

Capítulo 1

Introducción al diseño de experimentos

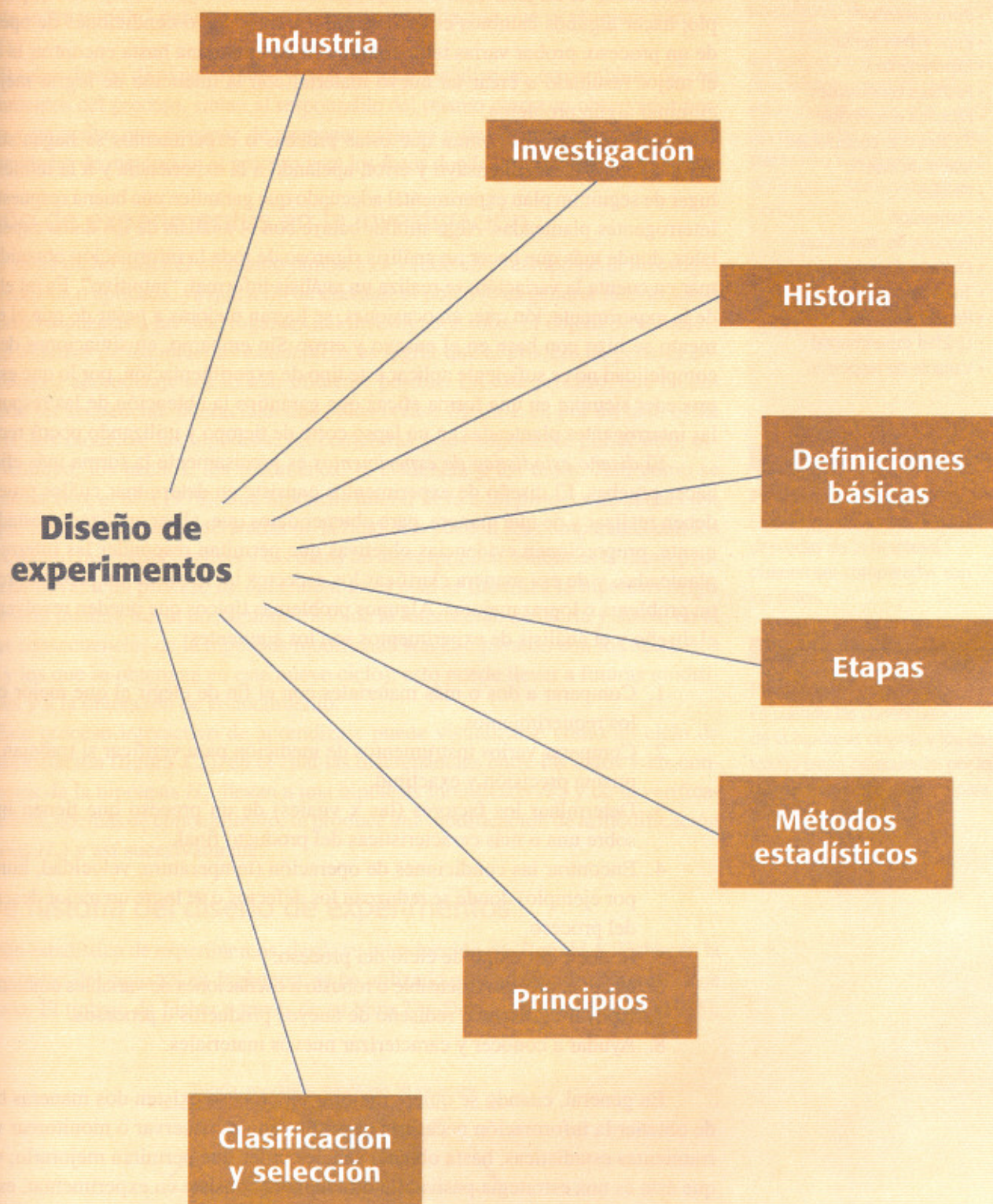
Sumario

- El diseño de experimentos hoy
- Definiciones básicas en el diseño de experimentos
- Etapas en el diseño de experimentos
- Consideraciones prácticas sobre el uso de métodos estadísticos
- Principios básicos
- Clasificación y selección de los diseños experimentales

Objetivos de aprendizaje

- Conocer el papel fundamental que juega el diseño de experimentos en el mejoramiento de procesos y en la investigación.
- Identificar los principios básicos y la terminología adecuada en el diseño de experimentos.
- Describir las etapas más importantes en la investigación experimental.

Mapa conceptual



Conceptos clave

- Aleatorización
- Bloqueo
- Diseño de experimentos
- Error aleatorio
- Error experimental
- Experimento
- Factores controlables
- Factores estudiados
- Factores no controlables
- Matriz de diseño
- Niveles
- Planeación
- Proceso de deducción
- Proceso de inducción
- Tratamiento
- Repetición
- Unidad experimental
- Variable de respuesta

El diseño de experimentos hoy

En el campo de la industria es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea (conjetura, hipótesis); por ejemplo, hacer algunos cambios en los materiales, métodos o condiciones de operación de un proceso, probar varias temperaturas en una máquina hasta encontrar la que da el mejor resultado o crear un nuevo material con la intención de lograr mejoras o eliminar algún problema.

