DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA

Isidro Jesús González Hernández [a]

RESUMEN

Los escenarios que rodean a las industrias hoy, en día en un mundo globalizado donde los adelantos tecnológicos y científicos están en constante evolución, hacen que el nivel de calidad de los productos y servicios sea cada vez mayor.

En la actualidad uno de los factores claves para el éxito de una industria, es hacer uso de toda de su capacidad de conocimiento y aprendizaje, así como de su experiencia. La experimentación en las industrias es uno de los elementos que más pueden contribuir al aprendizaje y a la mejora de los productos y procesos.

La aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) se presenta como una herramienta efectiva para entender y optimizar los procesos y productos en la industria. La metodología estadística por excelencia para optimizar la experimentación se conoce como Diseño de Experimentos. Se define simplemente como un método para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación. Se puede definir como la realización de un conjunto de pruebas en las cuales se realizan cambios voluntarios a los parámetros de control de un proceso o sistema, cuyo objetivo es observar e identificar las razones de los cambios en la variable de estudio o respuesta y cuantificarla.

Los experimentos en la industria moderna son más complicados, porque son muchos los factores que son susceptibles de controlarse y que afectan a los productos y/o procesos, de aquí que son muchas combinaciones de dichos factores que se deben probar para obtener resultados válidos y consistentes.
En la industria, el diseño de experimentos suele aplicarse básicamente en dos áreas: el diseño y la mejora de procesos y productos. Pero la mayoría de los problemas industriales, están condicionadas por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por eso todas las industrias o empresas deberían intentar responder antes de realizar sus experimentos la siguiente pregunta, ¿Cómo puedo obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente?
El objetivo del ensayo es presentar una breve descripción teórica del proceso de planificación del diseño de los experimentos y los modelos estadísticos empleados en el Diseño de Experimentos.

Palabras clave: Estadística, Diseño de Experimentos, Media, Varianza, Análisis de la Varianza (ANOVA), Diseño de bloques completos, Diseños Factoriales, Diseño factorial 2^k, Diseños Anidados y Superficies de Respuesta.

Abstract

The scenarios surrounding industries today, is a globalized world where scientific and technological advances are constantly evolving, make the quality of products and services grow.
Currently one of the key factors for the success of an industry is to use all of its capacity for knowledge and learning, and their experience. Experimentation in industries is one of the elements that can contribute to learning and improvement of products and processes.
The application of Design of Experiments (DoE) is presented as an effective tool for understanding and optimizing the processes and products in the industry. The statistical methodology to optimize experimentation is called Design of Experiments. Is simply defined as a method of systematically applying statistics to experimentation process. It can be defined as the realization of a set of tests for make voluntary changes to the control parameters of a process or system, whose objective is to observe and identify the reasons of the changes in the study or response variable and quantify it.
The experiments in modern industry are more complicated, because there are many factors that are subject to control and affect the products and/or processes, hence are many combinations of these factors that should test to obtain valid and consistent results.
In industry, the design of experiments is usually applied in two main areas: the design and improvement of processes and products. But most industrial problems, are conditioned by time and budget, it represents a substantial limitation on the time to experiment. So all industries or companies should try to answer before their experiments to the following question, how I can get the most information possible experiments and more efficiently?
The objective of the current paper is to present a brief theoretical description of the planning process for the design of experiments and statistical models used in the Design of Experiments.

Keywords: Statistics, Experimental Design, mean, variance, Analysis of Variance (ANOVA), Complete Block Design, Factorial Designs, 2^k Factorial Design, Nested Designs and Response Surface.

1 Introducción

Todas nuestras actividades asociadas con planear y realizar estudios de investigación tienen implicaciones estadísticas, es por ello que prácticamente en todos los campos de estudio y empresariales se llevan a cabo experimentos, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular.

En ingeniería, la experimentación desempeña un papel importante en el diseño de nuevos productos, el desarrollo de procesos de manufactura y el mejoramiento de procesos. El objetivo en muchos casos sería desarrollar un proceso robusto,

es decir, un proceso que sea afectado en forma mínima por fuentes de variabilidad externas [1].

