

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DISEÑOS DE EXPERIMENTOS MEDIANTE SIMULACIÓN EN COMPUTADORA CON APLICACIONES INDUSTRIALES

COMPARISON OF EXPERIMENT DESIGN METHODS BY COMPUTER SIMULATION WITH INDUSTRIAL APPLICATIONS

Oswaldo Alejandro Granados Nieto

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya-Industrias Acros Whirlpool, México
osvaldo_alejandro_granados@whirlpool.com

Manuel Darío Hernández Ripalda

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
dario.hernandez@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México en Celaya
alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 27/noviembre/2020

Aceptación: 17/septiembre/2021

Resumen

Durante el proceso de desarrollo de nuevos proyectos de ingeniería, las variables y los procesos se consideran en un estado ideal, aun cuando esto no es cierto. Un ingeniero debe tener claras las consideraciones clave de su proyecto; de lo contrario, los problemas de conceptualización y ejecución serán serios. Para evitar esto, el ingeniero puede recurrir al uso de herramientas que le permitan sintetizar el trabajo. En este trabajo, el diseño de experimentos se presentará como una alternativa para aquellos que llevan a cabo desarrollos de ingeniería simuladas mediante métodos de experimentación por computadora y comparar los resultados de ellas para determinar el camino adecuado para la ejecución del proyecto mediante una toma de decisiones basada en un modelo estadístico.

Palabras Clave: Comparación, diseño, diseño de experimentos, métodos

Abstract

During the process of developing new engineering projects, variables and processes are considered in an ideal state, even when this is not true. An engineer

must be clear about the key considerations of his project; otherwise, the problems of conceptualization and execution will be serious. To avoid this, the engineer can resort to the use of tools that allow him to synthesize the work. In this work, the design of experiments will be presented as an alternative for those who carry out simulated engineering developments using computer experimentation methods and compare the results of them to determine the appropriate path for project execution through decision making based on a statistical model.

Keywords: *Comparison, design, design of experiments, methods.*

1. Introducción

El término de integración en el campo de la ingeniería se refiere a la aplicación y desarrollo práctico de un nuevo producto para una compañía [Pulido, 2008]. Normalmente, las integraciones no son desarrollos perfectos debido a que cuando se elabora conceptualmente el nuevo producto se plantea en condiciones ideales, lo cual, no es así, este efecto genera muchos errores al aplicarse. El concepto de integración es tan complejo debido a que las actividades a desarrollar son tan amplias y complejas que en la realidad son asignadas a una compañía externa o bien si se realiza de manera interna y se constituye un equipo multidisciplinario para la correcta introducción del producto y reducir errores tanto de diseño como de proceso para posteriormente asegurar la venta de un producto de calidad en el mercado.

El error es un concepto que define la diferencia que existe entre un parámetro base contra la realidad. El error enfocado a la ingeniería es un concepto que es parte inherente al desarrollo y la ejecución de las actividades base de un ingeniero [RAE, 2010]. Los errores pueden generarse debido a una toma de decisiones mal sustentadas, por falta de consideración de variables clave, por el factor humano o bien, por combinación de varios factores. Las variables individualmente o en conjunto provocan que trabajos innovadores o prometedores sean archivados por resultados fallidos o simplemente sean descartados. Los errores pueden ser minimizados o eliminados mediante el uso de tecnologías modernas como por ejemplo las tecnologías computacionales y validadas con la elaboración de

prototipos y pruebas en campo o laboratorio. Los prototipos y un método de validación es la combinación que en la industria es la más aplicada.