Sin embargo, es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición, en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas. Algo similar ocurre con el análisis de los datos experimentales, donde más que hacer un análisis riguroso de toda la información obtenida y tomar en cuenta la variación, se realiza un análisis informal, “intuitivo”. Es tal el poder de la experimentación que, en ocasiones, se logran mejoras a pesar de que el experimento se hizo con base en el ensayo y error. Sin embargo, en situaciones de cierta complejidad no es suficiente aplicar este tipo de experimentación, por lo que es mejor proceder siempre en una forma eficaz que garantice la obtención de las respuestas a las interrogantes planteadas en un lapso corto de tiempo y utilizando pocos recursos.

El *diseño estadístico de experimentos* es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. Algunos problemas típicos que pueden resolverse con el diseño y el análisis de experimentos son los siguientes:

1. Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
2. Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
3. Determinar los factores (las x vitales) de un proceso que tienen impacto sobre una o más características del producto final.
4. Encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
5. Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
6. Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales.
7. Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
8. Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales.

En general, cuando se quiere mejorar un proceso existen dos maneras básicas de obtener la información necesaria para ello: una es observar o monitorear vía herramientas estadísticas, hasta obtener señales útiles que permitan mejorarlo; se dice que ésta es una estrategia pasiva. La otra manera consiste en experimentar, es decir, hacer cambios estratégicos y deliberados al proceso para provocar dichas señales útiles. Al analizar los resultados del experimento se obtienen las pautas a seguir, que

muchas veces se concretan en mejoras sustanciales del proceso. En este sentido, experimentar es mejor que sentarse a esperar a que el proceso nos indique por sí solo cómo mejorarlo. El *diseño de experimentos* (DDE) es un conjunto de técnicas activas, en el sentido de que no esperan que el proceso mande las señales útiles, sino que éste se “manipula” para que proporcione la información que se requiere para su mejoría.

El saber diseño de experimentos y otras técnicas estadísticas, en combinación con conocimientos del proceso, sitúan al responsable del mismo como un observador perceptivo y proactivo que es capaz de proponer mejoras y de observar algo interesante (oportunidades de mejora) en el proceso y en los datos donde otra persona no ve nada.

Diseño de experimentos en la investigación

Lo que se ha dicho hasta el momento también es válido en el campo de la investigación científica o aplicada, ya que a fin de cuentas, el objetivo es generar nuevas ideas y mejores respuestas a las interrogantes del investigador sobre el objeto de estudio.

El *objetivo de los métodos estadísticos* es lograr que el proceso de generar conocimiento y aprendizaje sea lo más eficiente posible. En este proceso, que ha demostrado ser secuencial, interactúan dos polos (véase figura 1.1), por un lado están la teoría, los modelos, las hipótesis, las conjeturas y los supuestos; por el otro, están la realidad, los hechos, los fenómenos, la evidencia y los datos. Así, como se comenta en Box *et al.* (1978), una hipótesis inicial lleva a un *proceso de deducción* en el que las consecuencias derivadas de la hipótesis pueden ser comparadas con los datos. Cuando las consecuencias y los datos no corresponden, entonces la discrepancia puede llevar a un *proceso de inducción*, en el cual se modifica la hipótesis original. De esta manera inicia un segundo ciclo de la interacción de teoría y datos, en el cual las consecuencias de la hipótesis modificada son comparadas con los datos (los viejos y los que se obtengan en este nuevo ciclo); esto puede llevar a futuras modificaciones y a la obtención de conocimiento.

Este proceso interactivo de aprendizaje puede visualizarse como un ciclo de retroalimentación (figura 1.2), en el cual las discrepancias entre los datos y las consecuencias de la hipótesis H_1 , llevan a una hipótesis modificada H_2 , y de la verificación de ésta, además de conocimiento, se produce una modificación de la modificación (hipótesis H_3) y así sucesivamente.

Breve historia del diseño de experimentos

El diseño estadístico de experimentos, desde su introducción por Ronald A. Fisher en la primera mitad del siglo XX en Inglaterra, se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. El trabajo de Fisher a través de su libro *The Design of Experiments* (1935),

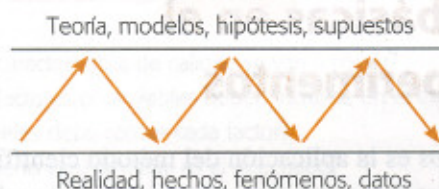


Figura 1.1 Proceso interactivo de la experimentación.

Diseño de experimentos

Consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación.

Proceso de deducción

Es cuando las consecuencias derivadas de la hipótesis pueden ser comparadas con los datos.

Proceso de inducción

Es cuando las consecuencias de la hipótesis original y los datos no están de acuerdo, por lo que se inicia este proceso para cambiar tal hipótesis.