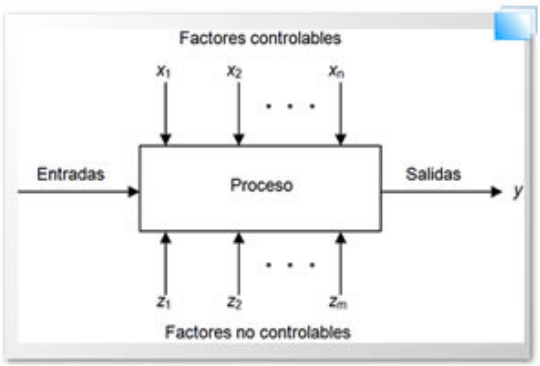
Como ejemplo de un experimento, suponga que un ingeniero químico tiene interés en los resultados obtenidos por las mediciones de los promedios del metal pesado cadmio por 5 diferentes laboratorios, los resultados de cada laboratorio presentan cierta variación, esta variación puede deberse al azar o a que los laboratorios tienen métodos diferentes de análisis que dan resultados significativamente diferentes. El diseño de experimentos es una técnica estadística que permite decidir cuál de estas dos conjeturas es la verdadera disminuyendo la probabilidad de cometer un error.

El "Diseño de Experimentos" es una técnica estadística sistemática cuyo objetivo es realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados para averiguar si determinados factores influyen en la variable de interés o de estudio y, si existe influencia de algún factor en el proceso o producto, cuantificarla.

2 Diseño de experimentos en la industria

El diseño de experimentos es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras cosas, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir la variabilidad o los costos de producción, así como aumentar la calidad de los productos o servicios [1].

En general los experimentos se usan para estudiar el desempeño de procesos y sistemas. El proceso o sistema puede representarse como se muestra en la figura 1. El proceso puede por lo general visualizarse como una combinación de máquinas, métodos, personas u otros recursos que transforman cierta entrada (con frecuencia cierto material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso $x_1, x_2,..., x_n$ son controlables, mientras que otras $z_1, z_2,...,z_m$ son no controlables [2].



(multimedia/e1/e1_1.jpg)

Figura 1. Modelo general de un proceso o sistema

Los objetivos del diseño de experimentos podrían comprender los siguientes puntos:

- Determinar cuáles son la variables que tiene mayor influencia sobre la respuesta *y*.
- Determinar cuál es el ajuste de las *x* que tiene mayor influencia para que *y* esté casi siempre cerca del valor nominal deseado.
- Determinar cuál es el ajuste de las *x* que tiene mayor influencia para que la variabilidad de *y* sea reducida.
- Determinar cuál es el ajuste de las *x* que tiene mayor influencia para que los efectos de las variables $z_1, z_2,...,z_m$ sean mínimos[2].

El diseño experimental es una herramienta de importancia fundamental en el ámbito industrial (ingeniería) e incluso en las empresas de servicio para mejorar el desempeño de un proceso de manufactura o servicio. También tiene múltiples aplicaciones en el desarrollo de nuevos productos y procesos [2]. El diseño de experimentos se puede utilizar en las industrias para:

- Mejorar los procesos, ya sea mejorando su eficiencia, su confiabilidad o su rendimiento.
- Asistir en la solución problemas.
- Aprender de los procesos y sus fallos.
- Establecer relaciones de causa-efecto entre las entradas (input) de un proceso y sus salidas (output).
- Identificar los factores que tiene el mayor impacto y el menor en los procesos y/o productos.
- Lograr una producción de productos que cumplan con las especificaciones que sean a su vez robustos a ruidos externos.
- Establecer una región (o ventana) del proceso donde unos factores pueden operar, averiguando la sensibilidad al cambio de algunos factores en la respuesta.
- Fijar especificaciones y tolerancias lógicas para productos y procesos.
- Obtener una ecuación polinómicas que modele el comportamiento de la respuesta de un proceso en una región de variación de los factores.
- Verificar si la solución adoptada apara mejorar un proceso, realmente obtiene los resultados esperados [1].

3 Algunas aplicaciones típicas del diseño de experimentos en la industria

La aplicación de las técnicas del diseño experimental en las fases iniciales del desarrollo de un proceso puede redundar en:

1. Mejoras en el rendimiento del proceso.
2. Variabilidad reducida y conformidad cercana con los requerimientos nominales o proyectados.
3. Reducción del tiempo de desarrollo.
4. Reducción de los costos globales.

Entre las aplicaciones del diseño experimental en el diseño de ingeniería (desarrollo de nuevos productos) se encuentran:

- La evaluación y comparación de configuraciones de diseños básicos.
- La evaluación de materiales alternativos.
- La selección de los parámetros del diseño para que el producto tenga un buen funcionamiento en una amplia variedad de condiciones de campo, es decir, para que el producto sea robusto.
- La determinación de los parámetros clave del diseño del producto que afectan el desempeño del mismo [2].