La tecnología computacional moderna provee una gran gama de instrumentos, hardware, software y procedimientos que son empleados en el desarrollo de actividades en varias disciplinas técnicas, científicas, médicas o simplemente de situaciones simples del día a día de las personas [Chen, Tsui, Allen & Barton, 2000]. En el caso de la ingeniería, la tecnología computacional se emplea para elaborar y diseñar modelos, experimentar, realizar cálculos e inclusive simular procesos de fabricación y ensamble. Las aplicaciones para la tecnología de la computación cada día toman mayor relevancia debido a que las grandes compañías están dando mayor importancia a desarrollar e integrar sus nuevas propuestas a partir de una base e ingeniería asistida por computadora, principalmente por los costos de simular, experimentar y la seguridad de los resultados tiene un mayor índice de confiabilidad y dan una ventaja competitiva en el mercado. Lo anterior debido a la identificación de áreas de oportunidad que de ser correctamente atendidas dan paso a un proceso más rentable, menos problemas de ensamble, optimización de recursos, entre otras. Sin embargo, los experimentos al ser una serie de análisis y pruebas en la que se validan o refutan teorías que pueden pasar con un sistema de interés [Bernal C, 2006]. Los experimentos, por lo general, aplicados en la ingeniería resultan costosos no solo desde el punto de vista económico, sino también resulta costoso por el uso de los recursos materiales y humanos, además por la disponibilidad de equipos y en sí de la tecnología a utilizar. Por otro lado, el poco o nulo apoyo de las instituciones para llevar a cabo experimentos es también un factor importante. Los experimentos en ingeniería pueden ser simplificados ya que existen conceptos como, por ejemplo, la técnica del diseño de experimentos. El diseño de experimentos o DOE por sus siglas en inglés (Design of experiments), es una técnica que utiliza herramientas estadísticas para diseñar las condiciones ideales de un nuevo producto y su proceso para que cumpla con las expectativas de diseño empleando el menor número de experimentos posibles [Montgomery, 1996]. Los DOE es una técnica que simplifica todo el proceso de los experimentos y en general el camino que un ingeniero debe cruzar para realizar su desarrollo de buena

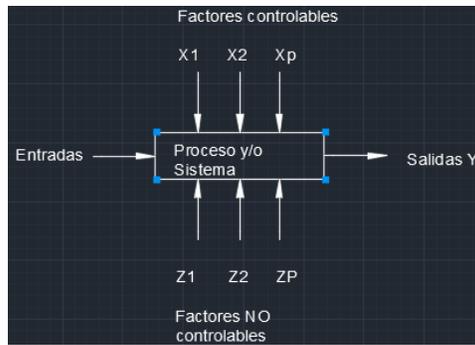
manera. Además, si en esto se incluyen las tecnologías computacionales, los experimentos son alcanzables y pueden proveer resultados más exactos en un tiempo menor, siempre y cuando se comprenda de manera adecuada lo que se está investigado y hacia dónde se quiere llegar [Robles de la Torre, 2007]. Los DOE aplicados a la industria son recomendados con tecnologías computacionales requieren elaborarse a partir de modelos CAD (Computer aided design) para referirse al diseño del producto, modelos CAM (Computer aided manufacturing), para referirse al proceso de manufactura y por último CAE (Computer aided engineering), para toda la ingeniería del producto [Kai Chang et al [2006]]. Los modelos deben ser claros en las entradas y salidas del sistema, en caso contrario, los resultados obtenidos pueden ser anormales o constantes, esto quiere decir sin respuesta a la variación [Chen, Tsui, Allen & Barton, 2000].

Diseños de experimentos (Métodos y consideraciones)

Montgomery [2004], define diseño de experimentos como una prueba en la que se realizan algunos cambios intencionados a las variables de entrada de un proceso o sistema para que podamos observar e identificar los motivos de los cambios en la respuesta de salida. Los experimentos tienen el objetivo de analizar el desempeño de procesos y sistemas. El proceso o sistema puede representarse con el modelo ilustrativo en la figura 1, en el cual, se puede observar un modelo clásico con entradas, salidas y los factores controlables y no controlables que afectan a un sistema o proceso [Montgomery, 2004].

Existen varios tipos de metodologías para llevar a cabo un diseño de experimentos, Montgomery [2004], Gutiérrez Pulido [2010], et al, expresan en sus textos que los diseños de experimentos se pueden desarrollar como:

- **Experimentos comparativos simples:** Este método es el más sencillo de todos, esto debido a que su desarrollo es un análisis de estadísticos tradicionales como la media, varianza y desviaciones estándar, soportados con gráficos de dispersión, histogramas. Este método cuenta con la desventaja que para desarrollos complejos no es recomendado debido a la cantidad de cálculos que se deben realizar.



Fuente: Elaboración propia basado en el modelo clásico de Montgomery

Figura 1 Modelo básico de entradas y salidas para un modelo DOE.

