

Análisis del Trazado de Curva de Potencia aplicando Seis Sigma

Analysis of Trace Power Curve applying Six Sigma

Ing. Edith Mendoza-Ramírez¹, Dr. Héctor Rivera-Gómez^{1*}, Dr. Jaime Garnica-González¹,
Ing. Sergio Avalos-Zavala²

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ingeniería, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Ciudad del Conocimiento, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184.
Teléfono: (01-771) 7172000, extensión: 4001, Fax: (01-771) 7172000 ext. 4001.
e-mail: edith124_3@hotmail.com, hriver06@hotmail.com, *Autor de correspondencia.

²Instituto Mexicano del Petróleo, (IMP), Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores.
Eje Central Lázaro Cárdenas 152, San Bartolo Atepehuacan, 07730 Ciudad de México, D.F.
savalos@imp.mx.

Resumen

En esta investigación se aplicaron diversas técnicas de Seis Sigma, tales como diseño de experimentos, el método de ascenso rápido, superficie de respuesta, entre otras, con el objeto de modelar, analizar y optimizar parámetros de control en la prueba de Mapeo. Esta prueba es realizada en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores Sección Emisiones Diésel del Instituto Mexicano del Petróleo. El objetivo del estudio es determinar los valores óptimos de operación de los factores de control de la prueba, con la finalidad de reducir el indicador de la incertidumbre en las mediciones obtenidas en la calibración del instrumento de trabajo. Se adoptó un método compuesto de cuatro fases, en la primera; se determinan las variables significativas en el cálculo de la incertidumbre; en las fases restantes, se define la zona de optimalidad de las variables, y finalmente se determinan los valores óptimos de operación mediante el método de superficie de respuesta. Los resultados obtenidos resaltan la fuerte influencia de ciertos parámetros de control en el indicador de la incertidumbre de la prueba de Mapeo.

Palabras clave: incertidumbre, seis sigma, diseño de experimentos, superficie de respuesta, optimización.

Abstract

In this research techniques of Six Sigma, such as design of experiments, the steepest ascend method and response surface, among others, were applied in order to model, analyze and optimize control parameters of the Power Map Test. This test is performed at the Laboratory of Vehicle Emissions and Engines Testing in the section of Diesel Emissions of the Mexican Petroleum Institute. The objective of the study is to determine the optimum operating values of the control factors of the test, to reduce the uncertainty in the measurements obtained

in the calibration of the work instrument. A method consisted of four phases was adopted, in the first stage; significant variables are determined in the calculation of the uncertainty; in the remaining stages, the area of optimality of the significant variables is determined and finally the optimal operation values are defined using the response surface methodology. The obtained results highlight the strong influence of certain control parameters in the uncertainty index of the Power map test.

Keywords: uncertainty, six sigma, design of experiments, response surface, optimization.

Introducción

En el sector industrial, las técnicas de Seis Sigma, han sido de gran utilidad, en instancias en las que intervienen un número de factores, con el fin de determinar su efecto sobre algún indicador de interés. En los últimos años se ha observado un interés creciente acerca de la metodología de Seis Sigma, en la literatura existen diversos trabajos de gran relevancia en diversos ámbitos e inclusive en diversos proyectos industriales. De hecho la metodología propuesta en el presente artículo utiliza técnicas de Seis Sigma, tales como el diseño experimental, superficie de respuesta y el método de ascenso rápido, entre otras, a fin de analizar el efecto de variables significativas en un indicador de desempeño.

De manera específica, en el presente trabajo se analiza la primera prueba de las cuatro que se realizan en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores Sección Emisiones Diésel, del Instituto Mexicano del Petróleo. Dicha prueba se le conoce con el nombre de Mapeo. En esta prueba se determinan las características principales de un motor a diésel, tales como: el pico de torque, el pico de potencia y el pico de velocidad, además de que se puede observar la cantidad de combustible que se está consumiendo en la prueba.

El antecedente del presente trabajo está basado en el artículo de Mendoza-Ramírez et al. [1], en donde se realizó un análisis del sistema de medición aplicando estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de la prueba de Mapeo. Cabe mencionar que en el presente artículo se busca extender el estudio de Mendoza-Ramírez et al. [1] a fin de complementar las fases de análisis y mejora de la metodología de Seis Sigma.

De esta forma se establece que el objetivo principal de nuestra investigación es realizar una optimización de los valores óptimos de los diversos parámetros de control que influyen en el cálculo de la estimación de la incertidumbre en la prueba de Mapeo, algo que no ha sido abordado en la literatura. Se parte del diagnóstico de las variables significativas, para posteriormente realizar una optimización de los parámetros de control por medio de un método de cuatro fases. Este estudio es importante porque la incertidumbre es el indicador de referencia de mayor relevancia en dicho laboratorio, y a fin de garantizar resultados dentro de norma, este indicador debe de tener un valor lo más bajo posible. Por estas razones, es crucial determinar por algún medio, recomendaciones que permitan operar las pruebas del laboratorio de una manera eficiente y con la menor incertidumbre posible.