4 Planificación de un diseño de experimentos

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muéstrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente en el sistema o proceso que se está estudiando y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario aplicar un enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

Las etapas a seguir en el desarrollo de un problema de diseño de experimentos son las siguientes:

- *1. Identificación del problema y definir los objetivos*. Es común en la industria no darse cuenta de que existe un problema en un proceso o producto que requiere experimentación para mejorar su eficiencia o calidad, para aplicar un experimento es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del mismo. Es importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas: ingeniería, calidad, manufactura, mercadotecnia, administración, el cliente y el personal de operación. En la mayoría de los casos es conveniente hacer una lista de los problemas o preguntas específicas que van a abordarse en el experimento [2]. Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 1.
- 2.

Actividades	Herramientas
1.- Seleccionar equipo de trabajo	Diagrama de flujo
2.- Formular problema	Gráficos de control

3.- Documentar información importante	Gráfico jerarquizado de objetivos Mapa de procesos
4.- Elegir respuestas	
5.- Establecer objetivo	

Tabla 1.Actividades y herramientas para la fase 1[1].

- *3. Elección de los factores y los niveles*. Una fuente de variación es cualquier "cosa" que pueda generar variabilidad en la respuesta u objeto de estudio. Es recomendable hacer una lista de todas las posibles fuentes de variación del problema, distinguiendo aquellas que, a priori, generarán una mayor variabilidad. Se denomina factor tratamiento a cualquier variable de interés para el experimentador cuyo posible efecto sobre la respuesta se quiere estudiar. Se distinguen dos tipos:
  - Factores tratamiento: son aquellas fuentes cuyo efecto sobre la respuesta es de particular interés para el experimentador.
  - Factores "nuisance": son aquellas fuentes que no son de interés directo pero que se contemplan en el diseño para reducir la variabilidad no planificada.

  Los niveles de un factor tratamiento son los tipos o grados específicos del factor que se tendrán en cuenta en la realización del experimento. Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 2.

Actividades	Herramientas
1.- Identificar factores	AMFE*
2.- Clasificar factores	Diagrama de afinidad
3.- Definir estrategias para algunos factores	Diagrama Causa-Efecto
4.- Describir conocimiento actual de los efectos de los factores	Mapa de procesos
5.- Determinar rangos y niveles	Diagramas IDEF0**

** AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos), ** IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling)*

Tabla 2. *Actividades y herramientas para la fase 2[1].*

- *4. Selección de la variable respuesta*. Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. Los datos que se recogen en un experimento son medidas de una variable denominada variable respuesta o variable de interés y es importante precisar en qué unidades se mide. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (o ambos) de la característica medida será la variable respuesta. Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 3.

Actividades	Herramientas
1.- Identificar los objetivos del experimento	Gráfico jerarquizado de objetivos AMFE* Diagrama Causa-Efecto Mapa de proces
2.- Identificar la variable respuesta	
3.- Identificar en que unidades se medirá la variable respuesta	

** AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos)*

Tabla 3. *Actividades y herramientas para la fase 3[1].*

- *5. Elección del diseño experimental*. La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas). Es importante tener en mente los objetivos experimentales. En muchos experimentos de ingeniería se sabe que algunos de los niveles de los factores (variables) producirán valores diferentes de la respuesta. En consecuencia, el interés se centra en identificar "qué" factores causan esta diferencia y en estimar la *magnitud* del cambio de la respuesta. en otras palabras es determinar el "cómo" se van a realizar los experimentos (especificar que unidades experimentales se observarán bajo cada tratamiento). Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 4.

Actividades	Herramientas
1.- Caracterizar factores	Aleatorización Análisis asistido por software Réplicas Representación gráfica
2.- Pre-analizar	
3.- Elegir tipo de diseño	
4.- Seleccionar diseño experimental	
5.- Elegir niveles	

** AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos)*

Tabla 4. *Actividades y herramientas para la fase 4[1].*

- *6. Realización del experimento*. En esta fase suele ser conveniente no apresurase a realizar los experimentos, sin antes analizar la realización de algunas actividades previas debido a que se suelen subestimar los aspectos logísticos y de planificación de DoE en ámbitos de manufactura, investigación y desarrollo se debe asegurar que todos los recursos necesarios para la experimentación estén disponibles. Se debe tener especial cuidado y para ello intentar adelantarse a los problemas. Para ello antes de comenzar con la experimentación no se debe olvidar de:
  - Seleccionar la ubicación correcta para realizar el experimento.
  - Checar la disponibilidad del equipamiento, máquinas y operarios para llevar a cabo las experimentaciones.
  - Verificar que todas las combinaciones son viables.
  - Preparar las hojas de recolección de datos.
  - Otorgar las instrucciones necesarias para los que realizan los experimentos [1].

  Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 5.

Actividades	Herramientas
1.- Preparar experimentos	Pruebas piloto Hoja recogida de datos
2.- Analizar la necesidad de pruebas piloto	
3.- Realizar experimentos y recolectar datos	

Tabla 5. Actividades y herramientas para la fase 5[1].

- *7. Análisis estadístico de los datos*. En esta fase, Se deberán usar métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. si el experimento se ha diseñado correctamente y se ha llevado a cabo de acuerdo al diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados. Con frecuencia se encuentra que los métodos gráficos simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos. Debido a que muchas de las preguntas que el experimentador quiere responder pueden insertarse en el marco de la prueba de hipótesis, los procedimientos para probar hipótesis y estimar intervalos de confianza son muy útiles en el análisis de datos de un experimento diseñado. Para esta fase se recomienda utilizar un software estadístico[2]. Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 6.

Actividades	Herramientas
1.- Calcular el efecto de los factores	Análisis de regresión
2.- Determinar los factores significativos	ANOVA*
3.- Interpretar resultados	ANCOVA**
4.- Construir modelo de predicción	Gráficos de contorno
5.- Optimizar respuestas	Gráficos de probabilidad normal
6.- Evaluar necesidades de nuevos experimentos	Gráficos de Pareto

**ANOVA (Analysis of Variance) en español Análisis de la varianza*

*** ANCOVA (Analisis de la Covaraianza)*

***Tabla 6.** Actividades y herramientas para la fase 6[1]*

- *Mejoras, control y conclusiones*. Todo el trabajo de las fases anteriores, tiene que dar sus resultados en esta etapa. Por lo que se intentará maximizar los beneficios. Para mejorar se recomienda ser más creativo y tener una perspectiva más amplia. Una vez implementadas las mejoras se debe realizar el seguimiento y verificar la estabilidad de las mejoras obtenidas [1]. Una vez que se ha hecho el análisis de los datos, la mejora y el control, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados [2]. Las actividades y herramientas que nos apoyan a realizar esta fase se presentan en la tabla 7.

Actividades	Herramientas
1.- Evaluar la necesidad de experimentos confirmatorios.	Diseño de experimentos Gráficos de control Plan de control Procedimientos
2.- Implementar controles	
3.- Validar resultados	

***Tabla 7.** Actividades y herramientas para la fase 7[1].*

5 Métodos estadísticos para el diseño de experimentos

A. Experimentos con un solo factor: Análisis de la Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza sirve para verificar si hay diferencias estadísticamente significativas entre medias cuando tenemos más de dos muestras o grupos en el mismo planteamiento. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Típicamente, el análisis de varianza se utiliza para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de una población o tratamiento es distinta de la media de otra población.

Un ejemplo para este tipo de diseño sería el siguiente: Supongamos que un ingeniero de desarrollo de productos desea maximizar la resistencia a la tensión de una nueva fibra sintética que se utilizará para fabricar camisas. Por experiencia, parece que la resistencia (o fortaleza) se ve influida por el % de algodón presente en la fibra. Ante esta situación, el ingeniero decide tomar cinco ejemplares muestras para cinco diferentes niveles de % de algodón y medir la fortaleza de las fibras así producidas. El análisis de la varianza nos ayudará a responder las siguientes cuestiones: a) ¿Influye el % de algodón en la fortaleza de la fibra fabricada? y b) Si es así, ¿qué niveles de % de algodón son similares y cuáles no?

El objetivo del análisis de la varianza (ANOVA) se basa en la descomposición de la variabilidad total en dos partes, una parte debida a la variabilidad entre las distintas poblaciones o tratamientos (variabilidad entre grupos o variabilidad explicada por el diseño) y otra parte que puede considerarse como la variabilidad intrínseca de las observaciones (variabilidad dentro de los grupos o residual). El método estadístico de ANOVA se puede encontrar en la bibliografía [2] y [3].

