

# Optimización de parámetros de la prueba de opacidad federal en el análisis de emisiones diésel

## *Optimization of parameters of the federal opacity test in the analysis of diesel emissions*

Edith Mendoza-Ramírez\*, Hector Rivera-Gómez\*\*, Jaime Garnica-González\*\*\*

### Resumen

El objetivo principal de esta investigación es realizar una optimización de la Prueba de Opacidad Federal, aplicando iterativamente el Método de Ascenso Rápido, dicha prueba es realizada en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores Sección Emisiones Diésel del Instituto Mexicano del Petróleo. El presente trabajo es un estudio de caso, donde se emplea el Método de Cuatro Fases para analizar el proceso, haciendo uso de la metodología de Seis Sigma. La prueba analizada es la última de las cuatro pruebas que se realizan en el Laboratorio de Emisiones a Diésel para determinar las emisiones a diésel de un motor o aditivo. Los resultados obtenidos proporcionan un mejor entendimiento acerca del funcionamiento e influencia de los factores que más impacto tienen en la prueba analizada, ya sea de forma directa o indirecta. Permitiendo establecer recomendaciones para mejorar el desempeño de los indicadores de dicha prueba.

**Palabras Clave:** Incertidumbre, Seis Sigma, Optimización, Diseño de Experimentos, Superficie de Respuesta.

### Abstract

*In this research, the main objective is to optimize the test of federal opacity, iteratively applying the method of rapid ascent; this test is performed in the Laboratory of Vehicle Emissions and engine test section diesel emissions in the Mexican Institute of Oil. This research is a case study, where a Four-phase Method is used to analyze the process, using the Six Sigma methodology. The analyzed test is the last of the four tests performed in the Diesel Emissions Laboratory to determine the emissions of a diesel engine or additive. The results provide a better understanding of the functioning and influence of the factors that have impact on the test, either directly or indirectly. This allow us to establish recommendations to improve the performance of indicators of this test.*

**Key words:** Tax incidence, budget, externalities.

**Clasificación JEL:** H22, H61, H23

### Introducción

La última prueba que se lleva a cabo en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores Sección Emisiones

---

\* Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial, E-mail: edith124\_3@hotmail.com

\*\* Doctor en Ingeniería Industrial, Profesor Investigador, Área Académica de Ingeniería, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, E-mail: hriver06@hotmail.com; jgarnicag@gmail.com

\*\*\* Doctor en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología, Profesor Investigador del Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial, Área Académica de la Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
E-mail: jgarnicag@gmail.com

Artículo recibido: 21 de septiembre de 2015

Artículo aceptado: 4 de agosto de 2016

Diésel del Instituto Mexicano del Petróleo, es la prueba de Opacidad Federal, en la cual se analiza la cantidad de emisiones generadas por un motor y que se envían al ambiente, además se analiza el tipo de emisiones que se están generando. De forma general en esta prueba, las emisiones caen en obleas las cuales son pesadas antes y después de que las emisiones lleguen a ellas, esto con el objetivo de saber cuál es el peso con y sin emisiones para observar la cantidad y que tipo de emisiones se están enviando al ambiente. Posteriormente, se hace pasar un haz de luz que atraviesa la oblea para obtener la densidad de la misma.

Buscando en la literatura no se encontraron trabajos similares donde se ha utilizado la metodología Seis Sigma enfocado a esta área, sin embargo se han encontrado trabajos donde se empleó la metodología en diferentes áreas de investigación. A manera de antecedentes, nuestra investigación está motivada por el trabajo de Mendoza, Rivera y Garnica (2014), donde se desarrollaron tres fases de la metodología Six Sigma (definición, medición y análisis). En dicho trabajo se aplicaron diversas técnicas tales como estudios de repetibilidad y reproducibilidad, linealidad, graficas de control, capacidad de proceso y diseño experimental con el fin de determinar las variables significativas en el cálculo de la incertidumbre de la prueba de mapeo de emisiones diésel.

En la misma dirección el trabajo de Mendoza, Rivera, Garnica y Hernández (2014), realizaron una investigación donde utilizan una de las técnicas de Six Sigma enfocadas a la optimización en 4 fases aplicada a la prueba Power Map. En esta investigación se determinó una ecuación característica de la prueba, la cual se obtuvo aplicando diferentes técnicas tales como Diseño de Experimentos y Superficie de Respuesta. En dicho trabajo los autores lograron optimizar diversos parámetros que afectaban en la estimación de la incertidumbre de la prueba de Mapeo.

Otro estudio relacionado con nuestra investigación es el presentado por Mendoza, Rivera, Garnica y Hernández (2015), en el cual realizaron una evaluación sobre el sistema de medición de la prueba del ciclo transitorio, además desarrollaron un estudio de reproducibilidad y repetibilidad a un equipo clave de la prueba.

