

TEMA 1

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Introducción

El objetivo de un experimento es estudiar el efecto que sobre una variable de interés, que llamaremos *variable respuesta*, tienen un conjunto de otras variables que llamaremos *variables experimentales* o *factores*.

Supondremos que la variable respuesta es continua y que los factores se fijan durante el experimento a ciertos niveles determinados. El experimento consiste en seleccionar ciertas *unidades experimentales*, fijar valores de los factores a distintos niveles y observar el valor de la variable respuesta en cada unidad experimental. El número total de datos es el tamaño del experimento.

En cualquier experimento en que se investiga el efecto de un factor existen a priori un gran número de variables que pueden influir sobre los resultados. Conceptualmente existen tres caminos para eliminar el efecto de una variable:

- mantenerla fija durante la realización del experimento
- reorganizar la estructura del experimento de manera que las comparaciones de interés se efectúen para valores fijos de esta variable, lo que supone eliminar estadísticamente su efecto
- evitar su influencia aleatorizando su aparición en los tratamientos

Definiciones

Un *experimento* es un ensayo o prueba.

Un *experimento diseñado* es una prueba o serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible identificar y observar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Algunas de las variables del proceso son controlables (x , factores) y otras no (z).

Los objetivos del experimento son:

1. determinar qué variables tienen mayor influencia en la variable respuesta (y)
2. determinar el mejor valor de las variables controladas (x) que influyen en y , de modo que y tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado
3. determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que la variabilidad de y sea pequeña
4. determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables

Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el *desarrollo de procesos* y en la *depuración de procesos* para mejorar el rendimiento. El objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto, es decir, afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas (z).

El diseño experimental es un medio de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se plantea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar por resultado:

1. mejora del rendimiento del proceso
2. menor variabilidad y mayor proximidad a los objetivos
3. menor tiempo de desarrollo
4. menores costes globales

Los métodos de diseño experimental también tienen un cometido importante en las actividades de *diseño técnico* (o de ingeniería) en las que se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones son:

1. evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas
2. evaluación de materiales alternativos

3. selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo

El uso del diseño experimental en estas áreas puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costes, y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto.

Los principios del diseño de experimentos

El *diseño estadístico de experimentos* es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Se requiere de un enfoque estadístico del diseño de experimentos para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos temas están estrechamente relacionados, ya que el método de análisis depende directamente del diseño empleado.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son *obtención de réplicas*, *aleatorización* y *análisis por bloques*.

La *réplica* se refiere a una repetición del experimento básico. Este concepto tiene dos propiedades importantes. En primer lugar, permite al experimentador obtener una estimación del error experimental. Tal estimación se convierte en la unidad básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas. En segundo lugar, el uso de réplicas permite al experimentador calcular una estimación más precisa del efecto de un factor en el experimento si se usa la media de la muestra como estimación de dicho efectos: esto es así porque si σ^2 es la varianza de los datos y hay n réplicas, la varianza de la media muestral es σ^2/n .

La *aleatorización* es la base del uso de los métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Se entiende por aleatorización el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determinan aleatoriamente. Los métodos estadísticos requieren que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias independientes. La aleatorización habitualmente confirma esta suposición. Además, al aleatorizar adecuadamente el experimento se ayuda a neutralizar los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

El *análisis por bloques* es un técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que es más homogénea que el total del material. Al realizar un análisis por bloques se hacen comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque.

Directrices para el diseño de experimentos

Para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento, se requiere que todos los participantes en él tengan de antemano una idea clara de qué es realmente lo que se va a estudiar, cómo se van a recopilar los datos y, al menos, una idea cualitativa de cómo se van a analizar. El procedimiento recomendado sería:

1. *Comprensión y planteamiento del problema*. En la práctica no siempre es sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, ni diseñar un planteamiento claro y aceptable del mismo. Es necesario desarrollar todas las ideas sobre los objetivos del experimento. Suele ser importante solicitar la opinión de todas las partes implicadas. Un planteamiento claro del problema contribuye a menudo en forma sustancial a un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.
2. *Elección de factores y niveles*. El experimentador debe elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los que se hará el experimento. También debe considerarse la forma en que se controlarán estos factores para mantenerlos en los niveles deseados, y cómo se les medirá. Para ello es necesario conocer el proceso. Tal conocimiento suele ser una combinación de experiencia práctica y comprensión teórica. Es importante investigar todos los factores que pueden ser de interés, y no depender

demasiado de la experiencia pasada, en particular durante las primeras etapas de la experimentación o cuando el proceso no está muy avanzado. Cuando el objetivo es el escrutinio de factores o la caracterización del proceso, suele ser mejor mantener bajo el número de niveles de los factores.