B. Diseño de bloques completos

En cualquier experimento, la variabilidad que surge de un factor perturbador puede afectar a los resultados. Cuando el factor perturbador es conocido y controlable puede utilizarse la técnica "diseño de bloques completos", en este tipo de diseño de experimentos se consideran tres fuentes de variabilidad: el factor de tratamientos, el factor de bloques y el error aleatorio ,es decir, se tienen tres posibles "culpables" de la variabilidad presente en los datos. este método estadístico agrupa las unidades experimentales en bloques para comparar tratamientos en un medio más homogéneo, el cual le permite eliminar de manera sistemática el factor perturbador sobre las comparaciones estadísticas entre los tratamientos.

El uso de bloques estratifica las unidades experimentales en grupos homogéneos, o unidades parecidas. Una buena elección de los criterios de bloquización disminuye la variación entre las unidades dentro de los bloques en comparación de las unidades de diferentes bloques, las categorías generales de buenos criterios son: a) proximidad (parcelas adyacentes), b) características físicas (edad o peso), c) tiempo y d) administración de tareas en el experimento.
En la industria los factores de bloqueo que aparecen en la práctica son: turno, lote, día, tipo de material, línea de producción, operador, máquina, método, etc.

Un ejemplo para este tipo de diseño sería el siguiente: Un ingeniero de producción investiga el efecto de cuatro métodos de producción A, B, C y D, sobre el tiempo de producción en minutos. En primera instancia la estrategia experimental es aplicar cuatro veces los cuatro métodos de producción en orden completamente aleatorio (las 16 pruebas en orden aleatoria), se supone que de acuerdo a como se ha hecho el estudio, además del método de producción, los experimentadores se dan cuenta que hay cuatro operadores y consideran que esto puede afectar de manera significativa los tiempos de producción (variable respuesta), y por ende la comparación de los métodos, entonces debe utilizar el diseño en bloques completos.

El objetivo es tener comparaciones precisas entre los tratamientos de los estudios de investigación. la bloquización es un medio para reducir y controlar la varianza del error experimental con el fin de lograr una mayor precisión.

C. Diseños Factoriales

En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son lo más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Por ejemplo si el factor *A* tiene *a*

niveles y el factor *B* tiene *b* niveles, cada réplica contiene todas las *ab* combinaciones de los tratamientos. Cuando los factores están incluidos en un diseño factorial, es común decir que están cruzados.

La necesidad de estudiar conjuntamente varios factores obedece a la posibilidad de que el efecto de un factor cambie según los niveles de otros factores, esto es, que los factores interactúen, o exista interacción. También se utilizan los arreglos factoriales cuando se quiere optimizar la respuesta o variable dependiente, esto es, se quiere encontrar la combinación de niveles de los factores que producen un valor óptimo de la variable dependiente.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio del nivel de un factor. con frecuencia se le llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento.

D. Diseño factorial 2^K

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre un respuesta. Sin embargo, hay varios casos especiales del diseño factorial general que son importantes debido a su uso generalizado ene le trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales es el de *k* factores, cada uno con sólo dos niveles. estos niveles pueden ser cuantitativos, como dos valores de temperatura, presión o tiempo, o bien cualitativos, como dos máquinas, dos operadores, los niveles alto y bajo de un factor, o quizá la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de este diseño requiere $2 \times 2 \times ... \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama diseño factorial 2^k.

El diseño 2^k es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número recorridas con las que pueden estudiarse *k* factores en un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores.

Considérese una investigación llevada a cabo para estudiar el efecto que tiene la concentración de un reactivo y la presencia de un catalizador sobre el tiempo de reacción de un proceso químico. Sea la concentración del reactivo el factor A con dos niveles de interés, 15% y 20%. El catalizador constituye el factor B; el nivel alto o superior denota el uso de dos sacos de catalizador y el nivel bajo o inferior denota el uso de un solo saco [2].

E. Diseños Anidados

En algunos experimentos con factores múltiples, los niveles de uno de los factores (por ejemplo el factor *B*) son similares pero no idénticos a los diferentes niveles de otro factor (por ejemplo *A*) [2]. En algunos casos el experimentador no puede combinar todos los niveles de un factor con todos los niveles de otro, es decir, no se pueden realizar todos los posibles tratamientos que aparecen al cruzar los factores.