Es importante mencionar que sin considerar estos dos trabajos, no existe en la literatura referencia alguna donde se realice un análisis de las emisiones de gases de motores diésel con la metodología considerada en nuestra investigación. Afortunadamente la metodología Seis Sigma se ha aplicado en diferentes áreas. A continuación, se hace una revisión de algunos trabajos en diversas áreas de aplicación.

### **Área de Seis Sigma**

Existen diversos autores que han aplicado técnicas de Seis Sigma en una variedad de problemas tales como Broatch, Luján, Ruiz y Olmeda (2008), quienes realizaron un trabajo donde se presentó una metodología utilizando técnicas de Seis-Sigma con la finalidad de estudiar las mediciones de las emisiones contaminantes acumuladas durante la fase de arranque de automóviles de motores diésel de inyección directa. Por otra parte en el trabajo de Zheng y Frey (2001) se analizó la estimación de los parámetros de la distribución de la mezcla del carbón de unas calderas. Con un enfoque para la cuantificación de la variabilidad y la incertidumbre sobre la base de la distribución de la mezcla. Con relación a la estimación de la incertidumbre, otros autores han realizado análisis haciendo uso de las técnicas de Seis Sigma como la técnica de Taguchi (Chen, Li y Cox, 2009), tratando de optimizar sus resultados para obtener productos o servicios de mayor calidad.

Otros estudios han aplicado técnicas de Seis Sigma orientados al análisis y estimación de la incertidumbre, así como del análisis de la variabilidad de emisiones, como se muestra

en los trabajos de Frey y Tran (1999), Frey y Rhodes (1999), Frey y Zheng (2002) y Frey (1998).

Por su parte Theodorus, Liapis y Zannikos (2013), describieron y compararon resultados utilizando tres metodologías estadísticas empíricas (ANOVA clásica, robusta y rango estadístico ANOVA). Los autores utilizaron datos experimentales de un diseño experimental balanceado, que incluyen muestras duplicadas analizadas por la reproducción de 104 objetos de muestreo (estaciones de venta al menor de petróleo). Además, Hosseini, Farhangdoosi y Manoochchri (2012) hicieron uso del método Taguchi y el ANOVA para optimizar parámetros de un proceso de extrusión.

Visconti, De Paz y Rubio (2012), realizaron un estudio de la elección de la selectividad de los coeficientes de intercambio catiónico haciendo uso del ANOVA para los coeficientes de variación. Ordorica, Camargo, De la Vega, López, Olgún y López (2011), realizaron un estudio de repetibilidad y reproducibilidad sobre un sistema de medición, utilizado un estudio de termografía sensorial en seres humanos, con la finalidad de detectar desordenes de traumas acumulados (DTA'S). Mora y Marbot (2010) realizaron un estudio donde aplican la repetibilidad y la reproducibilidad para establecer un método de destilación simulada mediante cromatografía gaseosa para una posible implantación en los laboratorios de la refinería de Cuba.

### **Área de Gases**

Existe además un conjunto de trabajos enfocados al estudio de gases tal como la investigación de Fuentes, Incio, Lévano y Torres (2009) elaboraron un trabajo donde caracterizaron y optimizaron el antígeno del líquido hidatídico de ovino aplicándolo en la prueba de látex como una prueba tamiz. Esto para el diagnóstico serológico de pacientes con quistes de *Echinococcus granulosus*. Perdomo et al. (2004), realizaron un trabajo de repetibilidad y reproducibilidad de métodos

analíticos acreditados, como son: la humedad, color, fotocorimétrico, insolubles, reductores, cenizas, distribución granulométrica, almidón y dextrana.

### **Área de Diésel**

Otra serie de autores se han enfocado al análisis del diésel, por ejemplo, Sudeshkumar, Venkatraman y Devarajane (2014), quienes realizaron una investigación sobre las mezclas biocarburantes de un motor diésel de inyección directa con la finalidad de obtener los parámetros del rendimiento del motor y las características de emisiones en el escape. En el mismo año Venkatraman y Devarajane, (2014) publicaron una investigación sobre las emisiones de rendimiento y agotamiento de un motor a diésel, con bajo rechazo al calor utilizando aceite *Jatropha* como combustible.

### **Justificación**

Con base a los trabajos expuestos en los párrafos anteriores, la justificación del presente trabajo, radica en el hecho que el Laboratorio de Diésel del IMP, está en busca de su certificación con base en la NMX-EC-17025-IMNC (2006). Por lo que debe contar con procesos y procedimiento estandarizados y confiables que cumplan con las normas y requerimientos establecidos por organizaciones internacionales tal como la Environmental Protection Agency (EPA) y la Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Por estas razones, en esta investigación se busca analizar exhaustivamente la optimización de la incertidumbre de la prueba de opacidad federal y con base en los resultados obtenidos, se buscará detectar áreas de oportunidad y de operación, que permitan lograr una mejora en el desarrollo de esta prueba, principalmente con respecto al indicador de la incertidumbre.