El artículo consta de seis secciones, en la sección uno se encuentra la introducción y objetivo de la investigación. En la sección dos se presenta el fundamento teórico del problema a tratar, en la sección tres se describe la metodología empleada. La sección cuatro analiza los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones de la investigación en la sección cinco.

Fundamentos teóricos

Con referencia al enfoque Seis Sigma, una serie de investigadores han utilizado sus técnicas en una gran variedad de áreas, por ejemplo, Broatch, et al. [2], realizaron un trabajo donde presentan una metodología utilizando técnicas de Seis-Sigma para estudiar las mediciones de las emisiones contaminantes acumuladas durante la fase de arranque de automóviles de motores diésel de inyección directa. Esto con el propósito de superar limitaciones técnicas mediante el aprovechamiento de los detectores estándar. Otro trabajo donde hacen uso de la metodología Seis Sigma es la investigación de Theodorus et al. [3], donde se describió y se compararon resultados utilizando tres metodologías estadísticas empíricas (ANOVA clásica, robusta y rango estadístico ANOVA). En dicho estudio se utilizaron datos experimentales de un diseño experimental balanceado, que incluyó muestras duplicadas analizadas por la reproducción de 104 objetos de muestreo (estaciones de venta al menor de

petróleo). Como puede observarse en estos trabajos se hace uso de las técnicas de Seis Sigma; sin embargo, en ninguno de ellos se ha considerado la estimación de la incertidumbre en las mediciones de los procesos.

Adicionalmente Koch et al. [4] observaron que gran parte de la actuación de un producto y la calidad está determinada por las decisiones iniciales del diseño. Además, presentaron una aplicación de diseño para Seis Sigma, también realizaron una optimización robusta que incorpora enfoques de fiabilidad estructural y diseño robusto con los conceptos y la filosofía de Seis Sigma. Dicha formulación se demuestra en la simulación de choque de impacto de un automóvil. Asimismo, estos autores aplicaron las técnicas de Seis Sigma en el diseño del producto considerado como el primer eslabón de la optimización. En el trabajo de Zheng y Frey [5] se analizó la estimación de los parámetros de la distribución de la mezcla, propusieron un enfoque para la cuantificación de la variabilidad y la incertidumbre sobre la base de la distribución de la mezcla. Su trabajo fue un estudio de caso de factor de emisión basado en las emisiones de carbón de las calderas tangenciales y los quemadores de aire sobre el fuego.

Otro punto a resaltar, es que cada vez más, crece el número de empresas que se preocupan por sus procesos (Apley y Kim [6]), puesto que estos autores y otros más, tales como Tanco et al. [7], utilizaron el diseño de experimentos para mejorar procesos industriales. Mizuyama [8] también ha utilizado el diseño experimental para optimizar los gastos y Gaudard et al. [9] lo han utilizado para análisis históricos. Por su parte Goh y Lam [10] usan estadística experimental para el desarrollo de procesos para nuevos productos. Otros autores han realizado análisis haciendo uso de las técnicas de Seis Sigma como la técnica de Taguchi (Chen et al. [11]), tratando de optimizar sus resultados para obtener productos o servicios de mayor calidad. Otros estudios realizados con técnicas de Seis Sigma están 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 [12], Frey y Rhodes [13], Frey y Zheng [14] y Frey [15].

Con base a lo expuesto en los párrafos anteriores, se observa que en la literatura existe una oportunidad de investigación, para analizar los factores significativos en el cálculo de la incertidumbre de la prueba de Mapeo con técnicas de Seis Sigma. Puesto que pese a la importancia de la prueba de Mapeo, sobre todo en la determinación de las emisiones contaminantes al medio ambiente de motores diésel, este problema no ha sido tratado en la literatura con el enfoque propuesto en el

presente artículo. Además el laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores, tiene la necesidad actual de mejorar sus procesos y operaciones a fin de garantizar que los motores, combustibles y aditivos que analiza en sus diversas pruebas, se desempeñan dentro de norma, cumpliendo con la legislación ambiental vigente. Para esto es necesario que el indicador de la incertidumbre de la prueba de Mapeo esté dentro de norma. A continuación se detalla el cálculo de la incertidumbre, el cual es el indicador *CTQ* (crítico a la calidad) utilizado en el proyecto, tener una incertidumbre dentro de control estadístico es esencial para asegurar resultados dentro de norma.

Según la Norma Oficial Mexicana [16] la incertidumbre es el parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente, ser atribuidos al mesurando. Generalmente la incertidumbre se divide en varios tipos; estándar, estándar combinada y expandida. La incertidumbre estándar, I_s , es del resultado de una medición expresada como una desviación estándar, la cual se divide en: i) evaluación de incertidumbre Tipo A: el cual es el método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones, y la ii) evaluación de incertidumbre Tipo B: el cual es el método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones, Wolfgang et al. [17].