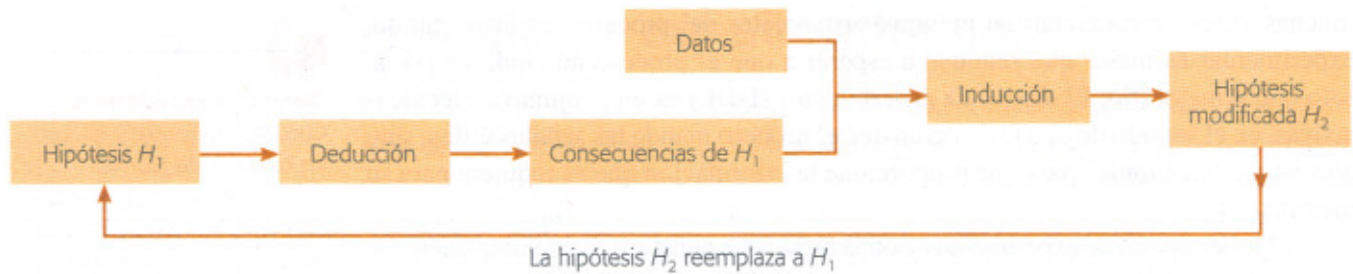


Figura 1.2 El proceso de generación de aprendizaje y conocimiento como un ciclo de retroalimentación.

influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, ya que aportó métodos (ahora usados en todo el mundo) para evaluar los resultados de experimentos con muestras pequeñas. La clave de las aportaciones de Fisher radica en que este investigador se dio cuenta de que las fallas en la forma de realizar experimentos obstaculizaba el análisis de los resultados experimentales. Fisher también proporcionó métodos para diseñar experimentos destinados a investigar la influencia simultánea de varios factores.

Los desarrollos posteriores en diseños de experimentos fueron encabezados por George E. P. Box, quien trabajó como estadístico durante ocho años en la industria química en Inglaterra y desarrolló la metodología de superficie de respuestas (véase Box y Wilson, 1951), la cual incluye nuevas familias de diseños y una estrategia para la experimentación secuencial. Es posible afirmar que entre 1950 y 1980, el diseño de experimentos se convirtió en una herramienta de aplicación frecuente, pero sólo en las áreas de investigación y desarrollo. Hasta la década de 1970, la aplicación a nivel planta o procesos de manufactura no estaba generalizada, debido a la falta de recursos computacionales y a que los ingenieros y especialistas en manufactura carecían de formación en el área de estadística.

En la década de 1980 se dio un gran impulso al conocimiento y la aplicación del diseño de experimentos debido al éxito en calidad de la industria japonesa. El movimiento por la calidad, encabezado por los gurús Deming e Ishikawa, promovió el uso de la estadística en calidad, donde el diseño de experimentos demostró su utilidad tanto para resolver problemas de fondo como para diseñar mejor los productos y los procesos. En Japón destaca el trabajo de Genichi Taguchi, cuyos conceptos sobre diseño robusto también tuvieron un impacto significativo en la academia en el mundo occidental. Como respuesta al movimiento por la calidad y la mejora de procesos, las industrias empezaron a entrenar a sus ingenieros en la aplicación del diseño de experimentos. Esto continúa en la actualidad; incluso, en los últimos veinte años, las universidades han incorporado el diseño de experimentos como materia obligatoria u operativa en la mayoría de las ingenierías.

Definiciones básicas en el diseño de experimentos

El *diseño de experimentos* es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas

estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor situaciones complejas de relación causa-efecto.

Experimento

Un *experimento* es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema. Por ejemplo, en un proceso químico se pueden probar diferentes temperaturas y presiones, y medir el cambio observado en el rendimiento (yield, ppm, defectivo) del proceso. Al analizar los efectos (datos) se obtiene conocimiento acerca del proceso químico, lo cual permite mejorar su desempeño.

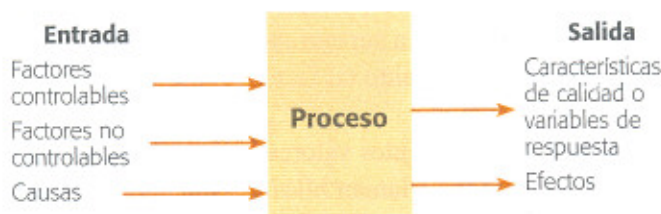
Unidad experimental

La *unidad experimental* es la pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado del experimento o prueba. En cada diseño de experimentos es importante definir de manera cuidadosa la unidad experimental, ya que ésta puede ser una pieza o muestra de una sustancia o un conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso que se estudia. Por ejemplo, si se quiere investigar alternativas para reducir el porcentaje de piezas defectuosas, en un proceso que produce muchas piezas en un lapso corto de tiempo, es claro que no sería muy confiable que la unidad experimental fuera una sola pieza, en la cual se vea si en una condición experimental estaba defectuosa o no. Aquí, la unidad experimental será cierta cantidad de piezas que se producen en las mismas condiciones experimentales, y al final se analizará cuántas de ellas están defectuosas y cuántas no.

Variables, factores y niveles

En todo proceso intervienen distintos tipos de variables o factores como los que se muestran en la figura 1.3, donde también se aprecian algunas interrogantes al planear un experimento.