El presente artículo está estructurado de la siguiente forma: los antecedentes y justificación se presenta en la sección 1, las notaciones y problemática del sistema se

encuentran en la sección 2, el marco teórico se detalla en la sección 3, los objetivos se plantean en la sección 4. En la sección 5 se presenta la pregunta de investigación, la metodología empleada se detalla en la sección 6. La sección 7 indica las limitaciones de la investigación, los resultados obtenidos se ilustran en la sección 8, la discusión se realiza en la sección 9 y finalmente las conclusiones se presentan en la sección 10.

### Notaciones y problemáticas

En esta sección, se introducen las notaciones que fueron utilizadas en este artículo y se describe el sistema a analizar.

#### Notaciones

Los siguientes símbolos y notaciones son utilizados en el presente documento:

- $d$  Desviación del instrumento
- $r$  Resolución del instrumento de medición
- $s$  Desviación estándar
- $\bar{X}$  Media muestral
- $I_C$  Incertidumbre permitida
- $I_R$  Incertidumbre tipo A (por repetibilidad obtenida)

$I_d$  Incertidumbre tipo B (por desviación del instrumento)

$I_r$  Incertidumbre tipo B (por resolución del instrumento)

$I_c$  Incertidumbre tipo B (por calibración del instrumento)

$IC$  Incertidumbre combinada

$IE$  Incertidumbre expandida

$R$  Repetibilidad permitida del instrumento

$n$  Número de pruebas

$\sigma$  Sigma

$6\sigma$  Seis Sigma

$\Delta$  Incremento

#### Problemática y contexto

La problemática de la presente investigación se enfoca en realizar un análisis de la prueba de Opacidad Federal, que se ejecuta en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares. En esta prueba se hace un análisis de la cantidad de emisiones que genera un motor diésel al simular un recorrido normal de uso. El conjunto de variables que están involucradas en el funcionamiento de esta prueba se muestran en el diagrama de Ishikawa de la (figura 1).

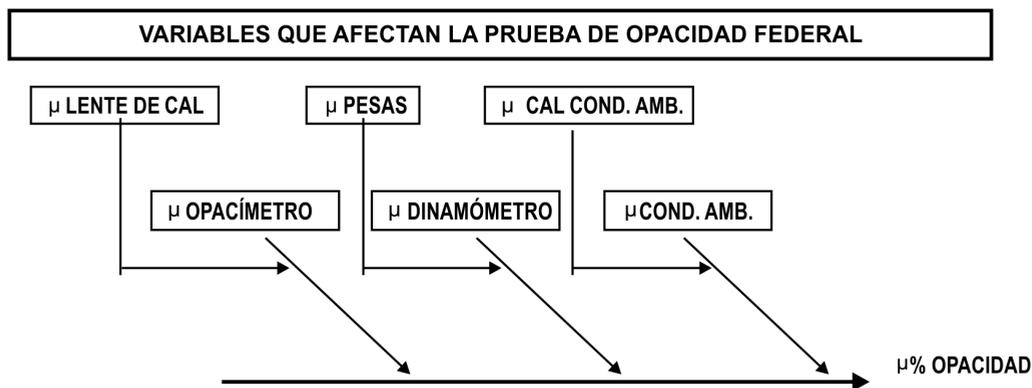


Figura 1. Prueba de Ciclo de Opacidad Federal

Con esta investigación se busca tener una mejor comprensión de los indicadores de la prueba y mejorar el desempeño de la misma, así como implementar estrategias de mantenimiento que mitiguen el efecto de las variaciones observadas de los indicadores.

Por lo que con base en la NMX-CH-140-IMNC (2002), en el cálculo de la incertidumbre de la prueba de Opacidad Federal intervienen tres factores clave: el opacímetro, el dinamómetro y las condiciones ambientales, como se muestra en la ecuación (1):

$$I_{\text{opacidad federal}} = \sqrt{I_{\text{opacimetro}}^2 + I_{\text{dinamómetro}}^2 + I_{\text{condiciones ambiental}}^2} \quad (1)$$

Dentro de cada factor intervienen un conjunto de variables, las cuales serán analizadas por separado mediante un método de cuatro fases típico de las técnicas de Seis Sigma. Posteriormente, se obtendrá un modelo de aproximación que permita reducir la incertidumbre inherente a la prueba.