La incertidumbre estándar combinada, I_C , es la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de algunas otras magnitudes, es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y covarianzas de estas otras magnitudes ponderadas de acuerdo a como el resultado de la medición varía con respecto a cambios en estas magnitudes. La incertidumbre expandida I_E , es la cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que pudiera atribuirse razonablemente al mensurado (nmx-ch-140-imnc [18]). Estos conceptos involucran una serie de cálculos para la obtención de la incertidumbre, el cual inicia con la determinación de la media muestral aplicando la ecuación siguiente:

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

Después, se calcula la variancia aplicando la expresión:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

Posteriormente, se determinan los límites superior e inferior con respecto a la media, con las siguientes expresiones:

$$L_i = \bar{x} - \frac{R}{2} \quad (3)$$

$$L_s = \bar{x} + \frac{R}{2} \quad (4)$$

Dónde r denota la repetitividad permitida por el método. Posteriormente, se determina la desviación estándar (s):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

El siguiente paso es elegir el nivel de confianza de la distribución de probabilidad como 95%, con ello se obtiene un valor del estadístico t de student, se utiliza este estadístico puesto que no se conoce la varianza poblacional y se supone la normalidad de la población. Para tener un buen estimador es necesario dividir entre $n-1$ grados de libertad, ya que el estadístico de prueba está referido a la desviación estándar muestral, con $n=10$ observaciones. Con esto se aplica la siguiente ecuación para determinar la incertidumbre Tipo A por repetitividad:

$$I_R = S \cdot \frac{t}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

A continuación, se cuantifica la variabilidad de cada fuente de la información suministrada por el fabricante o determinada por la experiencia, tal como la desviación del instrumento, la resolución del instrumento, la calibración del instrumento, etc. Esto determina la evaluación de la incertidumbre Tipo B. Para obtener la desviación del instrumento, se aplica la siguiente ecuación:

$$I_d = d/\sqrt{3} \quad (7)$$

Para determinar la resolución del instrumento se aplica:

$$I_r = r/\sqrt{3} \quad (8)$$

Con un factor de cobertura k , del 95% de confianza, $k=2$, se determina la variabilidad por calibración del instrumento, con la expresión siguiente:

$$I_c = I_c/k \quad (9)$$

Más detalles sobre los cálculos de la incertidumbre se pueden consultar en Instructivo Técnico [19]. Una vez determinada la incertidumbre Tipo A se puede determinar la incertidumbre combinada por cada fuente con la expresión:

$$IC = \sqrt{I_R^2 + I_d^2 + I_f^2 + I_C^2} \quad (10)$$

Se define el factor de cobertura $K=2$ para calcular la incertidumbre expandida por cada fuente IE :

$$IE = IC \cdot K \quad (11)$$

Con este resultado se convierte la incertidumbre expandida de cada fuente a incertidumbre relativa con la siguiente fórmula:

$$IRC = \left(\frac{IE}{\bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

El cálculo se concluye con la determinación de la incertidumbre de cada mensurando del procedimiento por medio de la siguiente fórmula:

$$IRC = \sqrt{I_R^2 + I_R^2 + I_R^R} \quad (13)$$

Los cálculos anteriores permiten determinar el valor de la incertidumbre, y de hecho están regulados de acuerdo a los instructivos operativos y a la guía de la estimación de la incertidumbre GUM utilizada en los laboratorios del IMP. Estos documentos son de vital importancia para asegurar una estandarización adecuada de los cálculos y la interpretación correcta de los resultados obtenidos.

Materiales y métodos

En el presente trabajo se analiza la primera prueba que se realiza en el Laboratorio de Emisiones Vehiculares y Ensayo de Motores, denominada como prueba de Mapeo (Power Map). El objetivo de la prueba es determinar las características principales de un motor a diésel, tales como: el pico de torque, el pico de potencia y el pico de velocidad, además de observar la cantidad de combustible consumido.

En el presente artículo nos centramos en la sección de calibración del dinamómetro. Dicho instrumento es el dispositivo principal utilizado en la prueba de Mapeo y por ende su adecuada calibración es de suma importancia a fin de que la prueba de Mapeo reporte resultados precisos y dentro norma. Como se mencionó anteriormente el indicador CTQ (crítico a la calidad) utilizado en la investigación, es la incertidumbre, tener un indicador dentro de control estadístico es importante para asegurar que la calibración del dinamómetro ha sido realizada adecuadamente.

La serie de actividades desarrolladas como parte de la metodología propuesta en el presente artículo están encaminadas a reducir el indicador CTQ denotado por la incertidumbre de la calibración de la prueba de Mapeo. Estas actividades buscan optimizar los valores operativos de los diversos factores de control de la prueba. De manera particular, en el presente trabajo se adaptó el método de ascenso rápido, el cual puede ser consultado en Gutiérrez y De la Vara [20], para optimizar los parámetros de control, dicho método consta de las siguientes cuatro fases:

1. Fase I: Aplicación de un diseño experimental fraccionario de filtrado, 2^o.
2. Fase II: Desarrollo del método de ascenso rápido.
3. Fase III: Aplicación de un diseño factorial 3^o.
4. Fase IV: Optimización de parámetros a través de una superficie de respuestas.