Variable(s) de respuesta. A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental (véase figura 1.3), por lo que pueden ser características de la calidad de un producto y/o variables que miden el desempeño de



- ¿Cuáles características de calidad se van a medir?
- ¿Cuáles factores controlables deben incluirse en el experimento?
- ¿Qué niveles debe utilizar cada factor?
- ¿Cuál diseño experimental es el adecuado?

Figura 1.3 Variables de un proceso y preguntas a responder al diseñar un experimento.

Experimento

Es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio en una o varias propiedades del producto o resultado.

Unidad experimental

Pieza(s) o muestra(s) que se utiliza para generar un valor que sea representativo del resultado de la prueba.

Variable de respuesta

A través de esta(s) variable(s) se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental.

Factores controlables

Son variables de proceso y/o características de los materiales y los métodos experimentales que se pueden fijar en un nivel dado.

Factores no controlables

Son variables que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso.

Factores estudiados

Son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta.

un proceso. El objetivo de muchos estudios experimentales es encontrar la forma de mejorar la(s) variable(s) de respuesta. Por lo general, estas variables se denotan con la letra y .

Factores controlables. Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado. Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso (véase figura 1.3), y se distinguen porque, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación. Esto último es lo que hace posible que se pueda experimentar con ellos. Por ejemplo, si en el proceso se usa agua a 60°C entonces debe existir un mecanismo que permita fijar la temperatura del agua dentro de un rango de operación. Algunos factores o características que generalmente se controlan son: temperatura, tiempo de residencia, cantidad de cierto reactivo, tipo de reactivo, método de operación, velocidad, presión, etc. A los factores controlables también se les llama *variables de entrada*, *condiciones de proceso*, *variables de diseño*, *parámetros del proceso*, las *x de un proceso* o simplemente *factores*.

Factores no controlables o de ruido. Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso. Por ejemplo, algunos factores que suelen ser no controlables son las variables ambientales (luz, humedad, temperatura, partículas, ruido, etc.), el ánimo de los operadores, la calidad del material que se recibe del proveedor (interno o externo). Un factor que ahora es *no controlable* puede convertirse en *controlable* cuando se cuenta con el mecanismo o la tecnología para ello.

Factores estudiados. Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a la(s) variable(s) de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables, a estos últimos quizá fue posible y de interés controlarlos durante el experimento. Para que un factor pueda ser estudiado es necesario que durante el experimento se haya probado en, al menos, dos niveles o condiciones.

En principio, cualquier factor, sea controlable o no, puede tener alguna influencia en la variable de respuesta que se refleja en su media o en su variabilidad. Para fines de un diseño de experimentos deben seleccionarse los factores que se considera, por conocimiento del objeto de estudio, que pueden tener efecto sobre la respuesta de interés. Obviamente, si se decide o interesa estudiar el efecto de un factor no controlable, parte de la problemática a superar durante el diseño es ver la manera en que se controlará durante el experimento tal factor.

Niveles y tratamientos. Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman *niveles*. Una combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama *tratamiento* o *punto de diseño*. Por ejemplo, si en un experimento se estudia la influencia de la velocidad y la temperatura, y se decide probar cada una en dos niveles, entonces cada combinación de niveles (velocidad, temperatura) es un tratamiento. En este caso habría cuatro tratamientos, como se muestra en la tabla 1.1. Es necesario probar cada tratamiento y obtener el correspondiente valor de y .

Tabla 1.1 Puntos de diseño o tratamientos.

Nivel de velocidad	Nivel de temperatura	Tratamiento	y
1	1	1	?
2	1	2	
1	2	3	
2	2	4	

De acuerdo con estas definiciones, en el caso de experimentar con un solo factor, cada nivel es un tratamiento.

Error aleatorio y error experimental. Siempre que se realiza un estudio experimental, parte de la variabilidad observada en la respuesta no se podrá explicar por los factores estudiados. Esto es, siempre habrá un remanente de variabilidad que se debe a causas comunes o aleatorias, que generan la variabilidad natural del proceso. Esta variabilidad constituye el llamado *error aleatorio*. Por ejemplo, será parte de este error aleatorio el pequeño efecto que tienen los factores que no se estudiaron, siempre y cuando se mantenga pequeño o despreciable, así como la variabilidad de las mediciones hechas bajo las mismas condiciones. Sin embargo, el error aleatorio también absorberá todos los errores que el experimentador comete durante los experimentos, y si éstos son graves, más que error aleatorio hablaremos de *error experimental*. De predominar éste, la detección de cuáles de los factores estudiados tienen un efecto real sobre la respuesta será difícil, si no es que imposible.