Ejemplo. Supongamos que en una licenciatura de una universidad se estudia el porcentaje de aprobados en una materia, en los grupos de mañana y de tarde. Por la mañana imparten la asignatura dos personas y por la tarde tres. Cada persona da clase a tres grupos y se supone que estos son réplicas (no son fuente de variación).

Se dice que un factor B está anidado en otro factor A (o que sus niveles están anidados en los de A) cuando cada nivel del factor B aparece asociado a un único nivel del factor A. Se denota como $B \subset A$. Un diseño anidado es un diseño que posee dos o más factores tal que:

- Hay un sólo factor, el cual no se encuentra anidado con ningún otro factor, sea este *F*1; que representa la primera jerarquía entre todos los factores que existen.
- Existe un segundo factor *F*2; el cual se encuentra dentro de *F*1: Diremos *F*2 es el factor que representa la segunda jerarquía entre todos los factores que existen.
- El próximo factor en caso que exista (*F*3) debe encontrarse anidado dentro del factor *F*2: Diremos *F*3 es el factor que

representa la tercera jerarquía entre todos los factores que existan [6].

F. Superficies de Respuesta

El Método de superficies de respuesta es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelo y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables, donde el objetivo es optimizar esta respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

En la mayoría de los problemas del método de superficie de respuesta, la forma de relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso es encontrar una proximidad adecuada de la verdadera relación funcional entre *y* y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las variables independientes. Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es un modelo de primer orden. Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior, un modelo de segundo orden.

En casi todos los problemas de superficie de respuestas se usa uno de los modelos ya sea de primer orden o segundo orden. Desde luego es probable que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes.

El método de mínimos cuadrados se usa para estimar los parámetros de los polinomios de aproximación. Después se realiza el análisis de la superficie de respuesta utilizando la superficie ajustada. Si la superficie ajustada es una aproximación adecuada de la verdadera función de la respuesta, entonces el análisis de la superficie ajustada será un equivalente aproximado del análisis del sistema real.

Referencias

[1]Pablo, T. R. Metodología para el Diseño de Experimentos(Doe) en la Industria. Tesis Doctoral. Universidad deNavarra. España. 2008.

[2]Montgomery, D. C. Diseño y Análisis de Experimentos. 2nd ed. México, Limusa. 2008.

[3]Robert, O. K. *Diseño de Experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones.* 2nd. ed. México, Thomson. 2001.

[4]Isidro, G. H. *Diseño de experimentos de bloques incompletos y aplicaciones en la industria*. Monografía. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. 2006

[5]http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r77661.PDF

[6]http://es.scribd.com/doc/12276230/DiseNo-de-Experimentosnotas-de-Clases

[a]Maestro en Ciencias, Escuela Superior de Ciudad Sahagún de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. ing_indij@yahoo.com.mx

MENÚ

- Inicio (/)
- Bachillerato (/division_academica/educacion-media/)
- Licenciatura (/discover/)
- Posgrado (/colpos/)
- Investigación (/investigacion_uaeh/)

LIGAS DE INTERÉS

- Legal (/legal.html)
- Aviso de Privacidad (/privacidad.html)
- Contraloría Social (http://sgc.uaeh.edu.mx/planeacion/index.php/inicio-contraloria)
- Transparencia (/transparencia/)
- Garceta (/legislacion-universitaria/#garceta)
- Calendario Académico (https://www.uaeh.edu.mx/calendario/)
- Mapas y Accesibilidad (/accesibilidad/)
- Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (http://www.anuies.mx/)
- Consorcio de Universidades Mexicanas (http://www.cumex.org.mx/)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Torres de Rectoría Pachuca-Actopan Km. 4.5, Colonia Campo de Tiro, Pachuca de Soto, Hidalgo, C.P. 42039

Teléfono: +52 (771)7172000 (tel:+527717172000)

(https://www.facebook.com/ C…alUAEH) (https://twitter.com/UAEH_OFICIAL) (https://www.instagram.com/uaeh_oficial/) (https://www.threads.net/@uaeh_oficial) (https://www.youtube.com/channel/UCCFewkZaOp1p4ve1sIdQdpKCw) (/itunesu/) (https://es.linkedin.com/edu/universidad-aut%C3%B3noma-del-estado-de-) (https://www.tiktok.com/@uaeh_oficial) (/radio/) (https://mail.google.com/a/uaeh.edu.mx/)

…ada con el Premio Internacional… (https://www.editorialox.com/)

hidalgo-
15080)

© UAEH 2025. Derechos Reservados