A través de estas cuatro fases se logró determinar en primera instancia las variables significativas en el cálculo de la incertidumbre de la prueba de mapeo, y posteriormente permitió identificar la zona de optimalidad para el indicador de la incertidumbre y la respectiva optimización de los parámetros de control mediante la aplicación de la técnica de superficies de respuesta. En la siguiente sección se detalla la metodología empleada mediante una instancia numérica a fin de presentar los resultados obtenidos.

Con el fin de facilitar la comprensión de la prueba de Mapeo se desarrolló un diagrama SIPOC, el cual presenta una descripción general de la prueba en cuestión, así como el listado de entradas, salidas, proveedores y clientes relacionados. El diagrama SIPOC se presenta en la Figura 1.

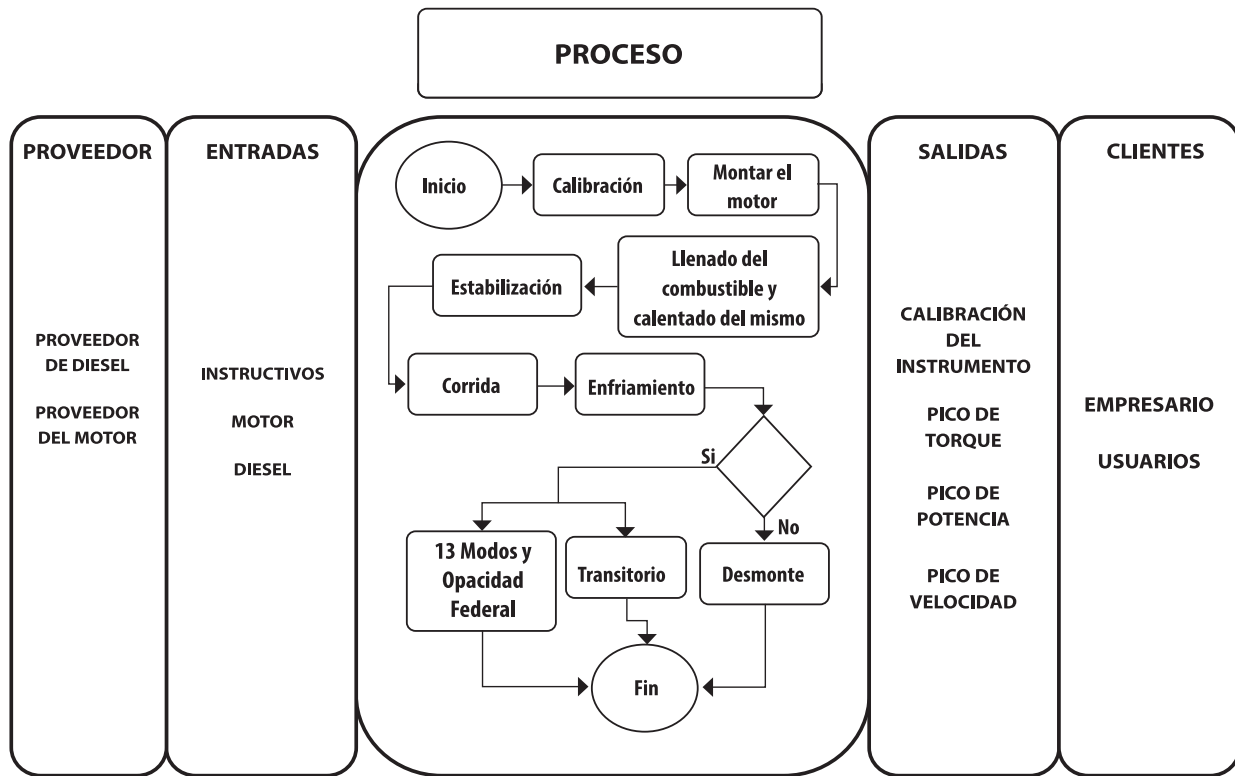


Figura 1. SIPOC de la prueba de Mapeo

Fuente: Elaboración propia con base a Pyzdek & Keller [21]

Resultados
Fase I, Aplicación de un diseño experimental fraccionario de filtrado

Esta fase consiste en la aplicación de un diseño experimental factorial fraccionario de nivel de resolución III, utilizando los parámetros que intervienen en el cálculo de la incertidumbre de la prueba de Mapeo. Como se mencionó en los fundamentos teóricos, existen diversos factores involucrados en el cálculo del indicador *CTQ* de incertidumbre, los cuales se presentan en la Tabla 1.

En total se tienen identificados nueve factores involucrados en el cálculo de la incertidumbre. A fin de determinar cuáles de estos factores tienen un mayor impacto en el indicador *CTQ*, se seleccionaron seis de ellos solamente. No se seleccionó el número de pruebas efectuadas, el factor de cobertura *k*, y el factor *t* de student puesto que son constantes en los cálculos, sus valores están definidos por tablas estadísticas y principalmente porque su variación no tiene sentido en los resultados. Para los seis factores seleccionados, mostrados en la Tabla 1, se identificaron con una letra mayúscula de la A la F, mostrando además el valor

típico utilizado en los cálculos descritos en secciones anteriores.