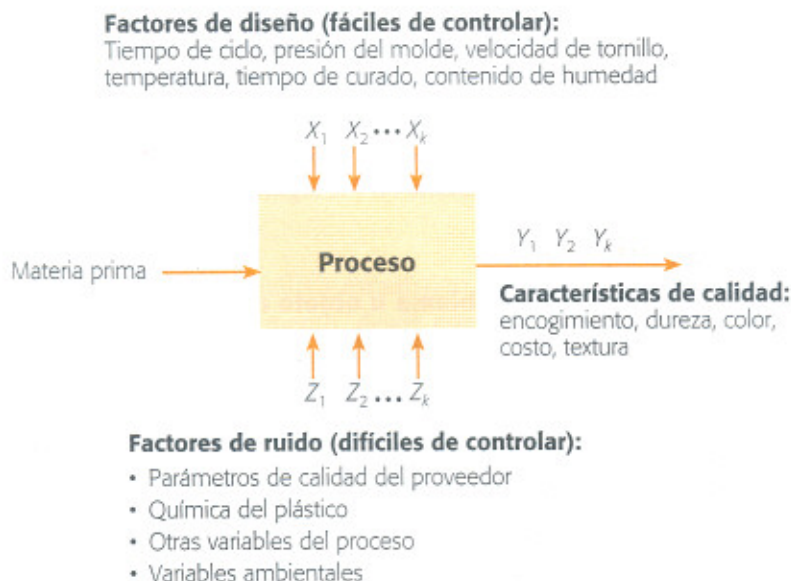
Cuando se corre un diseño experimental es importante que la variabilidad observada de la respuesta se deba principalmente a los factores estudiados y en menor medida al error aleatorio, y además que este error sea efectivamente aleatorio. Cuando la mayor parte de la variabilidad observada se debe a factores no estudiados o a un error no aleatorio, no se podrá distinguir cuál es el verdadero efecto que tienen los

Error aleatorio

Es la variabilidad observada que no se puede explicar por los factores estudiados; resulta del pequeño efecto de los factores no estudiados y del error experimental.

Error experimental

Componente del error aleatorio que refleja los errores del experimentador en la planeación y ejecución del experimento.

**Figura 1.4** Factores y variables en la fabricación de un envase de plástico.

factores estudiados, con lo que el experimento no alcanzaría su objetivo principal. De aquí la importancia de no dejar variar libremente a ningún factor que pueda influir de manera significativa sobre el comportamiento de la respuesta (principio de bloqueo).

Ejemplo 1.1

En la figura 1.4 se muestran algunas de las variables que intervienen en el proceso de fabricación de un envase de plástico. El problema general es encontrar las condiciones de operación de los factores controlables, que dan por resultado valores óptimos de las características de calidad ahí listadas. También podría ser de interés investigar el efecto de factores no controlables, buscando lograr un proceso insensible (robusto) a su posible efecto. Supongamos que sólo interesa la dureza de la pieza de plástico resultante. Algunas preguntas que se pueden responder con un diseño experimental son: ¿cuáles factores afectan la dureza del plástico?, ¿cómo es que la afectan?, o bien, ¿qué relación hay entre los factores controlables y la dureza?; ¿existen otras condiciones de operación, distintas a las actuales que mejoran la dureza? Estas preguntas se responden probando diferentes combinaciones en los niveles de los factores controlables, seleccionadas de manera adecuada. Esto último significa escoger el diseño experimental más adecuado al problema, que en este caso parece ser un diseño factorial completo o fraccionado (capítulos 5, 6 y 8).

Etapas en el diseño de experimentos

Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar y cuántas repeticiones de cada uno se requieren, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible. El arreglo formado por los diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones, recibe el nombre de *matriz de diseño* o sólo *diseño*.

Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades. En este sentido, la etapa más importante y a la que se le debe dedicar mayor tiempo es la *planeación* (véase capítulo 10). A continuación se describen de manera breve las etapas del diseño de experimentos con objeto de dar una visión global de lo que implica su correcta aplicación. Varios conceptos que se mencionan en estas etapas se definen con detalle en los siguientes capítulos.

Planeación y realización

1. **Entender y delimitar el problema u objeto de estudio.** En la etapa de planeación se deben hacer investigaciones preliminares que conduzcan a entender y delimitar el problema u objeto de estudio, de tal forma que quede claro qué se va a estudiar, por qué es importante y, si es un problema, cuál es la magnitud del mismo.
2. **Elegir la(s) variable(s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable.** La elección de esta(s) variable(es) es vital, ya que en ella se refleja el resultado de las pruebas. Por ello, se deben elegir aquellas que mejor reflejen el problema o que caractericen al objeto de estudio. Además, se debe tener confianza en

Matriz de diseño

Es el arreglo formado por los tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones.

Planeación

Son actividades encaminadas a entender, delimitar el problema u objeto de estudio y seleccionar variables de respuesta y factores. Concluye con la especificación de los tratamientos a realizar y con la organización del trabajo experimental.

que las mediciones que se obtengan sobre esas variables sean confiables. En otras palabras, se debe garantizar que los instrumentos y/o métodos de medición son capaces de repetir y reproducir una medición, que tienen la precisión (error) y exactitud (calibración) necesaria. Recordemos que los sistemas de medición son la forma en la que percibimos la realidad, por lo que si éstos son deficientes, las decisiones que se tomen con base en ellos pueden ser inadecuadas.