3. **Selección de la variable respuesta.** Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir verdaderamente provea información útil acerca del proceso de estudio. Con frecuencia, la variable respuesta será el promedio o la desviación estándar (o ambas) de la característica medida. No son raras las respuestas múltiples. La capacidad de medición (o el error de medición) también es un factor importante. Si la capacidad de medición es deficiente, sólo puede esperarse que el experimentador detecte efectos relativamente grandes de los factores; en caso contrario, deben hacerse repeticiones.
4. **Elección del diseño experimental.** Es necesario considerar el tamaño muestral, seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales y determinar si hay implicado bloqueo u otras restricciones de aleatorización. Es importante tener presente los objetivos experimentales al elegir el diseño. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos factores producen respuestas diferentes. En consecuencia, hay interés en determinar qué factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta. En otras situaciones habrá más interés en verificar la uniformidad.
5. **Realización del experimento.** Es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado. En esta fase, los errores en el procedimiento suelen anular la validez experimental.
6. **Análisis de datos.** Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que operativos. Si el experimento se diseñó correctamente y si se ha realizado conforme al diseño, los métodos estadísticos que se requieren no son muy complicados. Existen excelentes paquetes de software para el análisis de datos y métodos gráficos sencillos que son importantes en la interpretación de dichos datos. El análisis de residuos y la verificación de la idoneidad del modelo son también técnicas de gran utilidad. Los métodos estadísticos, no obstante, no pueden probar que un factor (o varios factores) tiene un efecto particular. Sólo proporcionan directrices para la veracidad y validez de los resultados. Aplicados adecuadamente, no permiten probar algo experimentalmente sino sólo hacen posible obtener el probable error de una conclusión o asignar un nivel de confiabilidad a los resultados. La principal ventaja es que agregan objetividad al proceso de toma de decisiones.
7. **Conclusiones y recomendaciones.** Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción. En esta fase a menudo son útiles los métodos gráficos. También deben realizarse réplicas de seguimiento y pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

Durante todo este proceso es necesario tener presente que la experimentación es parte importante del proceso de aprendizaje, en el cual formulamos hipótesis acerca de un sistema, realizamos experimentos para investigar dichas hipótesis, y con base en los resultados formulamos hipótesis nuevas. Esto sugiere que la experimentación es iterativa. Suele ser un grave error diseñar un único experimento grande y amplio al principio del estudio. Para que un experimento tenga éxito es necesario conocer los factores importantes, los intervalos en los que deben hacerse variar esos factores, la cantidad adecuada de niveles por usar, y las unidades de medida apropiadas para estas variables. Por lo general no se conocen a la perfección las respuestas a estas preguntas, sino que se aprende acerca de ellas a medida que se avanza. Conforme progresa un programa experimental, con frecuencia se eliminan algunas variables de entrada, se agregan otras, se modifica la región de exploración de algunos factores, o se añaden nuevas variables de respuesta. En consecuencia, se suele experimentar secuencialmente (como regla general, en el primer experimento no debe invertirse más del 25% de los recursos disponibles; esto asegurará que se disponga de recursos suficientes para realizar réplicas de confirmación y en última instancia alcanzar el objetivo final del experimento).

Uso de los métodos estadísticos

Gran parte de la investigación en ingeniería, ciencia e industria es empírica y emplea en forma extensiva la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar grandemente la eficiencia de esos experimentos y, a menudo, reforzar las conclusiones obtenidas. El uso de técnicas estadísticas requiere que el experimentador tenga en mente los siguientes puntos:

1. *Uso del conocimiento no estadístico del problema.* Generalmente los investigadores conocen a fondo su campo de especialidad. En algunos de ellos puede utilizarse una gran cantidad de teoría para explicar las relaciones que hay entre los factores y las respuestas. Este tipo de conocimiento no estadístico es invaluable al elegir los factores y sus niveles, al decidir el número de réplicas que se quieren realizar, al analizar los resultados, etc. La estadística no puede sustituir el hecho de reflexionar sobre el problema.
2. *Mantener el diseño y el análisis tan simples como sea posible.* No se debe exagerar el uso de técnicas estadísticas complejas y muy refinadas. Por lo general, lo más adecuado son los métodos de diseño y análisis relativamente simples. Si se realiza el diseño cuidadosa y correctamente, el análisis será con frecuencia relativamente directo. Sin embargo, es poco probable que incluso la estadística más compleja y elegante salve la situación si se actúa indebidamente en el diseño.
3. *Reconocer la diferencia entre la significación práctica y la estadística.* No hay seguridad de que una diferencia sea suficientemente grande, desde el punto de vista práctico, por el solo hecho de que dos condiciones experimentales producen respuestas medias estadísticamente diferentes.
4. *Usualmente los experimentos son iterativos.* Hay que recordar que en la mayoría de los casos no es conveniente diseñar experimentos demasiado extensos en las primeras etapas de un estudio, ya que al inicio del experimento generalmente no se está en condiciones de conocer las características del mismo, sino que se determinan a medida que avanza la experimentación. Esto favorece el enfoque iterativo o secuencial ya considerado.

Mejora del diseño

Dada una situación real, caracterizada por los valores de unos parámetros (proporción de individuos que piensan votar *sí* en un referendun; altura y peso medios de la población de una nación), el Diseño de Experimentos pretende contrastar la idoneidad de determinadas relaciones, adelantadas por el experimentador, entre los parámetros que caracterizan la situación (y que constituyen el fin último del estudio) y determinadas variables, denominadas factores, cuya observación es fácil por parte del experimentador. El contraste de bondad de dichas relaciones se hace a base de que un estadístico tome observaciones de las reacciones de los parámetros a diferentes niveles de los factores. Luego, por medio del Análisis de la Varianza, se decide si las discrepancias entre el comportamiento observado y el predicho de acuerdo con el modelo adelantado, son considerables o no.

Si el experimentador dispone de un estimador a priori de la varianza, σ^2 , estará en condiciones de hacer algunos cálculos aproximados sobre la fiabilidad de sus conclusiones.

En cualquier caso, siempre conviene diseñar el experimento (ejecutándolo en un orden distinto al habitual, combinando distintas condiciones de experimentación de manera que reduzcamos el número de repeticiones, ...) para optimizar el resultado (menor coste, menor tiempo de ejecución, ...).

Ejercicio: piensa en cómo estimar el peso de dos objetos, con una balanza que no sea de precisión, realizando sólo dos pesadas en total, de manera que las estimaciones finales sean lo más precisas posibles.