- **Experimentos con un solo factor:** Los experimentos con un solo factor se emplean para cuando se tienen 2 niveles del factor de interés y el desarrollo es completamente aleatorio [Montgomery, 2004]. Al igual que el método de comparación simple, puede apoyarse con métodos de estadísticos básicos y diagramas, pero no siempre es la mejor opción debido a los niveles. Una herramienta con mayor grado de confianza para este caso es el uso de los análisis de varianza [ANOVAS]. Básicamente, este método se basa en las pruebas de hipótesis H_0 y H_1 .
- **Bloques aleatorizados, cuadrados latinos y diseños relacionados:** El diseño por bloques aleatorizados o bien, bloques completamente aleatorios es una forma de diseño de experimentos en la cual, a todos aquellos factores no controlables que posiblemente tengan un efecto sobre la respuesta final del experimento. Una de las formas de analizar este sistema es con el análisis de varianzas o bien con la aleatorización, esta es una técnica que por definición se emplea para proteger al experimento de las variaciones causadas por los factores no controlables y por lo tanto el error sea el mínimo posible [Montgomery, 2004]. Esta técnica al igual que los anteriores mencionados, al igual que los siguientes, el modelo matemático a obtener está dado por ecuación 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

- **Diseño de bloques:** A los factores adicionales al factor de interés que se incorporan de manera explícita en un experimento comparativo se les llama

factores de bloque. [Gutiérrez, 2009] Éstos tienen la particularidad de que no se incluyen en el experimento porque interesa analizar su efecto, sino como un medio para estudiar de manera adecuada y eficaz al factor de interés. Los factores de bloque entran al estudio en un nivel de importancia secundaria con respecto al factor de interés y, en este sentido, se puede afirmar que se estudia un solo factor, porque es uno el factor de interés. En un diseño en bloques completos aleatorios se consideran tres fuentes de variabilidad: el factor de tratamientos, el factor de bloque y el error aleatorio, es decir, se tienen tres posibles "culpables" de la variabilidad presente en los datos. El modelo para elaborar este diseño nace de la ecuación 2.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_{ij} + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, k \\ j = 1, 2, 3, \dots, j \end{cases} \quad (2)$$

- **Diseños factoriales y factoriales fraccionados:** Un experimento factorial es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno de los cuales, con distintos valores, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles en todos los factores. [Montgomery, 2004] Un diseño fraccionado es un diseño en el cual se realizan en un subconjunto seleccionado o "fracción" de las corridas experimentales incluidas en el diseño factorial completo. Los diseños factoriales fraccionados son una opción adecuada cuando los recursos son limitados o el número de factores incluidos en el diseño es grande, porque utilizan menos corridas que los diseños factoriales completos.

Un diseño factorial fraccionado utiliza un subconjunto de un diseño factorial completo, por lo que parte de los efectos principales y las interacciones de 2 factores se confunden y no se pueden separar de los efectos de otras interacciones de orden superior. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes que en ocasiones tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor [Gutiérrez, 2009], ecuación 3.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (3)$$

2. Métodos

En la figura 2 se muestra la metodología de manera esquemática para comparar diseños de experimentos con experimentos en computadora, tomando como base para un mismo patrón estructural para el desarrollo:

- **Etapa 1:** Identificar los parámetros a confrontar e identificar los parámetros a confrontar. En esta etapa se determina en conjunto [Autores y empresa], los criterios que, desde el punto de vista técnico. En este punto en conjunto, las partes involucradas, acordaron que los parámetros a evaluar son: tiempo de ejecución, cantidad de código, MSE, error teórico vs error práctico y costos.

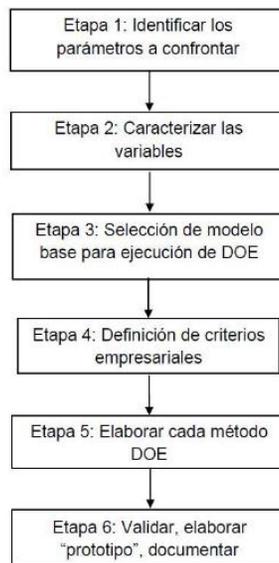


Figura 2 Esquema del desarrollo a seguir.

