

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

**COMPORTAMIENTO DE LAS
DETONACIONES EN UN MOTOR DE
ENCENDIDO PROVOCADO AL USAR
MEZCLAS DE GASOLINA – ETANOL (MEG),
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE DISEÑO DE
EXPERIMENTOS (DOE)**

**DETONATION BEHAVIOR IN A SPARK-IGNITION
ENGINE CAUSED BY USING GASOLINE – ETHANOL
(MEG) BLENDS THROUGH THE APPLICATION
OF DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)**

Diego Alejandro Jumbo Iñiguez

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Christian Andrés Caraguay Correa

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Erik René Tapia Viñán

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Elmer Israel Arias Montaña

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Kléver Sebastián Quizhpi Salamea

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12380

Comportamiento de las Detonaciones en un Motor de Encendido Provocado al usar Mezclas de Gasolina – Etanol (MEG), mediante la Aplicación de Diseño de Experimentos (DoE)

Diego Alejandro Jumbo Iñiguez¹

diego.jumbo@unl.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9706-2950>

Universidad Nacional de Loja

Grupo de Investigación Scientific Experiences in
Mobility, Vehicles and Transport - eX-MoVeT

Loja – Ecuador

Christian Andrés Caraguay Correa

christian.caraguay@unl.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-9644-3589>

Universidad Nacional de Loja

Grupo de Investigación Scientific Experiences in
Mobility, Vehicles and Transport - eX-MoVeT

Loja – Ecuador

Erik René Tapia Viñán

erik.tapia@unl.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-5644-370X>

Universidad Nacional de Loja

Grupo de Investigación Scientific Experiences in
Mobility, Vehicles and Transport - eX-MoVeT

Loja – Ecuador

Elmer Israel Arias Montaña

elmer.arias@unl.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1033-8892>

Universidad Nacional de Loja

Grupo de Investigación Scientific Experiences in
Mobility, Vehicles and Transport - eX-MoVeT

Loja – Ecuador

Kléver Sebastián Quizhpi Salamea

klever.quizhpi@unl.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0008-6962-2701>

Universidad Nacional de Loja

Grupo de Investigación Scientific Experiences in
Mobility, Vehicles and Transport - eX-MoVeT

Loja – Ecuador

RESUMEN

El uso de MEG se han desarrollado como una potencial estrategia para la reducción del nivel de emisiones de CO₂ producto del funcionamiento de los motores de encendido provocado (MEP). Las detonaciones que ocurren durante el funcionamiento de un MEP, se producen por una combustión espontánea en el interior del cilindro debido a la autoignición del combustible, por esto monitorear el comportamiento de las detonaciones es importante, debido a que genera problemas mecánicos en el motor. En esta investigación se busca determinar el comportamiento de las detonaciones que ocurren en un MEP aplicando diferentes porcentajes de mezcla de etanol con gasolina súper mediante la aplicación de DoE factorial 3². El experimento se lleva a cabo en un motor instrumental 2.0L monitorizado a través del uso de un escáner y osciloscopio automotriz. Para esto se consideran dos variables de estudio: porcentaje de etanol en la mezcla (E0, E5, E15) y diferentes regímenes de giro del motor (750, 2500, 3000 rpm). La variable de respuesta es el nivel de detonación en el interior del cilindro. Una vez obtenido el DoE, se procede con los ensayos en el motor; luego mediante el análisis de datos de los resultados en un software estadístico, se obtiene el modelado matemático predictivo. Al final de la investigación se establece que la variación del nivel de las detonaciones en el MEP es directamente proporcional al porcentaje de etanol en la mezcla e inversamente proporcional al régimen de giro del motor.

Palabras clave: detonación, etanol, gasolina, diseño de experimentos

¹ Autor principal.

Correspondencia: diego.jumbo@unl.edu.ec

Detonation Behavior in a Spark-Ignition Engine Caused by using Gasoline – Ethanol (MEG) Blendings through the Application of Design of Experiments (DoE)

ABSTRACT

The use of MEG has been developed as a potential strategy for reducing the level of CO₂ emissions from the operation of spark ignition (SI) engines. The knocking at the operation of a SI engine is produced by spontaneous combustion inside the cylinder due to fuel autoignition, therefore, monitoring the behavior of the knocking is important, because it generates mechanical problems in the engine. The objective of this research is to determine the behavior of the knocking in a SI engine applying different percentages of ethanol - gasoline blendings through the application of a 3² DoE. The experiment is carried out in an instrumental 2.0L engine monitored through the use of an automotive scanner and oscilloscope. Two study variables are taken account: the percentage of ethanol in the blend (E0, E5, E15) and different engine speeds (750, 2500, 3000 rpm). The response variable is the knocking level inside the cylinder. Once the experimental design table is obtained, the tests on the instrumental engine are done; then, by means of data analysis of the results in a statistical software, the predictive mathematical model is obtained. At the end of the research, it is established that the variation of the detonation level in the SI engine is directly proportional to the percentage of ethanol in the mixture and inversely proportional to the engine speed.