Tabla 1. Factores de la prueba de Mapeo

	SIMBOLO	VALOR NOMINAL	DOE
Desviación del instrumento	<i>D</i>	0.359	A
Resolución del instrumento	<i>R</i>	17.937	B
Incertidumbre por calibración del instrumento	<i>Ic</i>	35.875	C
Repetibilidad permitida	<i>R</i>	17.937	D
Media muestral	\bar{x}	1793.42	E
Desviación estándar	<i>S</i>	0.0211	F

Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo del diseño experimental de filtrado se realizó una variación de los seis factores en el intervalo $\pm 10\%$, puesto que este fue el rango de variación observado en datos históricos. Esto facilitó además el empleo de un diseño factorial 2^6 , el cual consta de seis factores y dos niveles, con un nivel de

resolución III, el cual permite distinguir el impacto de los factores principales con un número de corridas moderado. Se realizó un análisis de varianza a través del software estadístico Statgraphics [22], el cual reportó un estadístico r^2 del 99.9968%. De los resultados obtenidos se observa que las variables significativas de la prueba son: la calibración del instrumento (C) y la media muestral (E), la cual depende del número de corridas que se realizan para la calibración del instrumento (dinamómetro), tal como se muestra en la gráfica de Pareto de la Figura 2. El resto de las variables resultaron ser no significativas para el cálculo de la incertidumbre.

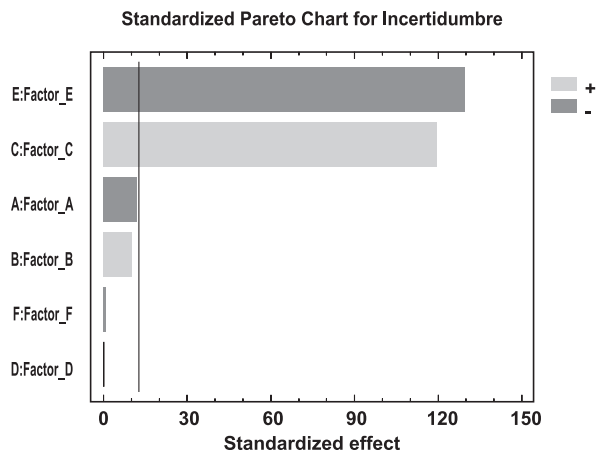


Figura 2. Diagrama de Pareto de Factores Significativos.
 Fuente: Elaboración propia por medio del Software Statgraphics

Del diseño experimental fraccionario se obtiene la siguiente ecuación de regresión entre los factores significativos y la incertidumbre:

$$\text{Incertidumbre} = 2,1047 + 0,194 * \text{Factor}_C - 0,210475 * \text{Factor}_E \quad (14)$$

Esta ecuación nos permite desarrollar el método de ascenso rápido, a fin de localizar la zona de optimalidad de los factores identificados como significativos y posteriormente optimizar sus valores operativos.

Fase II, Desarrollo del Método de Ascenso Rápido

El método de ascenso rápido consiste en realizar incrementos a partir de un origen determinado

para observar el comportamiento de las variables significativas a lo largo de una trayectoria que minimiza o maximiza más rápidamente algún indicador de interés. De la expresión lineal obtenida del diseño experimental de filtrado, el incremento en la variable correspondiente a la media muestral (E) es de -0.2104. Con respecto a la calibración del instrumento (C), el incremento en la variable es de 0.194. Utilizando los incrementos descritos en la Tabla 2, se presentan los incrementos para las variables y el valor respectivo de la incertidumbre.

Tabla 2. Incrementos y decrementos del método de ascenso rápido.

Variables codificadas			
Pasos	E	C	Incertidumbre
Origen	0	0	2.0889
Incremento	0.2230	-0.205	
O-4Δ	-0.8922	0.8223	2.4773
O-3 Δ	-0.6691	0.6167	2.3758
O-2Δ	-0.4461	0.4112	2.2791
O-1Δ	-0.2230	0.2056	2.187
O	0.0000	0.0000	2.0889
		-	
O+1 Δ	0.2230	0.2056	2.0149
		-	
O+2 Δ	0.4461	0.4112	1.9344
		-	
O+3 Δ	0.6691	0.6167	1.8574
		-	
O+4 Δ	0.8922	0.8223	1.7837

Fuente: Elaboración propia obtenida del software Statgraphics

De los resultados de la Tabla 2 se observa que el rango de interés para la optimización, se encuentra en los incrementos O+2Δ, O+3Δ, O+4Δ tal como se presenta en la Figura 3, puesto que se está interesado en minimizar la incertidumbre. Es en este intervalo donde el valor de la incertidumbre se reduce claramente. Es necesario aumentar el nivel de resolución en la zona de optimalidad para poder optimizar los parámetros de control de la prueba, con este objetivo se aplica en la siguiente sección un diseño experimental de tres niveles 3².