3. **Determinar cuáles factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta.** No se trata de que el experimentador tenga que saber *a priori* cuáles factores influyen, puesto que precisamente para eso es el experimento, pero sí de que utilice toda la información disponible para incluir aquellos que se considera que tienen un mayor efecto.
4. **Seleccionar los niveles de cada factor, así como el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento.** Este paso también implica determinar cuántas repeticiones se harán para cada tratamiento, tomando en cuenta el tiempo, el costo y la precisión deseada.
5. **Planear y organizar el trabajo experimental.** Con base en el diseño seleccionado, organizar y planear con detalle el trabajo experimental, por ejemplo, las personas que van a intervenir, la forma operativa en que se harán las cosas, etc. (véase capítulo 10).
6. **Realizar el experimento.** Seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior, y en caso de algún imprevisto, determinar a qué persona se le reportaría y lo que se haría.

Análisis

En esta etapa no se debe perder de vista que los resultados experimentales son *observaciones muestrales*, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel proceso). La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza ANOVA (acrónimo en inglés).

Interpretación

Aquí, con el respaldo del análisis estadístico formal, se debe analizar con detalle lo que ha pasado en el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar supuestos y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.

Control y conclusiones finales

Para concluir el estudio experimental se recomienda decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan. Además, es preciso organizar una presentación para difundir los logros.

Consideraciones prácticas sobre el uso de métodos estadísticos

En adición a lo dicho en la sección anterior, es importante tomar en cuenta que aunque el uso de metodologías estadísticas por lo general ayuda a hacer más eficiente el proceso de investigación y de solución de problemas, es necesario reconocer que las metodologías estadísticas por sí solas no garantizan investigaciones exitosas, por ello es importante considerar los siguientes puntos:

El conocimiento no estadístico es vital. Para utilizar los métodos estadísticos en general y los diseños de experimentos en particular, en primer lugar se requiere que el experimentador tenga un buen nivel de conocimiento técnico y práctico sobre el fenómeno o proceso que estudia, de tal forma que pueda vislumbrar con cierta facilidad cuáles son los aspectos clave del fenómeno y sea capaz de plantear conjeturas precisas, vislumbrar el tipo de relaciones entre las variables de respuesta y los posibles factores a estudiar. Todo esto ayudará a seleccionar mejor los factores y sus niveles, así como el diseño que es mejor aplicar. Además, ese conocimiento permitirá sacarle un provecho real al análisis estadístico de los resultados y obtener conclusiones que generen aprendizaje y soluciones.

Reconocer la diferencia entre significancia estadística e importancia práctica. En ocasiones, un experimentador puede concluir que dos tratamientos son diferentes estadísticamente, pero que tales diferencias, aunque sean significativas, no necesariamente representan una diferencia que en la práctica sea importante.

Apostarle más a la experimentación secuencial que a un experimento único y definitivo. En ocasiones, los experimentadores novatos pretenden en una sola fase de experimentación contestar todas sus interrogantes sobre un proceso o fenómeno en particular. Sin embargo, esto puede llevar a experimentos muy extensos que consuman demasiados recursos y que retarden la generación de resultados. Por ello es importante considerar como alternativas a diferentes fases de experimentación en forma secuencial, en las cuales se alcance paulatinamente una mayor precisión en los conocimientos y soluciones.

Es importante no confundir la experimentación secuencial con la experimentación a prueba y error (véase sección “Experimentación factorial frente a mover un factor a la vez” del capítulo 5). La *experimentación secuencial* en cada fase sigue una estrategia bien definida y pensada; por lo tanto, en cada fase se obtienen resultados y conclusiones importantes que permiten generar soluciones y conocimiento más refinado para plantear de mejor manera la siguiente fase de experimentación.

Principios básicos

El diseño de experimentos trata de fenómenos que son observables y repetibles. Por lo tanto, sin el pensamiento estadístico, los conceptos de observabilidad y repetibilidad son inherentemente contradictorios. Cualquier cosa observada se aprecia con variabilidad; nada ocurre exactamente de la misma forma dos veces, incluso las me-

diciones del mismo evento varían. Entonces, ¿qué se quiere decir cuando la ciencia demanda que una observación sea repetible?, ¿qué repetición es realmente una repetición?, cuando un resultado es el mismo o difiere, ¿es confirmación o contradicción? Estas preguntas no pueden ser contestadas de manera coherente sin el pensamiento estadístico; por ejemplo, alguien da una nueva receta de chocolate, dice que no falla, pero se prueba y no sale, mientras que el segundo y tercer intento sí funcionan. ¿La receta está comprobada completamente? (Los chocolates tienen más de 800 ingredientes individuales que pueden ser separados.)

De acuerdo con lo anterior, se debe ser muy cuidadoso en la planeación y el análisis de un experimento. El punto de partida para una correcta planeación es aplicar los principios básicos del diseño de experimentos: aleatorización, repetición y bloqueo, los cuales tienen que ver directamente con que los datos obtenidos sean útiles para responder a las preguntas planteadas, es decir, la validez del análisis de los datos se apoya en estos principios.

Aleatorización. Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio (al azar) y con material también seleccionado aleatoriamente. Este principio aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, lo cual es un requisito para la validez de las pruebas de estadísticas que se realizan. También es una manera de asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipo y todos los factores no controlados, se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos. Por ejemplo, una evidencia de incumplimiento o violación de este principio se manifiesta cuando el resultado obtenido en una prueba está muy influenciado por la prueba inmediata anterior.