Keywords: knocking, ethanol, gasoline, design of experiments

Artículo recibido 27 junio 2024

Aceptado para publicación: 30 julio 2024



INTRODUCCIÓN

Como lo menciona el trabajo de Staš et al. (2023), la importancia y participación de los combustibles alternativos crece continuamente, por dos razones principales, una debido a la necesidad de reducir las EGC y otra por el ahorro de combustibles fósiles, ya que sus reservas decrecen. En 2019, de manera global las emisiones de gases de efecto invernadero siguieron aumentando en todos los sectores, donde el 15% de las emisiones corresponden al sector del transporte (Dhakal 2022). Este sector experimentó en 2022 el incremento más grande en emisión de gases de efecto invernadero aumentando en 4,7% (Crippa 2023). En 2022 la emisión global de dióxido de carbono (CO₂) procedente del sector del transporte aumentó un 3% más que en 2021 (IEA, 2023).

Un MEP funciona mediante la combustión de una mezcla de aire y combustible, que permite convertir la energía química del carburante en energía cinética (Hofmann, 2015). La combustión conlleva a una propagación de la llama tras la chispa inicial que enciende la mezcla (Bae, 2017). Si la combustión se llevase a cabo en condiciones ideales con una suficiente cantidad de oxígeno, los únicos gases resultantes serían vapor de agua (H₂O) y CO₂; sin embargo, debido a las condiciones no ideales en la cámara de combustión y los constituyentes de los combustibles, se producen elementos contaminantes como monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no combustionados (HC), entre otros. (Kohler, 2015).

Tomando en cuenta la cantidad de emisiones generadas por el sector del transporte, la creciente necesidad de energía y el aumento de los precios en los combustibles, muchos países están apoyando de manera activa a la investigación hacia los biocombustibles provenientes de fuentes renovables por su potencial de reducir las emisiones de gases de escape y sustituir a los combustibles fósiles (Iodice, 2021). El etanol a mostrado ser uno de los principales biocombustibles en estudio debido a sus características favorables con el ambiente, además de poder ser usado en los motores de combustión con solo leves modificaciones (Lee, 2021). Sin embargo, el etanol se utiliza principalmente como componente de combustibles para incrementar el octanaje, por lo que dependiendo de la disponibilidad se ha convertido en una alternativa en algunos países al comercializarse como mezcla de gasolina – etanol, por ejemplo, E24 en Brasil, E10 y E85 en Estados Unidos (Ullmann, 2015), en Ecuador está disponible como E5 en la gasolina ecopaís.



Algunas de las propiedades del etanol son muy diferentes en comparación a la gasolina, como el número de octanos, el peso específico, el poder calorífico, el calor latente, la velocidad de propagación de la llama, por lo que resulta crucial entender los efectos que tendría el etanol en el desempeño de los MEP. Thakur en el año 2017, concluyó que las mezclas de etanol y gasolina mostraron un incremento en el torque y potencia de freno del motor (BHP), usando E5, E10, E20, se evidenció un incremento de 2,31%; 2,77% y 4,16% en la potencia, y de 0,29%; 0,59% y 4,77% respectivamente.

Por otra parte, entre los principales factores que imponen límites para mejorar la eficiencia y rendimiento de estos motores están la preignición y la detonación espontánea del combustible. Este último, es un fenómeno que ocurre cuando una porción de la mezcla se auto enciende antes de que sea alcanzada por el frente de llama, produciendo un calor intenso y alto picos de presión que someten al pistón, cojinetes, culata, junta de culata a enormes cargas mecánicas y térmicas. (Hofman, 2015).

Dada la naturaleza química del etanol y sus propiedades distintas frente a la gasolina convencional, su introducción en los motores requiere comprender cómo afecta el comportamiento de la detonación, con el fin de establecer los niveles de detonación que se producen en el interior de la cámara de combustión del MEP.

