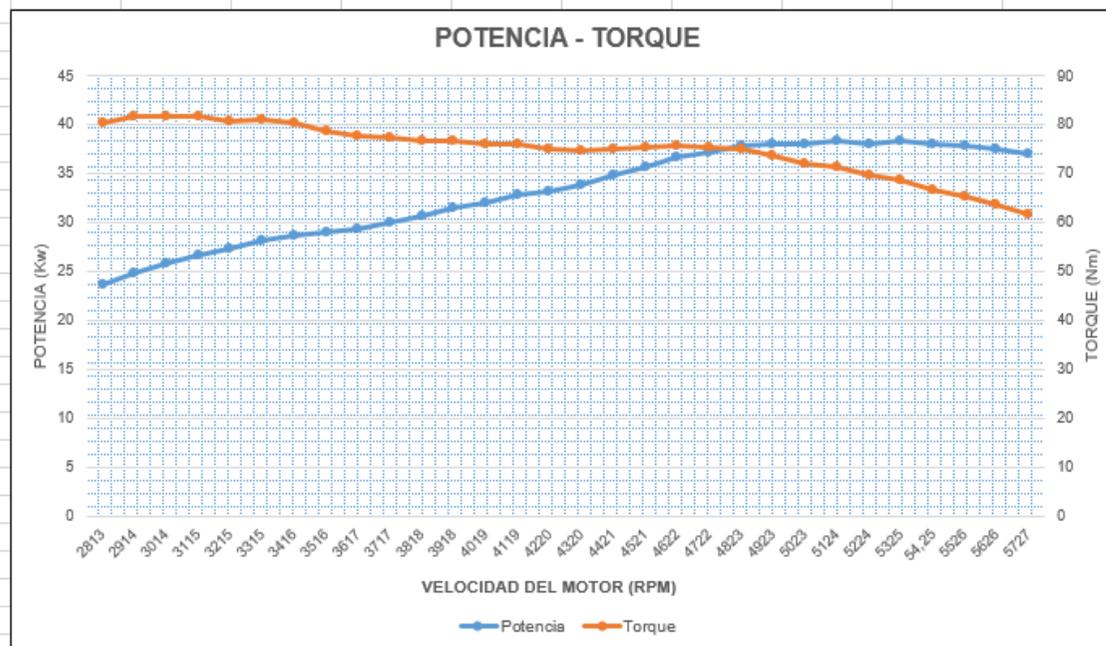




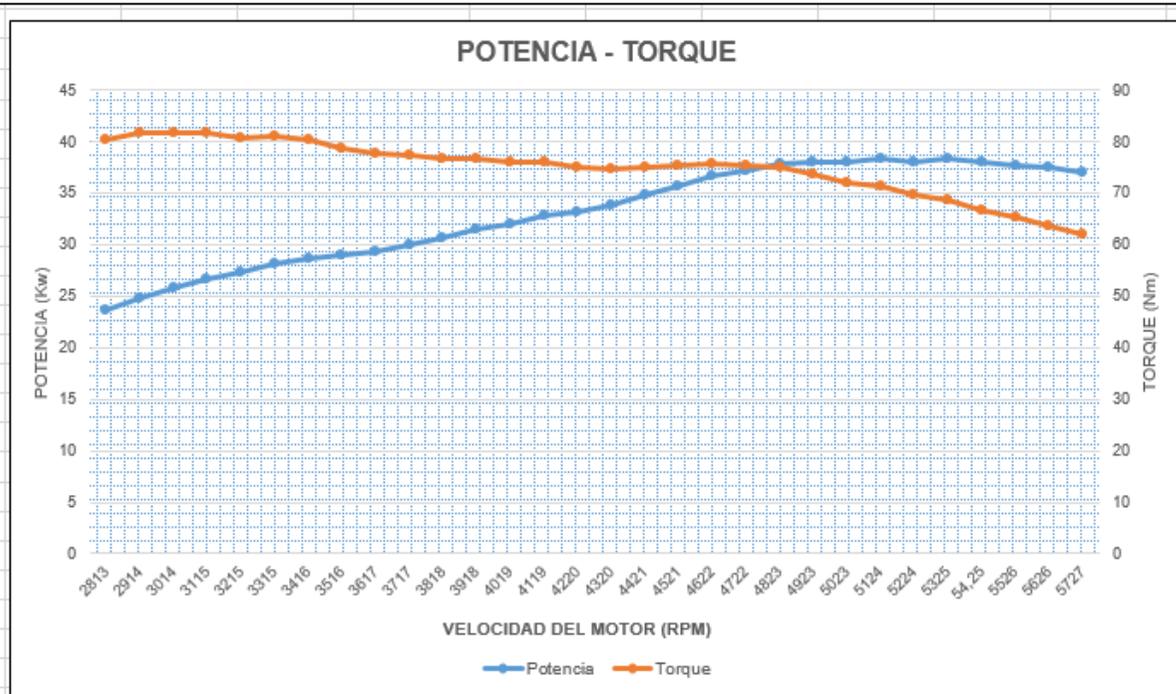
ANEXO A-3.