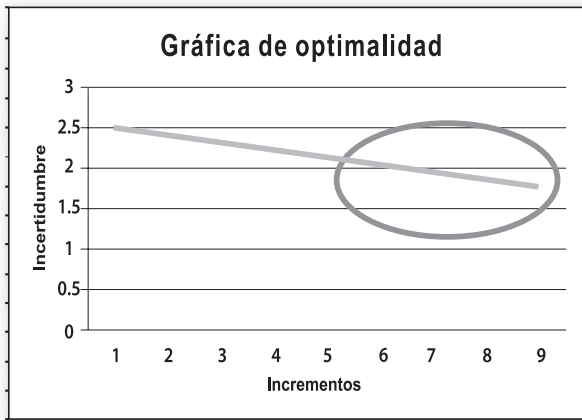


Figura 3. Zona de Optimalidad
 Fuente: Elaboración propia

Fase III, Aplicación de un diseño factorial 3ⁿ

Con la finalidad de obtener más detalle de la zona de optimalidad que se desea analizar, se aplica un diseño factorial de tres niveles para determinar si existe alguna curvatura en dicha zona y de esta manera determinar los valores óptimos de los parámetros significativos de una manera más eficaz. Para esto se realiza una reducción del intervalo de variación original de las variables significativas. Puesto que tenemos dos variables en cuestión, se aplicó un diseño factorial de 3², es necesario codificar las variable de interés, la media muestral (E) y la calibración del instrumento de medición (C), como (-1, 0 y 1), denotando el valor bajo, medio y alto, respectivamente. Con base en los resultados obtenidos, del ANOVA presentado en la Tabla 3, utilizando un nivel de significancia de 0.05, se concluye que E y C son estadísticamente significativos y que la interacción EC y el términos cuadrático E² también son significativos.

Tabla 3. Análisis de la varianza del diseño 3²

Analysis of Variance for Incertidumbre					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:E	0.00905594	1	0.00905594	24451191.35	0
B:C	0.0079935	1	0.0079935	21582597.27	0
AA	1.3339E-06	1	1.3339E-06	3601.52	0
AB	0.00000225	1	0.00000225	6075.04	0
BB	8.89E-09	1	8.89E-09	24	0.0163
Total error	1.11E-09	3	3.70E-10		
Total (corr.)	0.017053	8			

Fuente: Elaboración propia obtenida del software Statgraphics

Adicionalmente, el software Statgraphics muestra también las curvas de nivel de las variables significativas, las cuales se presentan en la Figura 4, en la que se puede apreciar cómo varía el valor de la incertidumbre en función de los cambios de la media muestral (E) y la calibración del instrumento (C). Puesto que el diseño experimental reporta un buen ajuste a los datos, se procede en la siguiente sección a la fase de optimización de los factores significativos a través de un diseño central compuesto.

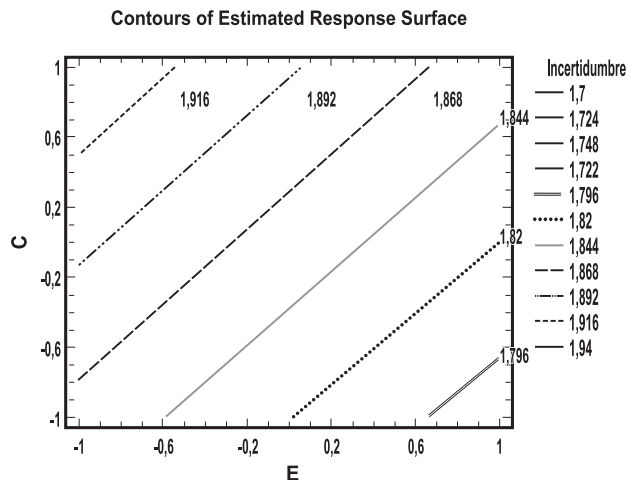


Figura 4. Variación de la Incertidumbre E respecto de C.
 Fuente: Elaboración propia generada del software Statgraphics

Fase IV: Optimización a través de un diseño central compuesto

En esta fase se realiza la optimización de los factores significativos que intervienen en el cálculo de la incertidumbre en la calibración de la prueba de Mapeo. Para esto es necesario agregar puntos extremos al diseño experimental factorial original de dos niveles 2ⁿ, para obtener el cálculo de los valores óptimos en las variables. Se aplicó una codificación de los puntos extremos tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla de codificación de los puntos extremos

	<i>Variables codificadas</i>	<i>Variables Naturales</i>
E	1.41421	1969.9884
E	-1.41421	1856.85160
C	1.41421	34.70546
C	-1.41421	32.61945

Fuente: Elaboración propia

Al agregar los puntos extremos en la Fase IV al diseño experimental de la Fase II, se tienen las condiciones necesarias para aplicar la técnica de superficie de respuesta (RSM), en especial se optimiza los parámetros de control a través de un diseño central compuesto, (DCC), la tabla ANOVA relacionada en esta fase se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de variación de la incertidumbre

Analysis of Variance for Incertidumbre					
Sourc	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:E	0.0120763	1	0.0120763	46226547.6	0
B:C	0.0106644	1	0.0106644	40822158.8	0
AA	3.1114E-06	1	3.1114E-06	11910.17	0
AB	0.00000225	1	2.25E-06	8612.72	0
BB	2.57E-08	1	2.57E-08	98.43	0
Total error	1.04E-09	4	2.61E-10		
Total (corr.)	0.0227465	9			