METODOLOGÍA

Procedimiento

El propósito fundamental de esta investigación radica en el análisis exhaustivo del comportamiento de las detonaciones durante el proceso de combustión en un MEP, mediante la aplicación de diversos porcentajes de mezclas de etanol - gasolina súper, empleando una metodología basada en el diseño de experimentos (DoE) factorial. Este estudio, que se lleva a cabo con el rigor y la precisión necesarios, tiene como objetivo contribuir al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería automotriz.

En el marco de este estudio, se han definido un total de 27 corridas de referencia como parte integral de nuestro caso de investigación. Esta metodología se ha implementado con el propósito de garantizar la calidad y confiabilidad de los datos recabados, para cada ensayo se ha considerado un ciclo de trabajo del cigüeñal.

Antes de llevar a cabo cada uno de los ensayos, hemos sometido al motor de combustión interna

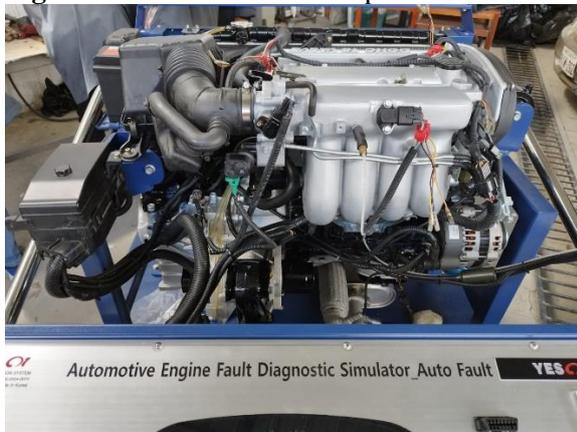
experimental a un proceso de revisión de todos sus sistemas auxiliares, verificando su correcto funcionamiento. Además, hemos realizado un proceso de purga del sistema de alimentación con el objetivo de reducir al mínimo cualquier margen de error al efectuar la transición entre las distintas mezclas de etanol - gasolina.

Para la toma de datos experimentales se ha basado en el protocolo de pruebas establecidas para los procesos de revisión técnica vehicular (RTV) dentro del territorio ecuatoriano, normativa INEN 2203:2000; con el fin de garantizar los correctos procesos para la obtención de datos mediante ensayos. Además, en la normativa INEN 2204:2002 y mediante el primer suplemento No. 919 se modifica el reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 017; que permite obtener datos para el estudio y posterior análisis mediante la metodología DoE.

Instrumentación

El motor utilizado en esta investigación se observa en la Figura 1, corresponde a un vehículo sedan tipo M1, las especificaciones técnicas del MEP se visualizan en la Tabla 1.

Figura 1 Motor de encendido provocado



Nota. Motor utilizado en el desarrollo de las corridas experimentales.

Tabla 1 Especificaciones técnicas del motor de encendido provocado.

Marca de vehículo	Hyundai
Año de Fabricación	2002
Potencia Máxima	131 CV / 96,4 kW @ 6000 rpm
Par Máximo	175 N·m @ 4600 rpm
Número de cilindros	4
Disposición de los cilindros	En línea
Cilindrada	1997 cm ³
Relación de Compresión	10:1
Válvulas por cilindro	4
Tipo de distribución	DOHC
Alimentación	Inyección Directa

Nota. Adaptado de Autodata (3.45) [software de computador], 2021.

En el proceso de adquisición de datos, se emplea un escáner automotriz de la marca FCAR, modelo F7S-G. Este equipo de última generación se seleccionó para asegurar la precisión y fiabilidad de la recopilación de datos en nuestro estudio. Además, de ofrecernos una amplia cobertura en las diferentes marcas de vehículos, mantiene una alta capacidad de diagnóstico, lo que nos permite identificar de manera precisa y confiable los diferentes tipos de datos proporcionados por los sistemas del motor de combustión interna en el presente caso de estudio.

En el proceso de captura de la señal de salida generada por el sensor de detonación Knock (KS), se usa un osciloscopio de la marca Autoscope-Technology, modelo USB-Autoscope IV. Este instrumento permite adquirir de manera continua la señal en cada uno de los ciclos de ensayo (dos vueltas del cigüeñal), siguiendo las pautas establecidas en las normativas INEN 2203:2000 e INEN 2204:2002, las cuales rigen las pruebas estáticas y dinámicas en los MEP. Este enfoque en la obtención de datos garantiza la integridad y la precisión de nuestros resultados.