MUESTRAS DE POTENCIA DEL MOTOR OPTIMIZADO

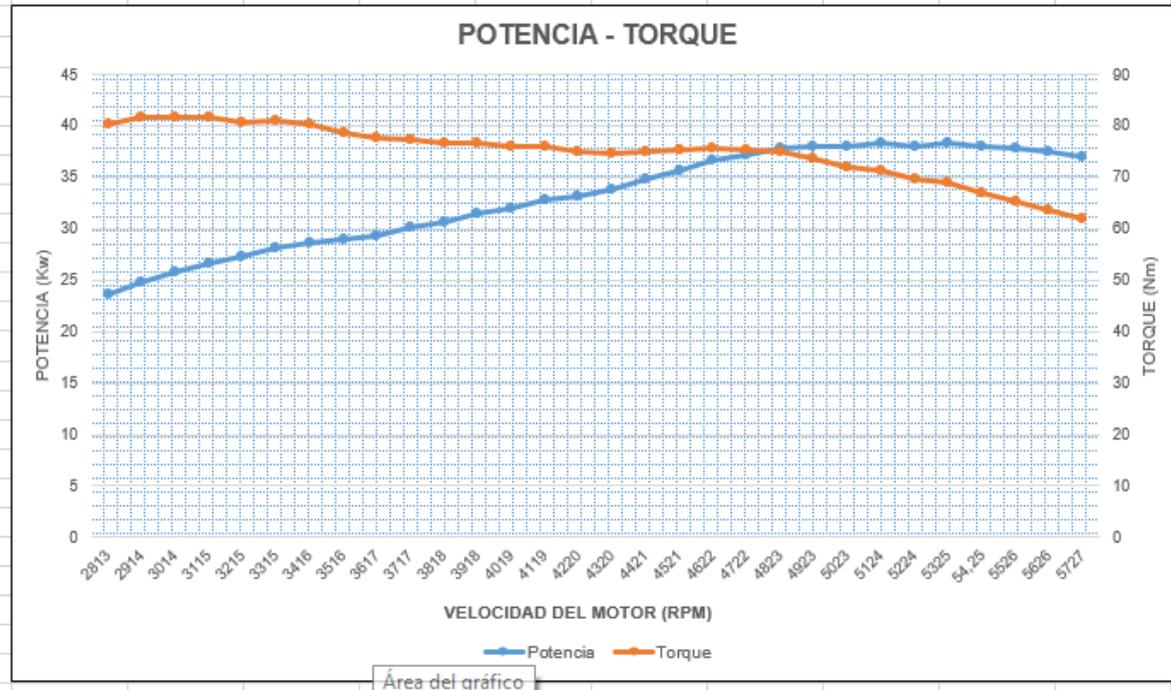
Velocidad del motor	Potencia	Torque
<i>(RPM)</i>	<i>(Kw)</i>	<i>(Nm)</i>
2813	23,7	80,5
2914	24,9	81,7
3014	25,8	81,8
3115	26,7	81,7
3215	27,3	80,9
3315	28,2	81,1
3416	28,7	80,4
3516	29	78,8
3617	29,4	77,7
3717	30,1	77,3
3818	30,7	76,9
3918	31,5	76,7
4019	32	76
4119	32,9	76,2
4220	33,2	75,1
4320	33,8	74,7
4421	34,8	75,2
4521	35,7	75,4
4622	36,7	75,8
4722	37,2	75,3
4823	37,9	75,1
4923	38	73,8
5023	38	72,2
5124	38,4	71,5
5224	38,1	69,6
5325	38,4	68,9
54,25	38	66,9
5526	37,8	65,3
5626	37,6	63,7
5727	37,1	61,9



Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
2813	24,1	81,6
2914	25,1	82,3
3014	26,3	83,2
3115	26,9	82,6
3215	27,6	82
3315	28,3	81,4
3416	28,9	80,9
3516	29,3	79,6
3617	29,7	78,4
3717	30,5	78,4
3818	31	77,6
3918	31,5	76,8
4019	32,2	76,5
4119	32,9	76,2
4220	33,3	75,4
4320	33,9	75
4421	34,7	75
4521	35,9	75,8
4622	36,6	75,7
4722	37,1	75,1
4823	37,6	74,5
4923	37,9	73,5
5023	38,2	72,7
5124	38	70,9
5224	37,9	69,2
5325	37,9	68
54,25	37,7	66,3
5526	37,6	65
5626	37,3	63,3

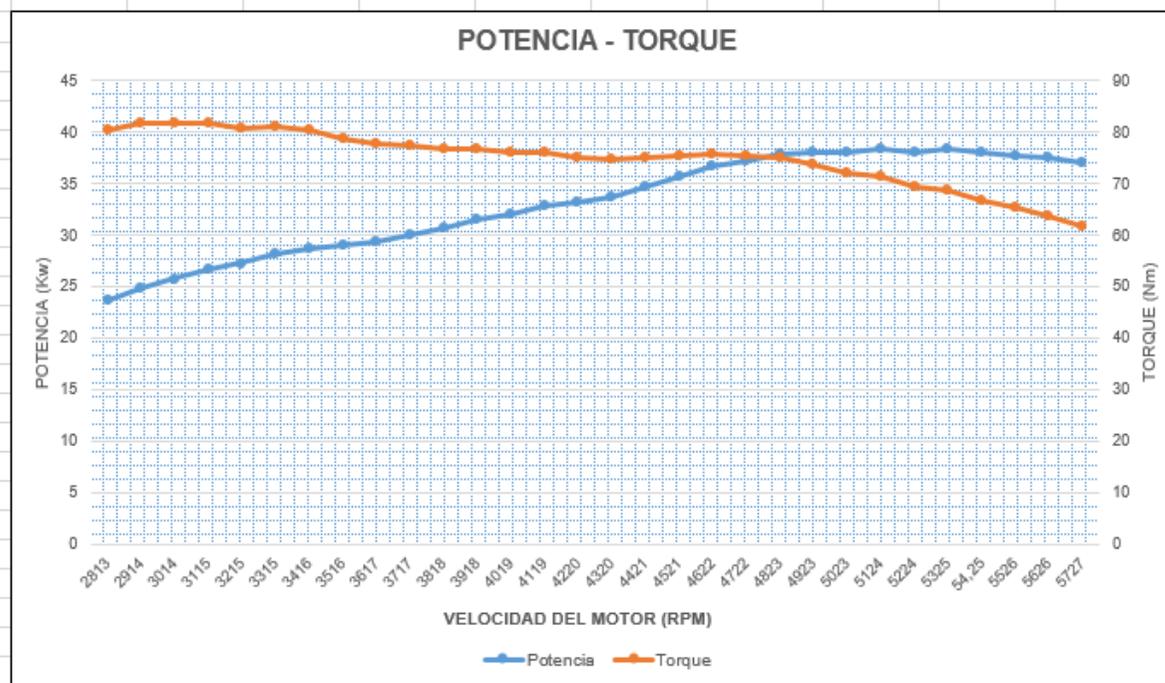


Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
2813	23,3	79,2
2914	24,5	80,3
3014	25,5	80,9
3115	26,2	80,3
3215	26,9	79,8
3315	27,7	79,8
3416	28,3	79
3516	28,8	78,3
3617	29,1	76,8
3717	30	77
3818	30,1	75,4
3918	30,6	74,6
4019	31,7	75,2
4119	32,2	74,7
4220	32,6	73,7
4320	33,5	74
4421	34,1	73,8
4521	34,9	73,8
4622	35,9	74,1
4722	36,6	74
4823	37,2	73,7
4923	37,2	72,1
5023	37,7	71,7
5124	37,4	69,7
5224	37,6	68,8
5325	37,4	67,1
54,25	37,5	66
5526	37	64