- **Etapa 2:** Caracterizar las variables. En esta etapa se etiquetará y modelará cada uno de los parámetros acordados como factores controlables o incontrolables para el desarrollo de nuestro diseño de experimentos y se definen los recursos iniciales para la obtención o bien, para el inicio del proceso.
- **Etapa 3:** Selección de modelo base para ejecución de DOE. Selección de modelo base para ejecución de DOE. Se revisa con la empresa que apoya al

proyecto, un modelo que sea mayormente representativo y pueda ser ejecutado por varios métodos de diseño de experimentos y de igual manera, pueda ser ejecutado por varios métodos de experimentos.

- **Etapa 4:** Definición de criterios empresariales. De manera paralela, se realizarán las siguientes actividades:
 - ✓ Elaborar un sistema de confidencialidad. Al ser un modelo proporcionado por una empresa, se debe elaborar un protocolo para que la información que se genere de la ejecución de los DOE sea solamente para fines académicos.
 - ✓ Definición de metodología de desarrollo. En este apartado se realizará el plan de elaboración de cada modelo de DOE.
 - ✓ Definición de recursos extras requeridos. Una vez elaborado el plan, se evalúa la necesidad de obtener recursos extras para desarrollo de los experimentos, de ser así, se elaboran solicitudes pertinentes de apoyo.
- **Etapa 5:** Elaborar cada método DOE. Se lleva a cabo la elaboración de DOE, por cada método y experimento. Al final del ejercicio, se concentra la información y los valores acordados para la comparación.
- **Etapa 6:** Validar, prototipo y documentar. Como parte del convenio con la empresa, se debe elaborar un “kit” de prototipos con el método o métodos seleccionados. La información generada se incluirá dentro del método del desarrollo de tecnología y de ensamble.

3. Resultados

Los resultados preliminares obtenidos, dan pie a que a una revisión más detallada de lo que se pretende en el diseño de experimentos, esto debido a que cada vez que se realiza una simulación y corridas de los experimentos (Tabla 1), el desarrollo para buscar un modelo matemático acertado o bien que diera una buena aproximación para el fenómeno que se busca analizar, por lo tanto, se propone que se realice una investigación más a fondo y considerar métodos de simulación en computadora para realizar experimentos más detallados. El modelo inicial obtenido como base es mostrado en tabla 2.

Tabla 1 Tabla de parámetros iniciales.

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Y: Tiempo de giro
Cadena	Usuario	Longitud					
-1	-1	-1	1	1	1	-1	4.80
1	-1	-1	-1	-1	1	1	25.01
-1	1	-1	-1	1	-1	1	22.98
1	1	-1	1	-1	-1	-1	9.91
-1	-1	1	1	-1	-1	1	28.04
1	-1	1	-1	1	-1	-1	21.25
-1	1	1	-1	-1	1	-1	12.65
1	1	1	1	1	1	1	18.75

Tabla 2 Valores iniciales de beta.

B0	B1	B2	B3	B12	B13	B23
17.92375	0.80625	-1.85125	2.24875	.2.54875	8.47250	-2.62125

Al correr pruebas de este modelo obtenido (Tabla 2) y validarlo con prototipos de la prueba, se determina que no es ni concluyente, ni preciso, por lo tanto, se procede con un modelo y mayor cantidad de corridas, en donde a partir de este esquema más complejo, tabla 3, se obtiene un modelo más preciso, pero más costoso y con más implicaciones para validar. Por lo tanto, si se desea precisión, es recomendable hacer múltiples corridas, pero, esto involucra un costo.

Tabla 3 Experimento ampliado.