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es el punto de partida para establecer el orden de ejecución de las diferentes corridas experimentales, el mismo que corresponde a un diseño experimental DoE factorial 3^2 , permitiendo estudiar el efecto que producen los dos factores de estudio considerados como son las mezclas de etanol – gasolina súper y el régimen de giro del MEP, sobre la variable de respuesta que es el nivel de detonación que se produce en la parte interna del motor.

Con el diseño 3^2 , como base son 9 ensayos, con el fin de reducir el margen de error de los resultados por la variación de los factores no controlables, se aplican 2 réplicas, obteniendo en total 27 corridas experimentales, así como también, para aumentar la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, se aplica la aleatorización, que es realizar las corridas experimentales de forma aleatoria, dado este orden por el diseño de experimentos.

Cada factor de estudio cuenta con 3 niveles, para el caso de las mezclas de etanol – gasolina súper son E0, E5 y E15 (% en volumen de mezcla de etanol), para el caso del régimen de giro del motor de encendido provocado son 750, 2500 y 3000 rpm.

El total y orden de las corridas experimentales considerando todas las combinaciones posibles, se observa en la Tabla 2.



Tabla 2 Diseño experimental factorial para la realización de las corridas experimentales.

Orden Establecido	Orden Corridas	% Etanol	RPM
21	1	0	3000
27	2	15	3000
25	3	15	750
23	4	5	2500
26	5	15	2500
20	6	0	2500
22	7	5	750
19	8	0	750
24	9	5	3000
5	10	5	2500
6	11	5	3000
3	12	0	3000
2	13	0	2500
7	14	15	750
9	15	15	3000
1	16	0	750
4	17	5	750
8	18	15	2500
11	19	0	2500
13	20	5	750
15	21	5	3000
14	22	5	2500
16	23	15	750
12	24	0	3000
17	25	15	2500
18	26	15	3000
10	27	0	750

Nota. Diseño experimental desarrollado en software estadístico.



En el presente estudio se considera el diagrama de Pareto para valorar la variabilidad de la detonación que ocasionan los factores de estudio; además, el desarrollo del análisis de varianza (ANOVA) que confirma que los efectos ayudan a explicar el comportamiento de la variable detonación, también se muestran las gráficas de residuos que indican el comportamiento normal de los resultados, adquiridos mediante el software Minitab para determinar el comportamiento del nivel de detonación. Adicionalmente, mediante la consideración de las gráficas de medias ajustadas individuales y dobles, que permiten establecer los efectos ocasionados sobre la respuesta (nivel de detonación), por último, el software utilizado entrega el modelado matemático predictivo, que permite pronosticar el comportamiento de las detonaciones que se producen en el ciclo de trabajo del MEP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se encuentran los valores de voltaje (mV) de la detonación en el interior del MEP, obtenidos en las diferentes corridas experimentales.

Tabla 3 Valores de la detonación en el interior del motor

Orden Establecido	Orden Corridas	% Etanol	RP M	Detonación (mV)
21	1	0	3000	341,23
27	2	15	3000	353,96
25	3	15	750	376,70
23	4	5	2500	352,36
26	5	15	2500	364,86
20	6	0	2500	342,13
22	7	5	750	367,93
19	8	0	750	339,39
24	9	5	3000	349,85
5	10	5	2500	365,78
6	11	5	3000	364,41
3	12	0	3000	344,19
2	13	0	2500	345,29
7	14	15	750	383,98
9	15	15	3000	372,68
1	16	0	750	349,40
4	17	5	750	368,05
8	18	15	2500	378,53
11	19	0	2500	340,78
13	20	5	750	357,71
15	21	5	3000	337,00
14	22	5	2500	353,15
16	23	15	750	372,55