Repetición. Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Es preciso no confundir este principio con medir varias veces el mismo resultado experimental. Repetir es volver a realizar un tratamiento, pero no inmediatamente después de haber corrido el mismo tratamiento, sino cuando corresponda de acuerdo con la aleatorización. Las repeticiones permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores. Cuando no se hacen repeticiones no hay manera de estimar la variabilidad natural o el error aleatorio, y esto dificulta la construcción de estadísticas realistas en el análisis de los datos.

Bloqueo. Consiste en nulificar o tomar en cuenta, en forma adecuada, todos los factores que puedan afectar la respuesta observada. Al bloquear, se supone que el subconjunto de datos que se obtengan dentro de cada bloque (nivel particular del factor bloqueado), debe resultar más homogéneo que el conjunto total de datos. Por ejemplo, si se quieren comparar cuatro máquinas, es importante tomar en cuenta al operador de las máquinas, en especial si se cree que la habilidad y los conocimientos del operador pueden influir en el resultado. Una posible estrategia de bloqueo del factor operador, sería que un mismo operador realizara todas las pruebas del experimento. Otra posible estrategia de bloqueo sería experimentar con cuatro operadores (cuatro bloques), donde cada uno de ellos prueba en orden aleatorio las cuatro máquinas; en este segundo caso, la comparación de las máquinas quizás es más real. Cada operador es un bloque porque se espera que las mediciones del mismo operador sean más parecidas entre sí que las mediciones de varios operadores.



Aleatorización

Consiste en hacer corridas experimentales en orden aleatorio (al azar); este principio aumenta la posibilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla.



Repetición

Es correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores.



Bloqueo

Es nulificar o tomar en cuenta en forma adecuada todos los factores que pueden afectar la respuesta observada.

Los principios básicos se entenderán mejor en la medida en que se estudien los ejemplos de los capítulos siguientes. En particular, en la sección “Poblaciones pareadas” del capítulo 2, se presentan los experimentos más simples donde la aplicación de estos principios es evidente.

Clasificación y selección de los diseños experimentales

Existen muchos diseños experimentales para estudiar la gran diversidad de problemas o situaciones que ocurren en la práctica. Esta cantidad de diseños hace necesario saber cómo elegir el más adecuado para una situación dada y, por ende, es preciso conocer cómo es que se clasifican los diseños de acuerdo con su objetivo y su alcance.

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental, en el sentido de que cuando cambian por lo general nos llevan a cambiar de diseño, son:

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Estos cinco puntos no son independientes entre sí, pero es importante señalarlos de manera separada, ya que al cambiar cualquiera de ellos generalmente cambia el diseño experimental a utilizar (véase capítulo 10). Con base en algunos de estos cinco puntos es posible clasificar los diseños como lo hacemos a continuación.

El *objetivo del experimento* se utiliza como un criterio general de clasificación de los diseños experimentales, mientras que los otros cuatro puntos son útiles para subclasificarlos. En este sentido, de acuerdo con su objetivo y sin pretender ser exhaustivos, los diseños se pueden clasificar como:

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos.
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s).
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
4. Diseños para la optimización de una mezcla.
5. Diseños para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables.

En la figura 1.5 se muestra la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo. Dentro de cada rama se pueden clasificar de acuerdo al número de factores, al tipo de efectos que se pretende estudiar y según las restricciones existentes. En la misma figura se listan los diseños particulares más representativos de cada rama.

Nótese que los diseños factoriales completos y fraccionados ocupan más de un lugar en la figura 1.5; la razón es que estos diseños son eficaces en diversas situacio-

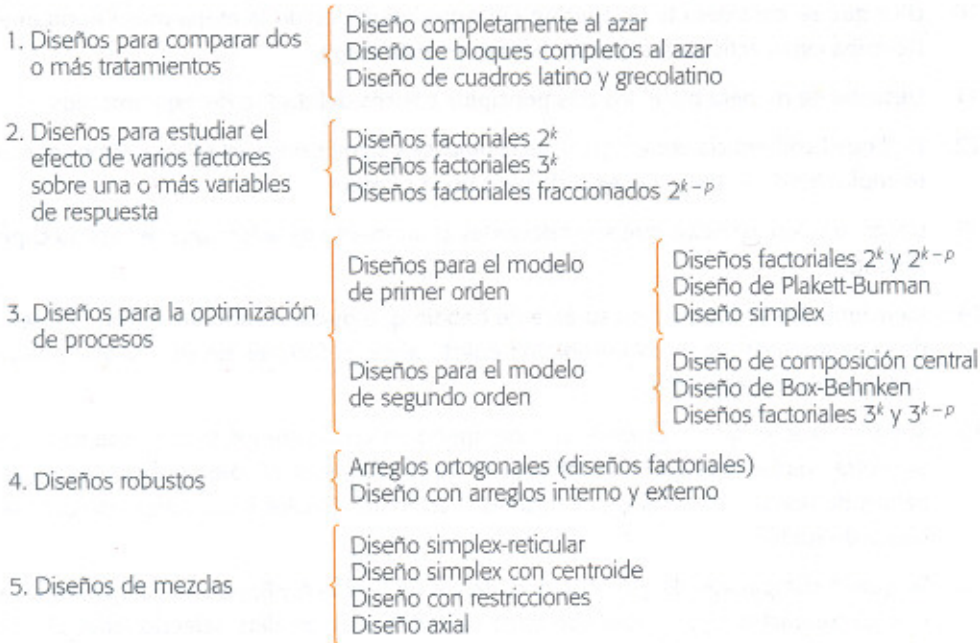


Figura 1.5 Clasificación de los diseños experimentales.

nes prácticas. De hecho, varios de los otros diseños que se mencionan en esta figura son casos particulares o generalizaciones de los diseños factoriales. En los siguientes capítulos se verán con detalle prácticamente todos estos diseños.