### Marco Teórico

A fin de mejorar la comprensión de los términos técnicos utilizados en la presente investigación, es necesario definir una serie de conceptos. Wolfgang, Schmid y Lazos Martínez, (2004) definen a la incertidumbre como la incertidumbre se define como un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando.

Según Pyzdek y Paul Keller (2013): la incertidumbre: Es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando. La Incertidumbre por definición, se refiere a la duda o perplejidad que se tiene sobre un asunto o cuestión. La incertidumbre se iguala a un estado de duda en el que predomina el límite de la confianza o la creencia en la verdad de un determinado conocimiento.

Además es necesario definir lo siguiente:

- Sigma ( $\sigma$ ): Es una letra del alfabeto griego utilizada en ingeniería para medir la variabilidad en un proceso. Seis Sigma es un conjunto de técnicas y principios de calidad, probados, rigurosos, enfocados y de aplicación altamente eficaz.

- Diseño de experimentos: de acuerdo con Montgomery (1991). Es una prueba o una serie de pruebas en las cuales se introducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, esto con la finalidad de observar e identificar los cambios en la respuesta de salida.

### Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación es:

- Realizar una optimización de los parámetros de la prueba de Opacidad Federal, utilizando la Metodología de Seis Sigma, en especial se busca aplicar el Método de Cuatro Fases, con la finalidad de determinar las variables críticas que más impacto tienen en el indicador de la incertidumbre.

### Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Identificar y seleccionar las variables que tienen un mayor impacto en la obtención de la incertidumbre del ciclo de opacidad federal.
- Analizar los indicadores y realizar una serie de recomendaciones que mejoren el desempeño de la prueba.
- Crear un modelo de aproximación para observar bajo qué condiciones deben operar las variables significativas a fin de minimizar la incertidumbre de la prueba.

### **Pregunta de investigación**

Por lo antes expuesto, se realiza la siguiente pregunta de investigación:

¿La aplicación de las técnicas de Six Sigma, permitirán identificar áreas de oportunidad que mejoren las condiciones de operación de la prueba de Opacidad Federal en el laboratorio de emisiones a diésel?

### **Metodología**

El enfoque con el cual se aborda el problema bajo estudio está basado en la metodología Seis-Sigma la cual ha sido aplicada con éxito en las otras tres pruebas que se llevan a cabo en el laboratorio de emisiones a diésel, dichas pruebas son: prueba del ciclo Power Map (Mapeo), prueba de Ciclo Transitorio, prueba de Ciclo de 13 Modos. Cabe mencionar que existen diversas aplicaciones de la metodología de Seis Sigma en diversas áreas y en un número considerable de empresas importantes de diferentes sectores productivos por lo que, con base en Escalante (2010), la metodología utilizada en este artículo consiste en los siguientes pasos:

- 1) D Definir el objetivo de la actividad de mejora
- 2) M Medir y evaluar el sistema existente
- 3) A Analizar el sistema para identificar maneras de eliminar la diferencia entre el desempeño actual del sistema o proceso y el objetivo deseado.
- 4) I Mejorar el sistema
- 5) C Controlar el nuevo sistema

Estos cinco pasos garantizan realizar un análisis profundo del problema. De manera particular en este trabajo se enfoca principalmente en la etapa de análisis y mejora del sistema, para esto se adaptó el método de ascenso rápido para optimizar los parámetros de control de la prueba en cuestión, dicho método consta de las siguientes fases:

1. Fase I: Aplicación de un diseño experimental fraccionario de filtrado, 2<sup>n</sup>
2. Fase II: Desarrollo del método de ascenso rápido.
3. Fase III: Aplicación de un diseño factorial 3<sup>n</sup>
4. Fase IV: Optimización de parámetros a través de un diseño central compuesto.

A través de estas cuatro fases se logró determinar las variables significativas en el cálculo de la incertidumbre de la prueba, así también se identificó la zona de optimalidad, para posteriormente optimizar los parámetros de control de la prueba mediante la aplicación de la técnica de Superficies de Respuesta.

### **Limitaciones**

En cuanto a las limitaciones del presente trabajo, se puede mencionar que es un estudio de caso aplicado solamente a este laboratorio, (emisiones a diésel), y bajo ciertos parámetros de operación, sin embargo esto no implica que la metodología empleada no pueda ser aplicada a otros laboratorios.

### **Resultados**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de aplicar la metodología propuesta, derivados principalmente del método de las cuatro fases en cada uno de los tres equipos involucrados.

### **Opacímetro**

El opacímetro es un lente de opacidad donde se encuentran las obleas, las cuales captan una cierta cantidad de emisiones que se envían al ambiente. El opacímetro es un equipo clave en la prueba de Opacidad Federal, para el cálculo de la incertidumbre del opacímetro están involucrados nueve factores (tabla 1). De este conjunto de factores solo se consideran seis de ellos en el análisis, pues el resto permanecen constantes en los cálculos.