12	24	0	3000	332,93
17	25	15	2500	369,41
18	26	15	3000	343,94
10	27	0	750	342,35

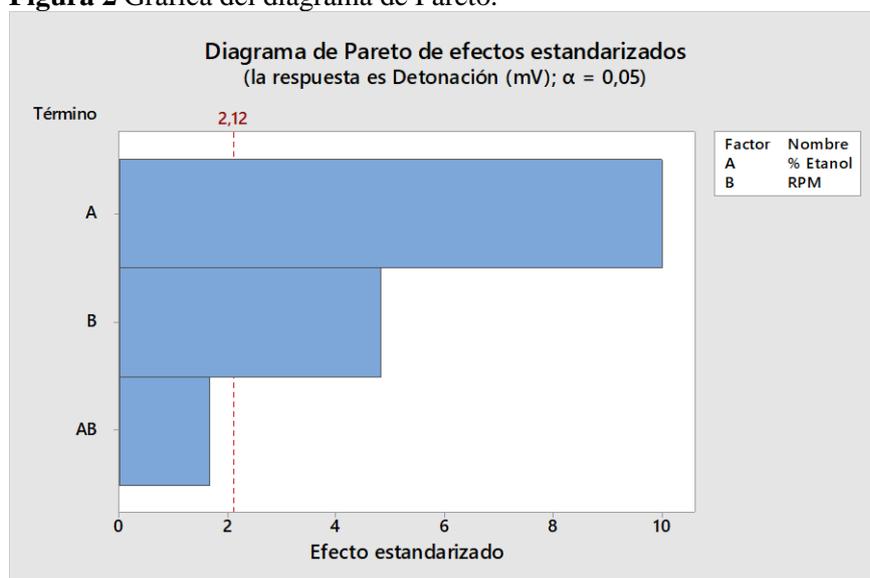
Nota. Resultados tabulados en el software estadístico.

También, se presenta el análisis del nivel de detonaciones en el interior del motor de encendido provocado, a partir de los diferentes parámetros que entrega Minitab.

Diagrama de Pareto

En la Figura 2 se visualiza el diagrama de Pareto, donde se determina que el efecto de estudio que más influye en la variabilidad de la detonación es el porcentaje de etanol en la mezcla con la gasolina súper, seguido de las rpm de giro del motor, debido que superan el valor-t de 2,12 que entrega el diagrama. Se da, porque influyen de forma directa en el nivel de voltaje de las detonaciones, para que sean mayor o menor la respuesta de salida, en función de que si la mezcla contiene mayor o menor porcentaje de etanol, o también si el régimen de giro es mayor o menor.

Figura 2 Gráfica del diagrama de Pareto.



Nota. Gráfica que ha sido obtenida del análisis realizado en Minitab.

Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) entrega un Valor p que se define como la probabilidad usada para medir la evidencia en contra de la hipótesis nula, mientras este valor esté por debajo de 0,05 determina que el nivel de influencia de los factores es elevado, estableciendo un 95% de confiabilidad. De acuerdo a la Tabla 4, se observa que el Valor p concuerda con lo presentado en la Fig. 2, sobre la influencia de

los factores de estudio en el comportamiento de la variable de respuesta.

Tabla 4 Valores p significativos sobre el nivel de detonaciones del motor

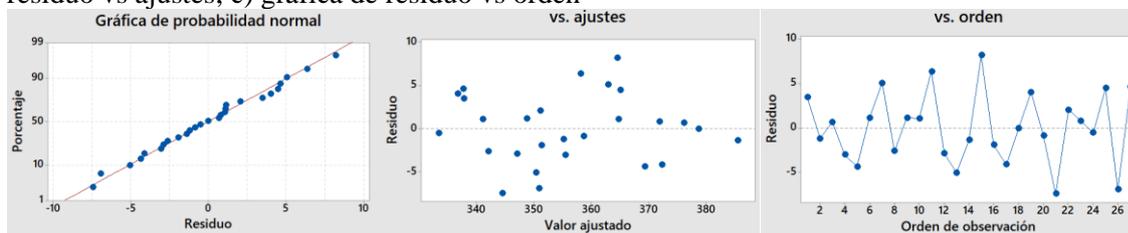
	Fuente	Valor p
Efectos principales	% etanol	0,000
	RPM	0,000

Nota. Resultados obtenidos en Minitab.

Gráficas de residuos

Los residuos que son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo estadístico, deben distribuirse de forma normal, con el objetivo de garantizar que las conclusiones del comportamiento de las detonaciones sean las adecuadas. En la Figura 3a se indica que los datos son normales debido a que su comportamiento es cercano a la línea recta. Si observamos la Figura 3b (residuos vs ajustes) no tienen patrón alguno garantizando que su varianza es constante. Por último, la Figura 3c (residuo vs orden) demuestra la independencia de los datos, ya que no hay tendencia alguna en su distribución en orden del tiempo. Cada una de estas figuras analizadas demuestran que el análisis ANOVA permite establecer unas buenas conclusiones del comportamiento de la variable detonación.