Fuente: Elaboración propia obtenido con el Software Statgraphics

El diseño central compuesto parece ser un método adecuado de optimización para este caso, puesto que reporto un estadístico R^2 del 99%, y en base en los valores P -value, utilizando un nivel de significancia de 0.05, se concluye que E y C son estadísticamente significativos y que la interacción y los términos cuadráticos también son significativos. El software estadístico permite además obtener la superficie de respuesta tridimensional de los parámetros de control, tal como se presenta en la Figura 6. En este caso, se obtuvo que los valores óptimos estén dados por la siguiente expresión:

$$\text{Incertidumbre} = 1,8574 - 0,0388528 * E + 0,0365111 * C + 0,000825003 * E^2 - 0,00075 * E * C + 0,0000749992 * C^2 \quad (15)$$

De esta expresión se tiene que el valor óptimo para el factor C , correspondiente a la calibración del instrumento, en un valor de la variable natural es de 32.61 y de 1969.9884 para la media muestral, respectivamente. La superficie de respuesta obtenida se muestra en la Figura 6. En la práctica se observa de datos históricos almacenados en el banco de datos del laboratorio, que el intervalo de variación de la media muestral es menor del 1%. En los cálculos realizados se permitió una variación del 10% lo cual es algo bastante raro de encontrar en las operaciones diarias. De este hecho se hace evidente que para reducir la incertidumbre en la prueba de mapeo es necesario considerar las siguientes recomendaciones: primero poner énfasis a la calibración del instrumento (C). Si se quiere reducir la incertidumbre en esta prueba, es necesario realizar actividades de mantenimiento y calibración más frecuentemente a fin de tener el factor C , controlado, en valores bajos y con ello reducir la incertidumbre. Si se lograra operar el dinamómetro bajo las condiciones denotados por los valores reportados por la superficie de respuesta, se lograría una reducción de alrededor del 16% de la incertidumbre. Este resultado mejoraría sin duda el proceso de calibración del dinamómetro y por ende la calidad de los resultados obtenidos de la prueba de Mapeo.

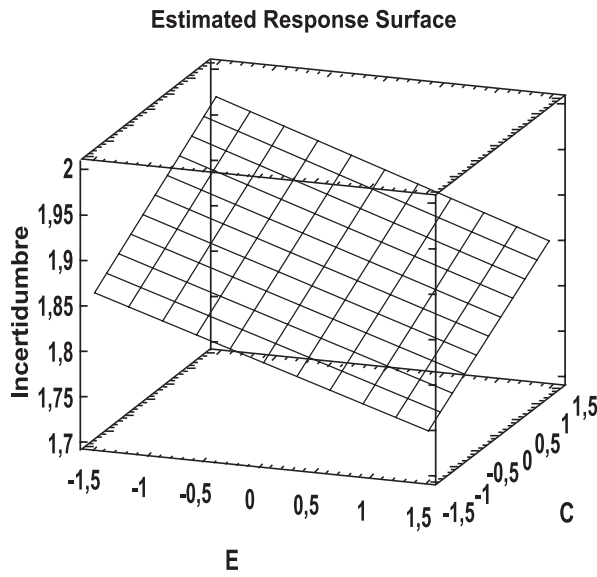


Figura 6. Superficie de respuesta.
 Fuente: Elaboración propia obtenida del Software Statgraphics.

Conclusión

En la presente investigación se realizó una optimización de los diversos parámetros de control que influyen en el cálculo de la estimación de la incertidumbre en la prueba de Mapeo de Emisiones a Diésel, a partir de un previo diagnóstico de las variables significativas de la prueba. Se aplicaron diversas técnicas de Seis Sigma, en particular se utilizaron el diseño de experimentos, el método de ascenso rápido y la técnicas de superficie de respuesta. Los resultados de dichas pruebas nos permiten observar que en el comportamiento de las variables significativas no existe ninguna curvatura en la superficie de respuesta, sin embargo hay una pendiente marcada entre el comportamiento de los factores, lo cual permite obtener sus valores óptimos. Con ayuda del software estadístico Statgraphics se pudo analizar de forma tridimensional el comportamiento de las variables significativas con respecto al indicador *CTQ* de interés, denotado por la incertidumbre de la calibración. La metodología empleada permitió generar una ecuación de aproximación de la incertidumbre de la prueba de Mapeo, la cual permite determinar los valores óptimos de los parámetros de control de la prueba.

De manera particular de los seis parámetros de control de la prueba, se consideraron dos factores significativos para la optimización (la media muestral y la incertidumbre dada por la calibración del instrumento), estos fueron las dos variables

significativas de mayor influencia en el cálculo de la incertidumbre. A fin de reducir el indicador *CTQ* de la prueba de Mapeo, es necesario reducir la variación de los valores de la media de las lecturas obtenidas y realizar un mantenimiento más frecuente al dinamómetro a fin de reducir su incertidumbre en la calibración. Los resultados obtenidos indican que al aplicar la metodología propuesta y operar el equipo con los valores óptimos encontrados se lograría una reducción de la incertidumbre de alrededor del 16%, con esto se cumple con el objetivo de la investigación de identificar las variables significativas y optimizar la operación de la prueba.