**Tabla 1**

Valores inicial de las variables

Factores	Valor	-20%	20%	-5%	5%
Desviación del instrumento, d	1	0.8	1.2	0.95	0.84
Resolución del instrumento de medición, r	1	0.8	1.2	0.95	0.84
Incertidumbre por calibración del instrumento, lc	2	1.6	2.4	1.9	1.68
Repetibilidad permitida del instrumento, R	2	1.6	2.4	1.9	1.68
No. de pruebas efectuadas, 10	10	8	12	9.5	8.4
Factor de cobertura K, al 95% de confianza	2	1.6	2.4	1.9	1.68
Factor t de student al 95% de nivel de confianza	1.961	1.5688	2.3532	1.86295	1.64724
Media muestral	99.998	79.9984	119.9976	94.9981	83.99832
Desviación standard	0.0042	0.00336	0.00504	0.00399	0.003528

A los seis factores considerados se les realizó una variación con un incremento del 5% y 20%, esto con el propósito de observar un rango amplio de variación y así poder aplicar un diseño de experimentos y filtrar las variables no significativas. Con las variaciones de la tabla 1, en la Fase I se aplicó un diseño factorial de filtrado 2<sup>6</sup>, con el cual se detectaron tres variables significativas, definiendo la ecuación (2).

$$INCERTIDUMBRE = 2.50165 + 0.1188*A + 0.348125*C - 0.49975*E \quad (2)$$

Se aplicó el software estadístico Statgraphics para realizar el análisis de varianza correspondiente, en él, se pudo observar que las variables significativas en el cálculo de la incertidumbre del opacímetro son: la desviación del instrumento, la incertidumbre por calibración del instrumento y la media muestral. En la Fase II al aplicar el método de ascenso rápido, se observa la trayectoria de la curva como se muestra en la (figura 2), acotando el rango de variación de los factores a una zona de optimalidad donde se aprecia una reducción considerable de la incertidumbre. En la Fase III se realizó un diseño factorial 3<sup>3</sup> solamente con las tres variables significativas, para determinar si existe alguna curvatura en la gráfica.

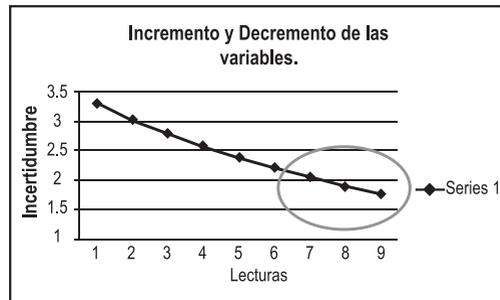


Figura 2. Incremento y Decremento de las variables.

Al optimizar las variables significativas en la Fase IV con un diseño central compuesto, se obtuvo un valor óptimo de la incertidumbre de 1.69681, el cual al compararlo con el valor original del equipo de 2.3805, se obtuvo una reducción de 28.72% siendo este una reducción considerable. Las curvas de nivel de las variables se muestran en la (figura 3).

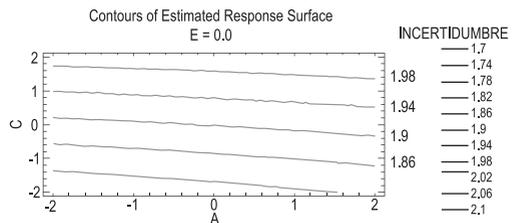


Figura 3. Superficie de respuesta de Fase IV

## Dinamómetro

El dinamómetro es el segundo equipo clave en la prueba de Opacidad Federal, se consideran nueve factores para calcular su incertidumbre, en el trabajo solo se tomaron en cuenta seis para realizar el diseño factorial de filtrado.

Se presentan las variables necesarias para calcular la incertidumbre del dinamómetro y su rango de variación dentro del 5 y 10% (tabla 2). El dinamómetro es el equipo donde se conecta el motor, y el cual aplica un torque positivo y un torque negativo lo que permite analizar el funcionamiento a detalle de un motor a diésel.