Figura 3 Gráficas de residuos para la detonación. a) gráfica de probabilidad normal; b) gráfica de residuo vs ajustes; c) gráfica de residuo vs orden



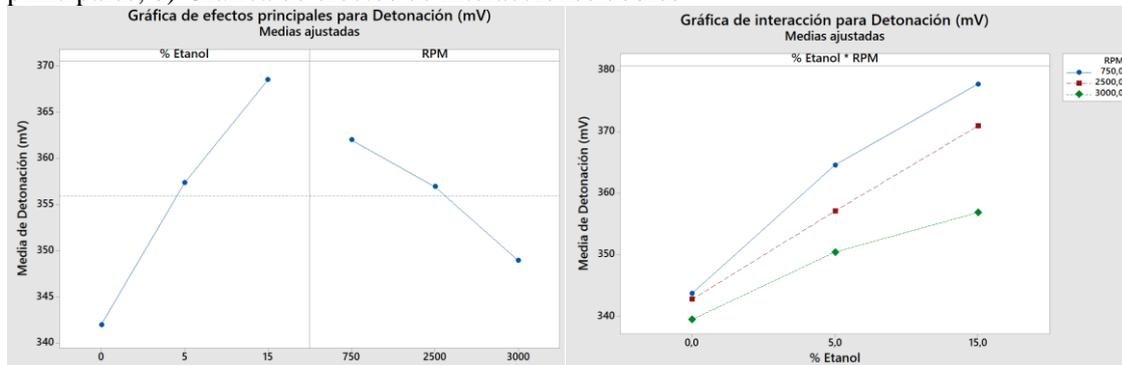
Nota. Gráficas que han sido obtenidas del análisis realizado en Minitab.

Efectos principales y de interacciones

La Figura 4a demuestra los efectos que tienen de manera individual los factores de estudio sobre la variable detonación, a mayor pendiente de estas gráficas mayor es la incidencia positiva o negativa de los factores estudiados. En la gráfica de la izquierda se observa que, a mayor porcentaje de etanol en la mezcla con la gasolina súper, mayor es el nivel de detonación, caso contrario este nivel disminuye. El efecto que ocasiona el régimen de giro del motor visualizado en la gráfica de la derecha, es inverso al comportamiento del nivel de detonación, es decir, a mayor régimen de giro, menor es el nivel de detonación y a menor régimen de giro el nivel de detonación aumenta.

La interacción doble de los efectos de estudio observados en la Figura 4b, dan a conocer como es el comportamiento en sus diferentes niveles, siempre cumpliendo que a menor porcentaje de etanol y mayor régimen de giro, el nivel de detonaciones en el interior del motor es menor.

Figura 4 Gráfica de interacciones de los factores estudiados sobre la detonación. a) Gráfica de efectos principales; b) Gráfica de efectos de interacciones dobles



Nota. Gráficas que han sido obtenidas del análisis realizado en Minitab.

Modelado matemático predictivo

El ajuste del modelo matemático predictivo de la detonación se observa en la Tabla 5, en donde nos da un nivel de confiabilidad alto, en vista que está cercado al 100%, en el caso de del modelo para el nivel de detonación del motor es del 92,54%, adicional, nos demuestra un buen ajuste ya que la diferencia entre el R-cuad. y el R-cuad. (ajustado) está por debajo del 5%.

Tabla 5 Ajuste del modelo matemático predictivo de la detonación

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
5,06014	92,54%	87,87%	78,75%

Nota. Resultados obtenidos en Minitab.

El modelado matemático predictivo que permite caracterizar el nivel de detonaciones en el interior del motor en función de todos los factores estudiados es el observado en la ecuación (1).

$$\begin{aligned}
 \text{Detonación} = & 355,946 - 13,98\%*E0 + 1,41\%*E5 + 12,57\%*E15 + 6,06*R750 \\
 & + 0,98*R2500 - 7,04*R3000 - 4,31\%*ER0_750 - 0,21\%*ER0_2500 + 4,52\%*ER0_3000 \\
 & + 1,14\%*ER5_750 - 1,24\%*ER5_2500 + 0,10\%*ER5_3000 + 3,17\%*ER15_750 \\
 & + 1,45\%*ER15_2500 - 4,62\%*ER15_3000
 \end{aligned} \quad (1)$$

Detonación: Nivel de detonación en el interior del MEP, en mV.

E0: Valor del efecto causado al emplear una gasolina pura.