A	B	C	D	Y1	Y2	Y3
-1	-1	-1	-1	67	800	750
-1	-1	-1	1	45	800	750
-1	-1	1	-1	47	1278	1278
-1	-1	1	1	39	1400	1200
-1	1	-1	-1	45	870	800
-1	1	-1	1	31.5	952	850
-1	1	1	-1	43	1030	900
-1	1	1	1	43	1237	1218
1	-1	-1	-1	46	1050	700
1	-1	-1	1	45	930	850
1	-1	1	-1	49.5	1145	1145
1	-1	1	1	46	2600	2500
1	1	-1	-1	43	930	900
1	1	-1	1	40	1067	900
1	1	1	-1	47	1474	1240
1	1	1	1	38.5	1340	1300

$$Y_1 = 44.72 - 0.344 - 3.34B - 0.594C - 3.72D + 1.09AB + 1.47AC + 1.72AD + 2.09BC + 0.59BD + 1.75CD - 2.34ABC - 1.46ABD - 2.22ADC - 0.22BCD - 0.15ABCD$$

En esta segunda etapa de experimentación, el modelo obtenido es validado nuevamente con un prototipo, siendo un resultado aceptable. Para este experimento se realizó una serie de experimentos cargados con valores simulados por cada uno de los modelos explicados anteriormente en el capítulo . El resultado en campo obtenido con el prototipo da pie a seguir con la integración del proyecto.

4. Discusión

Los resultados obtenidos al ser realizados por varias técnicas de diseños de experimentos y con múltiples corridas, consideraciones y tiempo. Se determina que la mejor consideración para realizar un trabajo con precisión y representativo del fenómeno a evaluar en campo, por lo que el número de corridas aumenta aun cuando los experimentos se realizaron en computadora, por lo tanto se recomienda buscar un método en el cual se puedan realizar estos experimentos y permita que las variables corran de manera aleatoria para obtener el mejor resultado.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. 1978, *Statistics for Experimenters*, 2nd, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [2] Chang, T. C., & Wysk, R. A. [1997]. *Computer-aided manufacturing*. Prentice Hall PTR.
- [3] Dean, A., Voss, D., & Draguljić, D. [1999]. *Design and analysis of experiments* [Vol. 1]. New York: Springer.
- [4] Real Academia Española. [2010] *Ortografía de la lengua española*. Espasa Libros.
- [5] Fisher, R. A. [1971]. *The design of experiments*. New York: Hafner Publishing Company.
- [6] Box, G.E, Hunter, S. [2005]. *Statistics for experimenters: Design, Innovation and discovery*. New Jersey: Wiley Interscience.
- [7] Kuehl, R. O. [2001]. *Diseño de Experimento, Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones* [2da ed.]. Ciudad de México: Thompson Learning.

- [8] Groover, M., & Zimmers, E. W. J. R. [1983]. CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. Pearson Education.
- [9] SAS Institute Inc. [2009]. JMP Design of experiments JMP® 8. Design of Experiments Guide, Second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- [10] Fang, K. T., Li, R., Sudjianto, A. [2006]. Design and modeling for computer experiments [1ERA ed.]. CPC Press.
- [11] Koehler, J. R., & Owen, A. B. [1996]. Computer experiments. Handbook of statistics. Elsevier Science, 261-308.
- [12] Mandol, S., Bhattacharjee, D., & Dan, P. K. [2016]. Robust optimization in determining failure criteria of a planetary gear assembly considering fatigue condition. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53[2], 291-302.
- [13] Montgomery, D. C. [2004]. Diseño y Análisis de Experimentos [2 ed.]. Cd. de México: Limusa.
- [14] Pulido, H. G. [2008]. Análisis y diseño de experimentos [2da ed.]. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- [15] Montgomery, D. C. [2007]. Métodos de superficie de respuesta y otros enfoques para la optimización de procesos. Diseño y análisis de experimentos, 427-430.
- [16] Ronald Walpole, R. M. [2012]. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias [9na ed.]. Ciudad de México: Pearson.
- [17] Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., & Wynn, H. P. [1989]. Design and analysis of computer experiments. *Statistical science*, 409-423.
- [18] Santner, T. J., Williams, B. J., Notz, W. I., & Williams, B. J. [2019]. The design and analysis of computer experiments 2ed. New York: Springer.
- [19] Tran, K. L., Douthe, C., Sab, K., Dallot, J., & Davaine, L. [2014]. A preliminary design formula for the strength of stiffened curved panels by design of experiment method. *Thin-Walled Structures*, 79, 129-137.
- [20] Welch, W. J., Buck, R. J., Sacks, J., Wynn, H. P., Mitchell, T. J., & Morris, M. D. [1992]. Screening, predicting, and computer experiments. *Technometrics*, 34[1], 15-25.