**Tabla 2**

Tabla inicial de los valores de las variables

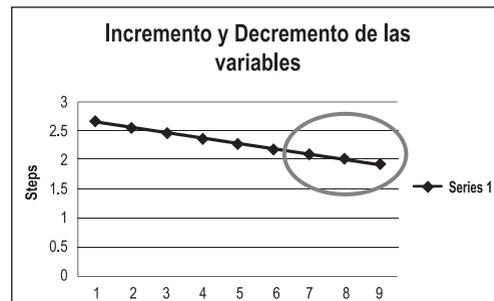
Factores	Valor	-10%	10%	-5%	5%
Desviación del instrumento, d	0.395	0.35541	0.43439	0.37515	0.373180
Resolución del instrumento de medición, r	19.731	17.7576	21.7037	18.7441	18.64551
Incertidumbre por calibración del instrumento, I <sub>c</sub>	39.463	35.5162	43.4087	37.4893	37.29206
Repetibilidad permitida del instrumento, R	19.331	17.3976	21.2637	18.3641	18.26751
No. de pruebas efectuadas, 10	10	9	11	9.5	9.45
Factor de cobertura K, al 95% de confianza	2	1.8	2.2	1.9	1.89
Factor t de student al 68.5% de nivel de confianza	1.06	0.954	1.166	1.007	1.0017
Media muestral	1811.3		1992.48	1720.78	1711.725
Desviación standard	0.0232	0.02088	0.02552	0.02204	0.021924

Al aplicar el diseño de filtrado 2<sup>6</sup> al dinamómetro con los datos de la tabla 2 en la fase I, se obtuvo la ecuación (3).

$$\text{INCERTIDUMBRE} = 2.28263 + 0.20225 * C - 0.237625 * E \quad (3)$$

La Ecuación (3), se utilizó de base para la segunda fase, donde se observó la dirección de más rápido descenso de la incertidumbre al variar las variables significativas, como se muestra en la (figura 4). Con este equipo los factores significativos son: la calibración del instrumento y la media muestral.

En la fase III se realizó una reducción del intervalo original, para obtener más detalle y saber si existe alguna curvatura en el indicador. En la cuarta fase se anexaron puntos extremos al diseño factorial de tres niveles de la tercera fase a fin de aplicar un CCD (un diseño central compuesto). Con esto se obtuvo un valor



**Figura 4.** Incremento y Decrementos de las variables

óptimo de la incertidumbre de 1.75154 y una superficie de respuesta de las variables significativas tal como se muestra en la (figura 5). Con esta optimización se obtuvo una reducción de la incertidumbre del 22.76%, con respecto al valor inicial de operación del dinamómetro.

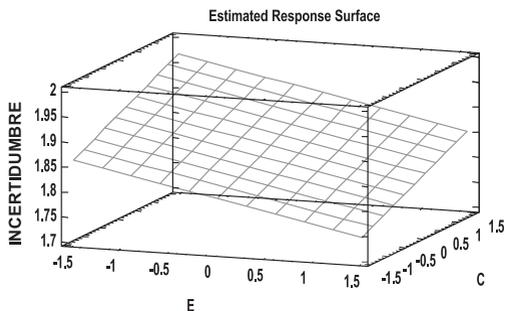


Figura 5. Correlación de las variables con puntos extremos

Tabla 3

Valores iniciales de las variables

Factores	Valor	-10%	10%	-5%	5%
Desviación del instrumento, d	0.2	0.18	0.22	0.19	0.189
Resolución del instrumento de medición, r	0.1	0.09	0.11	0.095	0.0945
Incertidumbre por calibración del instrumento, I <sub>c</sub>	0.19499	0.175491	0.214489	0.185241	0.1842656
Repetitibilidad permitida del instrumento, R	19.01	17.109	20.911	18.0595	17.96445
No. de pruebas efectuadas, 10	20	18	22	19	18.9
Factor de cobertura K, al 95% de confianza	2	1.8	2.2	1.9	1.89
Factor t de student al 95% de nivel de confianza	1.961	1.7649	2.1571	1.86295	1.853145
Media muestral	22.55	20.295	24.805	21.4225	21.30975
Desviación standard	0.1395	0.12555	0.15345	0.132525	0.1318275

Con respecto a las condiciones ambientales, en la primera fase se obtuvo que el indicador de la incertidumbre está dado por la ecuación (4).

$$INCERTIDUMBRE = 0.690631 + 4.06031 \cdot A + 4.94288 \cdot C - 0.0407234 \cdot E \quad (4)$$

Al aplicar un análisis de varianza al diseño factorial de filtrado 2<sup>6</sup> se detectaron tres variables significativas, las cuales son: la desviación del instrumento, la calibración del instrumento y la media muestral. Teniendo en cuenta estas variables en la Fase II se aplicó el método de ascenso rápido, a fin de determinar la dirección de las variables que minimiza más rápidamente a la incertidumbre. Con esto se obtuvieron los resultados de la figura 6.

### Condiciones Ambientales

Las condiciones ambientales es el tercer factor involucrado en la prueba de Opacidad Federal. En la (tabla 3) se presentan el conjunto de nueve variables involucradas en el cálculo de la incertidumbre de las condiciones ambientales con su rango de variación. Con este factor también se realiza un análisis de solamente seis variables.