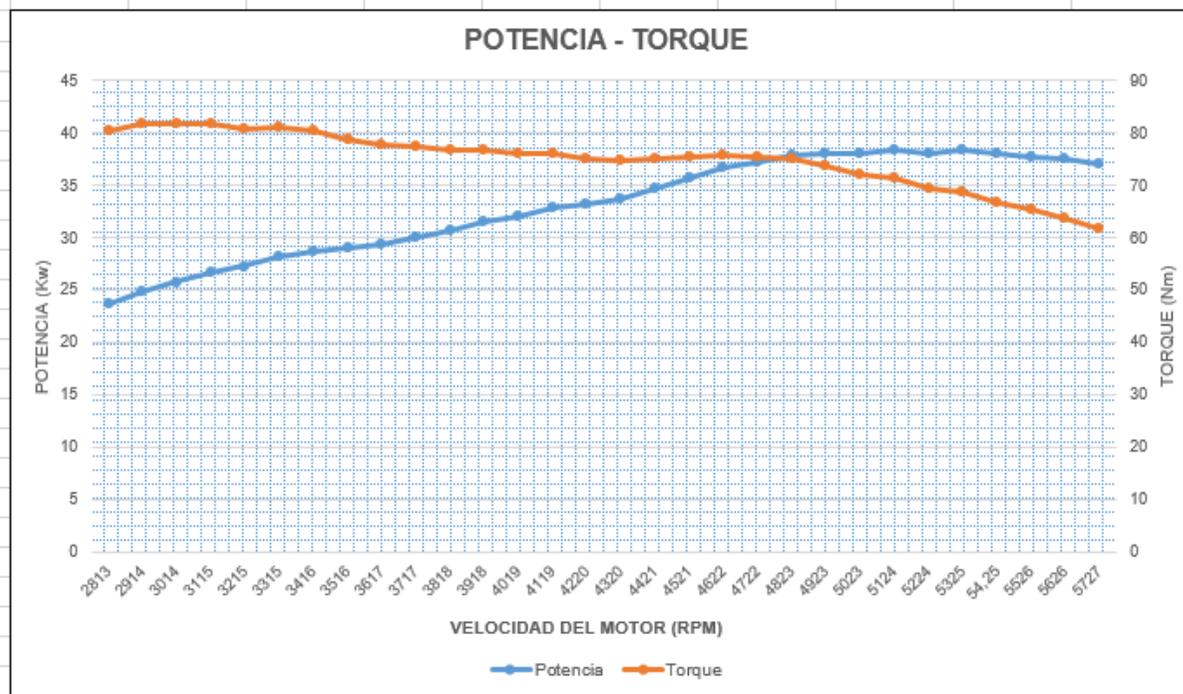


Área del gráfico

Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
2813	24,6	83,6
2914	25,4	83,2
3014	26,4	83,7
3115	27,3	83,7
3215	27,9	83
3315	28,9	83,1
3416	29,2	81,6
3516	29,8	80,9
3617	30	79,1
3717	30,7	78,9
3818	31,3	78,2
3918	31,8	77,5
4019	32,5	77,3
4119	33,2	77
4220	33,7	76,2
4320	34,2	75,6
4421	35,2	76
4521	36,4	76,9
4622	37,1	76,6
4722	37,7	76,2
4823	38,2	75,7
4923	38,5	74,7
5023	38,7	73,6
5124	38,9	72,4
5224	38,7	70,8
5325	38,6	69,2
54,25	38	66,8
5526	37,8	65,3
5626	37,7	64,1
5727	36,8	61,4



Velocidad del motor	Potencia	Torque
(RPM)	(Kw)	(Nm)
2813	24,4	82,7
2914	25,4	83,2
3014	26,5	83,8
3115	27,1	83,2
3215	28,1	83,5
3315	28,4	81,8
3416	29,3	81,8
3516	29,6	80,3
3617	30,2	79,8
3717	30,5	78,3
3818	31,2	78
3918	32	78
4019	32,2	76,6
4119	33	76,6
4220	33,8	76,4
4320	34,2	75,6
4421	34,9	75,4
4521	36,3	76,6
4622	37	76,5
4722	37,5	75,8
4823	38,1	75,5
4923	38,4	74,5
5023	38,3	72,7
5124	38,7	72,1
5224	38,5	70,4
5325	38,6	69,2
54,25	38,5	67,7
5526	38	65,7
5626	38	64,5
5727	37,6	62,7



ANEXO A-4.

MUESTRAS DE CONSUMO DEL MOTOR OPTIMIZADO