E5: Valor del efecto causado al emplear una mezcla con un 5% de etanol.

E15: Valor del efecto causado al emplear una mezcla con un 15% de etanol.

R750: Valor del efecto producido al emplear un régimen de giro del motor de 750 rpm.

R2500: Valor del efecto producido al emplear un régimen de giro del motor de 2500 rpm.

R3000: Valor del efecto producido al emplear un régimen de giro del motor de 3000 rpm.

ER0_750: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 0% de etanol y un régimen de giro de 750 rpm.

ER0_2500: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 0% de etanol y un régimen de giro de 2500 rpm.

ER0_3000: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 0% de etanol y un régimen de giro de 3000 rpm.

ER5_750: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 5% de etanol y un régimen de giro de 750 rpm.

ER5_2500: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 5% de etanol y un régimen de giro de 2500 rpm.

ER5_3000: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 5% de etanol y un régimen de giro de 3000 rpm.

ER15_750: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 15% de etanol y un régimen de giro de 750 rpm.

ER15_2500: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 15% de etanol y un régimen de giro de 2500 rpm.

ER15_3000: Valor del efecto que produce al interaccionar la mezcla con 15% de etanol y un régimen de giro de 3000 rpm.

La Figura 5 muestra el comportamiento del nivel de detonación en mV, al tener los dos factores de estudio considerados para la investigación, los mismos que tiene un alto nivel de incidencia de acuerdo a lo establecido en la Figura 2 y Tabla 4.

El porcentaje de etanol en la mezcla y el régimen de giro influyen directamente en las detonaciones dentro del motor, como se puede observar en la Figura 4a, se destaca la influencia de la cantidad de etanol, con una clara relación entre su aumento y un mayor nivel de detonación, así mismo, se observa que el régimen de giro hace que las detonaciones se comporten de manera inversa, es decir, que a un mayor régimen de giro reduce la detonación en el cilindro.

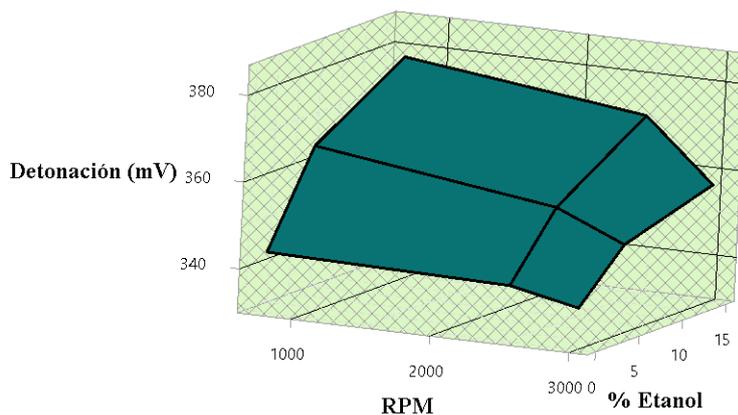
Sin embargo, en la Figura 4b se aprecia, al funcionar el MEP con un menor contenido de etanol en la mezcla y a un alto régimen de giro, se obtiene una menor detonación.

En la Figura 5 se observa que el contenido de etanol en la mezcla y las revoluciones de giro no solo tienen efectos individuales, sino que también interaccionan, es decir, que una concentración de 15% de etanol en la mezcla con combustible súper y un motor girando a 750 rpm conducen a la máxima detonación.



Se aprecia que el valor mínimo de detonación con un registro de aproximadamente 340 mV, se alcanza cuando se emplea gasolina pura y las revoluciones de giro del motor son de 3000 rpm. En este caso un porcentaje bajo de etanol en la mezcla de gasolina súper, y un alto régimen de giro genera una reducción de detonación.

Figura 5 Gráfica de superficie (malla) del comportamiento del nivel de detonación



Nota. Gráfica obtenida en el software Minitab.

CONCLUSIONES

Una vez finalizada la investigación, de acuerdo a los resultados obtenidos se llega a la conclusión que la variación del nivel de las detonaciones es directamente proporcional al porcentaje de etanol en la mezcla e inversamente proporcional al régimen de giro del motor. Para el caso de esta investigación se observa que las detonaciones se incrementan, aproximadamente hasta los 368 mV al tener una E15 y a los 363 mV cuando el motor gira a las 750 rpm. Por otra parte, el nivel de detonación decrece hasta los 342 mV con una mezcla E0 y cuando se tiene un régimen de giro de las 3000 rpm llegando a los 348 mV.