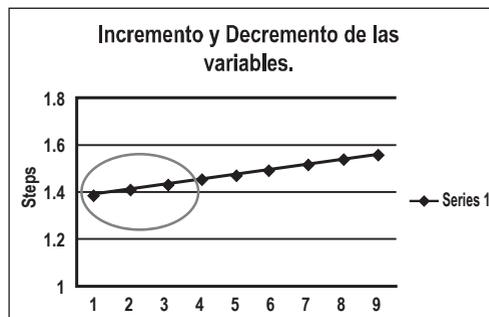


Figura 6. Incremento y Decremento de las variables

En la Fase III se realizó una reducción del intervalo original para detectar alguna curvatura, la cual no se detectó, y por último

en la Fase IV se agregaron puntos extremos al diseño experimental a fin de optimizar los parámetros. Con esto se obtuvo un valor óptimo de 1.36429 para el valor de la incertidumbre y una superficie de respuesta como se muestra en la (figura 7). Con esta optimización se consiguió una reducción de la incertidumbre de 7.10% con respecto al valor original.

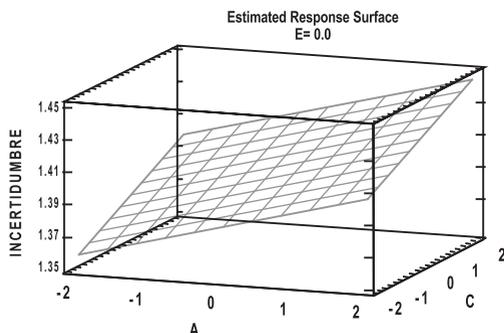


Figura 7. Superficie de respuesta para la Fase IV

Una vez que se optimizaron los parámetros de cada uno de los factores clave de la prueba de opacidad federal y se determinaron los valores óptimos de la incertidumbre, se procede a calcular la incertidumbre total de la prueba, utilizando la expresión la ecuación (5):

$$I_{opacidad} = \sqrt{(1.69681)^2 + (1.75154)^2 + (1.36429)^2} \quad (5):$$

Obteniendo un valor total de la incertidumbre de 2.79434, el cual si lo comparamos con el valor original de 3.60085 observado antes de optimizar los parámetros de los tres factores de la prueba, se aprecia una reducción bastante considerable del 22.39%.

### Discusión

El objetivo de aplicar el método de cuatro fases en los tres factores clave de la

prueba de Opacidad Federal es realizar un análisis exhaustivo de dicha prueba con el objetivo de disminuir su indicador total de incertidumbre, y determinar las variables que más impacto tienen en la estimación de este indicador. Los resultados obtenidos en este artículo son de utilidad, puesto que al lograr una reducción de la incertidumbre, se beneficia el desempeño de la prueba. De forma general la recomendación principal de operación de la prueba de Opacidad Federal es que la variación observada en los resultados se debe a la repetibilidad del equipo y al porcentaje de error debido a la calibración del instrumento. Por lo que para reducir el indicador de la incertidumbre se recomienda implementar un mejor programa de mantenimiento y calibración al equipo a fin de mitigar los efectos del uso y el desgaste sobre los resultados obtenidos.

### Conclusión

Con la realización de este trabajo se satisface con los objetivos expuestos en la presente investigación de realizar un análisis de la prueba de Opacidad Federal, utilizando la metodología Seis Sigma. En este trabajo se llevó a cabo un análisis iterativo de cuatro fases, esto con la finalidad de determinar indicadores que permitirán evaluar cualitativamente los datos y el desempeño de la prueba. Se identificó y seleccionó las variables que tienen un mayor impacto en la obtención de la incertidumbre del Ciclo de Opacidad Federal, también se obtuvo un modelo de aproximación que permitió observar bajo qué condiciones las variables de la prueba son significativas, y además se logró minimizar la incertidumbre. Los resultados obtenidos permitieron realizar una serie de recomendaciones que buscan mejorar el desempeño de la prueba. Con lo antes expuesto se da respuesta a la pregunta de investigación que se planteó.