Preguntas y ejercicios

1. Explique las ventajas que tiene el diseño de experimentos sobre una estrategia de prueba y error.
2. ¿Qué es un experimento y qué es diseñar un experimento?
3. En el contexto de un diseño de experimentos, ¿qué es una variable de respuesta?, ¿qué es un factor estudiado? y ¿qué relación se esperaría que haya entre la variable y los factores?
4. ¿En un experimento sólo es posible estudiar los factores que actualmente se controlan en la operación normal del proceso?
5. ¿Es posible estudiar cómo influye un factor sobre la variable de respuesta, si el factor se mantiene fijo en todas las corridas o pruebas experimentales? Explique.
6. Se tiene un experimento en el que los factores a estudiar y sus niveles son los siguientes: temperatura (10, 20 y 30°C); tiempo (60 y 90 minutos). Elabore una lista de todos los posibles tratamientos de este diseño.
7. ¿Qué es el error aleatorio y qué es el error experimental?
8. ¿Por qué es importante aleatorizar el orden en que se corren los diferentes tratamientos en un diseño de experimentos?
9. Señale las etapas en el diseño de un experimento, así como algunos aspectos clave de cada una de ellas.

10. ¿Por qué se considera la planeación del experimento como la etapa más importante? Describa cinco actividades que se realizan en esta etapa.
11. Describa de manera breve los tres principios básicos del diseño de experimentos.
12. Explique la diferencia entre significancia práctica y significancia estadística. Proponga un ejemplo donde se tenga la segunda pero no la primera.
13. Describa cinco aspectos que son relevantes al momento de seleccionar el diseño experimental.
14. Mencione dos problemas en su área de trabajo que pudieran abordarse con el diseño de experimentos. Para cada problema enliste algunos factores de control y al menos una variable de respuesta.
15. Suponga que se quiere estudiar el desempeño de un automóvil, y lo que se desea es encontrar los factores que más influyen en su rendimiento. ¿Cuáles podrían ser las variables de respuesta?, ¿cuáles los factores a estudiar?, ¿cuáles los factores no controlables o de ruido?
16. Se quiere comparar el desgaste de dos marcas de llantas A y B, para lo cual se eligen al azar 10 conductores particulares de cierta ciudad. A cinco de ellos, seleccionados al azar, se les instalan gratis las llantas marca A y a los cinco restantes la marca B, con el compromiso por escrito de permitir la verificación del desgaste cada seis meses.
 - a) ¿Cree que este experimento permita una comparación justa del desgaste de las dos marcas de llantas?
 - b) ¿Qué consideraciones se debieron hacer para lograr una comparación más justa?
 - c) Proponga al menos un cambio al experimento que usted considera que mejoraría la comparación.
17. Una compañía farmacéutica realizó un experimento para comprobar los tiempos promedio (en días), que son necesarios para que una persona se recupere de los efectos y las complicaciones que siguen a un resfriado común. En este experimento se compararon a personas que tomaron distintas dosis diarias de vitamina C. Para hacer el experimento se contactó a un número determinado de personas, que en cuanto les daba el resfriado empezaban a recibir algún tipo de dosis. Si la edad de las personas es una posible fuente de variabilidad, explique con detalle cómo aplicaría la idea de bloqueo para controlar tal fuente de variabilidad.
18. En el caso anterior, ¿qué podría pasar si no se controla la posible fuente de variación que es la edad?
19. Un grupo de investigadores trabaja para industrializar la mermelada de tuna; para ello, realizan mermeladas considerando los siguientes factores: a) variedad de tuna: tres tipos, b) con cáscara o sin cáscara, c) completa o la pura pulpa. Por lo tanto, se tienen 12 posibles formas (tratamientos) de producir mermelada.

La pregunta central que se plantean es si influyen en el sabor los factores considerados, y quisieran encontrar cuál es la mejor combinación de mermelada (tratamiento ganador). Para responder hicieron las 12 combinaciones y pusieron cada una en un recipiente numerado. Enseguida se trasladaban a lugares concurridos donde acomodaban los recipientes ordenados del 1 al 12, y a personas del público les entregaban una hoja de registro y la invitaban a que en el orden dado probaran en pequeñas porciones las mermeladas y anotaran qué tan buena les parecía la mermelada (en una calificación entre 0 a 10). Al final se tuvo la respuesta de 420 personas, donde cada una daba 12 calificaciones (una para cada mermelada). ¿Hay algo que desde su punto de vista invalide los resultados obtenidos? Utilice el sentido común y argumente su respuesta.