La ecuación resultante del modelo heurístico de optimización, es una aportación en el estudio para la estimación de la incertidumbre de la prueba de Mapeo en la calibración del dinamómetro de pruebas a diésel y sustenta la posibilidad futura de continuar aplicando las técnicas de Seis Sigma en las diversas pruebas del laboratorio de diésel del IMP que no han sido estudiadas por nuestro equipo de trabajo.

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo por parte del Instituto Mexicano del Petróleo por permitir el desarrollo de la presente investigación y facilitar el acceso a sus instalaciones, así como a la información necesaria para llevar a cabo el presente proyecto.

Referencias

- [1] Mendoza-Ramírez, E. Rivera-Gómez, H. y Garnica-González, J. (2014). Análisis de la Estimación de la Incertidumbre de la prueba de Mapeo con Técnicas Seis Sigma. Caso Instituto Mexicano del Petróleo, ACACIA (Ed). XVIII Congreso Anual de la Academia de Ciencias Administrativas. Tijuana, Baja California, México.
- [2] Broatch, A., Luján J.M., Ruiz S. & Olmeda P. (2008). Measurement of hydrocarbon and carbon monoxide emissions during the starting of automotive di diesel engines. *International Journal of Automotive Technology*. 9(2), pp. 129-140. DOI 10.1007/s12239-008-0017-6.
- [3] Theodorus, D., Liapis, N., & Zannikos, F. (2013). Estimation of measurement uncertainty arising from manual sampling of fuels. *Talanta*. pp. 360-365.
- [4] Koch, Yang y Gu (2004), Design for Six Sigma through robust optimization. *Struct Multidisc*

- Optim. 26, pp. 235–248, DOI 10.1007/s00158-003-0337-0.
- [5] 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*, pp. 24-28., Orlando Florida.
- [6] Apley D., & Kim J., (2011). *A cautious approach to robust design with model parameter uncertainty. Department of Industrial Engineering & Management Sciences, Northwestern University, Evanston* 43, pp. 471-482, DOI: 10.1080/0740817X.2010.532854
- [7] Tanco M., Viles E., Ilzarde L., & Álvarez M. (2007). *Manufacturing Industries Need Design of Experiments (DoE)*. 2. 1108-1113.
- [8] Mizuyama H., (2005). Statistical robust design of a complex system through a sequential approach. Taylor & Francis. *Journal of Engineering Design*. 16(2), pp. 259–276.
- [9] Gaudard M., Ramsey P., & Stephens M., (2009). *Interactive Data Mining Informs Designed Experiment*. John Wiley & Sons, **25**, pp. 299–315. DOI: 10.1002/qre.971.
- [10] Goh T., & Lam S., (2010). Problem-based Learning Approach to Application of Statistical Experimentation. John Wiley & Sons. 26, pp. 365-374. DOI: 10.1002/qre.1089.
- [11] Chen J., Li Y. & Cox R., (2008). *Taguchi-based Six Sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study*. Springer-Verlag. 41, pp. 760–769. DOI 10.1007/s00170-008-1526-1.
- [12] Frey H., & Tran L. (1999). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Environmental Data and Models*. Volume 2. Performance, Emissions, and Cost of Combustion-Based NOx Controls for Wall and Tangential Furnace Coal-Fired Power Plants. Department of Civil Engineering. DOE/ER/30250. Vol. 2.
- [13] Frey H., & Rhodes D. (1999). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Environmental Data and Models. Volume 1. Theory and Methodology Based Upon Bootstrap Simulation*. Department of Civil Engineering. DOE/ER/30250—Vol. 1.
- [14] Frey H., & Zheng J., (2002), *Method for Development of Probabilistic Emission Inventories: Example Case Study for Utility NOx Emission*, Department of Civil Engineering North Carolina State University Raleigh.
- [15] Frey H. (1998). *Methods for Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Hazardous Air Pollutant Emissions*. Department of Civil Engineering. pp.1-13.
- [16] Norma Oficial Mexicana, (2006). NMX-EC-17025-IMNC. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
- [17] Wolfgang, A. Schmind y Lazos R. (2000). *Guía para la estimación de la incertidumbre de la medición*. Centro Nacional de Metrología. Querétaro, México.
- [18] Norma Oficial Mexicana, (2002). NMX-CH-140-IMNC. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.
- [19] Instituto Mexicano del Petróleo, (2011). *Macroproceso 05LA-Instructivo Técnico. Verificación de la calibración. México*
- [20] Gutiérrez, P. H. y De la Vara, S. R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*. México: Mc Graw Hill.
- [21] Pyzdek & Keller (2013), *The Six Sigma Handbook*, McGraw-Hill, Third Edition.
- [22] Statgraphics Centurion XVI, (2011). Versión 16.2.03. Copyright. Estados Unidos. Inc: Starpoint Technologies.
- Recibido:** 7 de mayo de 2015
Aceptado: 21 de septiembre de 2015