## Referencias

- Broatch, A., Luján J.M., Ruiz S., & Olmeda P. (2008). Medición de hidrocarburos y monóxido de carbono emisiones durante el arranque del automotor diésel. *Dpto. CMT-Motores Térmicos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chen J., Li Y. & Cox R. (2008). Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study. *Springer-Verlag London* 41, 760–769. DOI: 10.1007/s00170-008-1526-1.
- Escalante, V. E. (2010). *Seis Sigma Metodología y Técnicas*. México: Limusa.
- Fuentes F., Incio N., Lévano, J., & Torres Y. (2009). Caracterización y Optimización del antígeno del líquido hidatídico de ovino y su aplicación en la prueba de látex. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(4), 473-477.
- Frey H. C. (1998 June). Methods for Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Hazardous Air Pollutant Emissions. *In Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Frey H. C. & Rhodes D. (1999). Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Environmental Data and Models. *Theory and Methodology Based Upon Bootstrap Simulation*. Department of Civil Engineering. North Carolina State University 1, 1-178.
- Frey H.C., & Tran K.L. (1999). Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Environmental Data and Models. Performance, Emissions, and Cost of Combustion-Based NOx Controls for Wall and Tangential Furnace Coal-Fired Power Plants. *North Carolina State University*, 22, 2-273.
- Frey H.C., & Zheng J. P. (2002 June). Method for Development of Probabilistic Emission Inventories: Example Case Study for Utility NOx Emission. *In Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*. Orlando Florida.
- Hosseini A., Farhangdoost K., & Manoochehri M. (2012). Modelling of extrusion process and application of Taguchi method and ANOVA analysis for optimization the parametrs. *Mechanika*. 18(3), 301-305.
- Mendoza E., Rivera H., & Garnica J. (2014). Análisis de la estimación de la incertidumbre de la prueba de mapeo en el IMP a través de técnicas de Six Sigma. *XVIII Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas*, 4437-4460. Tijuana, Baja California, Mex.
- Mendoza, E., Rivera, H., Garnica, J., & Hernández, E. S. (2014). Optimización de parámetros de control de pruebas de emisiones diésel con técnicas de Seis Sigma. *Academia Journals. Congreso Internacional de Investigación*. 6(4), 1066-1071. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Mendoza, E., Rivera, H., Garnica, J., & Hernández, E. S. (2015). Evaluación de sistema de medición de pruebas de emisiones a diésel del ciclo transitorio. *Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas*. Durango, México.
- Montgomery, Douglas C. (1991). Design and Analysis of Experiments. SAS. Institute Inc. Cary North Carolina.
- Moras D., & Marbot-Ramada R. (2010). Determinación de las fracciones del petróleo crudo con el empleo de la destilación simulada por cromatografía gaseosa como método alternativo. *CENIC Ciencias Biológicas*, 41(2) 105-112. Cuba, La Habana.
- NMX-CH-140-IMNC (2002). Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.

- NMX-EC-17025-IMNC (2006). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
- Ordorica J., Camargo C, De la Vega, E., Lpopez, O., Olguin, J., & López, J. (2011). Validación de un sistema de medición aplicado a un estudio de Termografía Sensorial para la detección de desórdenes de traumas acumulados. *Ingeniería Industrial, 1*, 69-84.
- Perdomo Morales, A J; Rodríguez López, J; Fernández Alvarez, F; Torres Ponce, B; Rodríguez Mambuca, R; Pérez Sanfiel, F H; Casanova Cabezas, E; Borges Gómez, Y; Solis Marín, Y; Maseda Maestre, E; Sánchez Herrera, A; Piovet Viamonte, A P; López Tito, N; Trujillo Cárdenas, N; Alvarez Chibás, M; Sánchez Expósito, F; Ramos Miranda, C; (2005). La repetibilidad y la reproducibilidad interna en Leycaz durante el trienio 2002-2004. *Revista Cubana de Química, 17(1)* Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543685106>
- Pyzdek, Thomas, & Keller, Paul. (2013). *The Six Sigma Handbook* (3ra Ed).USA: McGraw Hill.
- Schmid Wolfgang, A., & Lazos Martínez, R- (2004). *Guide for estimating measurement uncertainty. National Metrology Center. Querétaro, México: Centro Nacional de Metrología.*
- Sudeshkumar M., Venkatraman M., & Devarajane G. (2014). Utilization of biofuel blends in a direct injection diesel engine for the prediction of engine performance parameters and exhaust emission characteristics. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 6(12)*, 333-341.
- Theodorus D., Liapis, N., & Zannikos F. (2013). Estimación de la incertidumbre de medición que surge de muestreo manual of fuels de combustibles. SciVerse ScienceDirect. *Laboratorio de Combustibles y Lubricantes. Universidad Técnica Nacional de Atenas.*
- Thomas, P. & Paul, K. (2013). *The Six Sigma Handbook* (3ra Ed). USA: McGraHill.
- Venkatraman, M., & Devaradjane, G. (2014). Performance and exhaust emissions of a low heat rejection diesel engine using Jatropha oil as fuel. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 6(11)*, 561-569.
- Visconti, F., De la Paz J. M., & Rubio J. L. (2012). Choice of selectivity coefficients for cation exchange using principal components analysis and bootstrap ANOVA of coefficients of variation. *European Journal of Soil Science. DOI: 10.1111/j.1365.2012/01474.x.*
- Zheng & Frey (2001), Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Emission Estimation: An Illustration of Methods Using Mixture Distributions. *In Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, 1. 24-28., Orlando Florida.*