Se ha evidenciado un incremento del nivel de detonaciones cuando se tiene un alto porcentaje de etanol en la mezcla y el motor funcionando con bajo régimen de giro, para el presente estudio el nivel de detonación más alto supera en 9,19% en una mezcla E15 con un régimen de giro de 750 rpm, en comparación con la E0 a las mismas rpm de giro del motor.

El modelado matemático predictivo obtenido por medio del software Minitab tiene un ajuste alto, para el desarrollo de predicciones, teniendo un 92,54% de confiabilidad, basado en el comportamiento normal de los resultados de detonación obtenido por medio del análisis de varianza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autodata. (2021). Autodata (version 3,45) [software de computador]
- Bae, C., & Kim, J. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines. Proceedings of the Combustion Institute, 36(3), 3389-3413. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Vignati, E., (2023). GHG emissions of all world countries. doi:10.2760/953322
- Cárdenas-Cabello , F. (2024). Nueva política exterior de México, evaluación de la gestión 2018-2021. Estudios Y Perspectivas Revista Científica Y Académica , 4(1), 591–621. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i1.121>
- Cárdenas-Cabello , F. (2024). Nueva política exterior de México, evaluación de la gestión 2018-2021. Estudios Y Perspectivas Revista Científica Y Académica , 4(1), 591–621. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i1.122>
- Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet,S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann, (2022). Emissions Trends and Drivers. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. 2. doi:10.1017/9781009157926.004
- Da Silva Santos , F., & López Vargas , R. (2020). Efecto del Estrés en la Función Inmune en Pacientes con Enfermedades Autoinmunes: una Revisión de Estudios Latinoamericanos. Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano, 1(1), 46–59. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v1i1.9>
- Fernández C., F. (2024). Determinación De Erodabilidad En Áreas De Influencia Cuenca Poopo Región Andina De Bolivia. Horizonte Académico, 4(4), 63–78. Recuperado a partir de <https://horizonteacademico.org/index.php/horizonte/article/view/19>
- Hofmann, D., Mencher, B., Häming, W., Hess, W. (2015). Basics of the gasoline (SI) engine. Gasoline Engine Management. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-03964-6_2
- IEA (2023), Global CO2 emissions from transport by sub-sector in the Net Zero Scenario, 2000-2030, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-sub->



[sector-in-the-net-zero-scenario-2000-2030-2](#)

Iodice, P., y Cardone, M. (2021). Ethanol/gasoline blends as alternative fuel in last generation spark-ignition engines: a review on CO and HC engine out emissions. *Energies*, 14(13), 1-18.

<https://doi.org/10.3390/en14134034>

Köhler, C., Allgeier, T. (2015). Exhaust emissions. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

https://doi.org/10.1007/978-3-658-03964-6_17

Lee, C. C., Tran, M. V., Tan, B. T., Scribano, G., y Chong, C. T. (2021). A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol. *Fuel*, 288, 119749. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119749>

Medina Nolasco, E. K., Mendoza Buleje, E. R., Vilca Apaza, G. R., Mamani Fernández, N. N., & Alfaro Campos, K. (2024). Tamizaje de cáncer de cuello uterino en mujeres de una región Andina del Perú. *Arandu UTIC*, 11(1), 50–63. <https://doi.org/10.69639/arandu.v11i1.177>

NTE INEN 2203:2000 de 23 de marzo de 2000, medición de emisiones de gases de escape en motores de combustión interna, núm. 3612, de fecha 22 de diciembre de 2003

NTE INEN 2204:2002 de 17 de abril de 2002, gestión ambiental. aire. vehículos automotores. límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina, núm. 2368, de fecha 18 de septiembre de 2002

RTE 017 de 29 de noviembre de 2017, control de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres, núm. 78-2018, de fecha 21 de agosto de 2008.

Staš, M., Matějovský, L., Mužíková, Z., Kroufek, J., & Šimáček, P. (2023). Properties and analysis of liquid alternative fuels II: Alcohols and ethers. 15(1), 1-12. doi:10.35933/paliva.2023.01.01.

Thakur, A. K., Kaviti, A. K., Mehra, R., y Mer, K. K. S. (2017). Progress in performance analysis of ethanol-gasoline blends on SI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 324-340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.056>

Ullmann, J., Allgeier, T. (2015). *Fuels*. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

https://doi.org/10.1007/978-3-658-03964-6_3

