

CAPÍTULO VI

DETERMINAR LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS

CAPÍTULO VI

DETERMINAR LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS

Las variables del proceso definidas deben ser confirmadas por medio de análisis de varianza, diseño de experimentos y/o estudios multivari, para medir la contribución de esos factores en la variación del proceso. Adicionalmente, para analizar el proceso se pueden usar pruebas de hipótesis e intervalos de confianza. Una vez encontrados los factores críticos, se ajusta el proceso y se reduce su variación.

Una vez que se han detectado los requerimientos críticos del cliente, estos se deberán traducir en variables críticas de salida del proceso, el siguiente paso es saber que variables son las que se deben considerar críticas en la entrada para registrar sus valores o datos para posteriormente analizarlos y controlarlos. En la mayoría de los procesos se sabe cuáles son las variables críticas de entrada que se tienen que registrar y medir, sin embargo, se puede dar el caso donde se tengan que manejar una gran cantidad de variables para obtener el resultado deseado y no se sabe con certeza cual o cuales se deberán seleccionar, en este caso habrá que emplear una herramienta llamada Diseño de Experimentos que ayudará a determinar las variables que tienen una influencia significativa en el resultado del proceso.

6.1. Teorema del límite central

Este teorema se basa en la suposición de que se toman muestras de tamaño suficientemente grande y que se calculan las medias de dichas muestras. Sin importar cuál sea la distribución original (unidades individuales), la distribución de las medias de dichas muestras será normal. La figura 6.1 muestra una representación gráfica del Teorema del Límite Central.

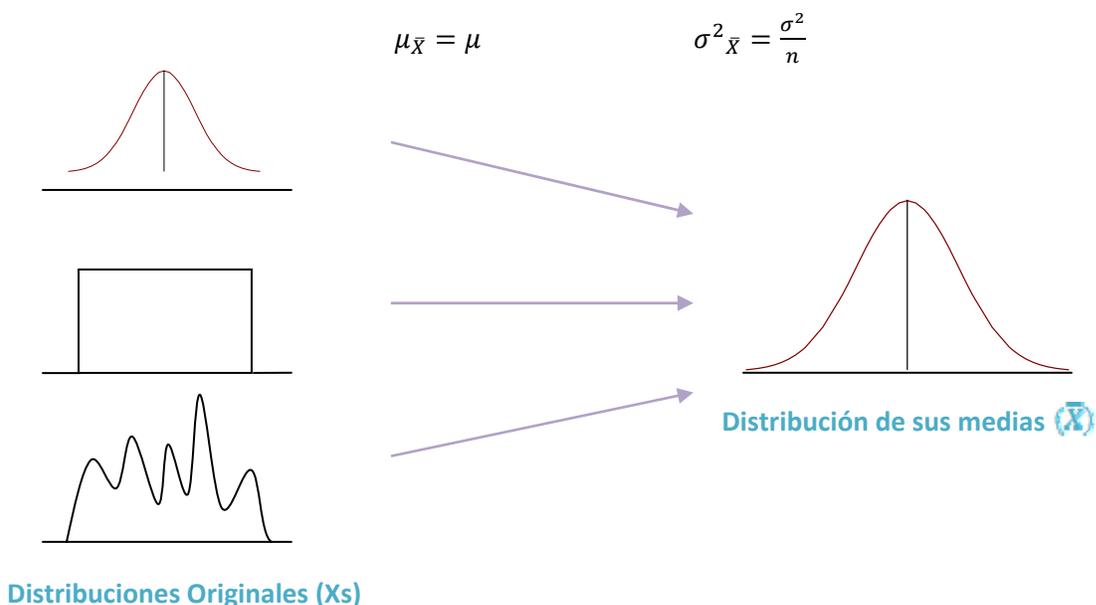


Figura 6.1 Representación gráfica del Teorema del límite central

La variación de la distribución de los datos originales es mayor que la variación de la distribución de sus medias muestrales, como se muestra en la figura 6.2

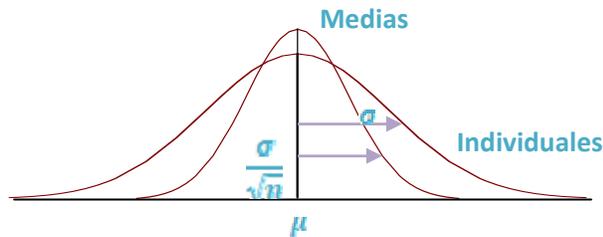


Figura 6.2 Variación de la distribución de los datos

6.2. Pruebas de hipótesis e intervalos de confianza

En esta sección se introduce el uso de las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza como herramientas de análisis de un proceso.

La prueba de hipótesis (PH) es un procedimiento estadístico usado para tomar una decisión, con base en una muestra, en cuanto al valor que puede tener algún parámetro (media, varianza, proporción, diferencia entre medias o proporciones, o cociente entre varianzas), o sobre la distribución que puede tener la población de donde provienen los datos:

Los elementos de una Prueba de Hipótesis son:

- Las hipótesis. La que se desea probar (H_0) y su complemento (H_a).
- La(s) muestra(s). La información que se obtiene de la población o poblaciones.
- El estadístico de prueba (EP). Es una variable aleatoria que resume la información de la muestra.
- La región de rechazo de H_0 (RR H_0). Es una parte de la distribución de referencia en la cual si el EP se encuentra ahí, se rechaza H_0 .
- La decisión. Decidir si se rechaza o no a H_0 .
- El nivel de confianza de la prueba ($1-\alpha$).

Los tipos de errores y sus probabilidades se definen como:

$$\alpha = p(\text{error tipo I})$$

$$\alpha = p(\text{rechazar } H_0 | H_0 \text{ verdad})$$

$$\beta = p(\text{error tipo II})$$

$$\beta = p(\text{aceptar } H_0 | H_0 \text{ falsa})$$

Para realizar una prueba gráfica de normalidad el procedimiento es el siguiente:

1. Obtener los datos.
2. Elaborar la tabla correspondiente.
3. Graficar en papel probabilístico normal.

4. Si los datos siguen una trayectoria aproximadamente lineal, se acepta su normalidad.

6.2.1. Prueba de hipótesis e intervalo de confianza para una media

La prueba de hipótesis e intervalo de confianza para una media se define como:

$$\begin{array}{l} \text{Ho: } \mu = \mu_0 \\ \text{Ha: } \mu > \mu_0 \\ \quad \mu < \mu_0 \\ \quad \mu \neq \mu_0 \end{array}$$

$$\text{a) } n \geq 30 \quad EP: Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad IC = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$\text{b) } n < 30, \text{ población normal}$$

i. Varianza conocida

$$EP: Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad IC = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

ii. Varianza desconocida

$$EP: Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad IC = \bar{X} \pm t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

6.3. Diseño y análisis de experimentos

La herramienta menos conocida por lo general pero la más efectiva de la iniciativa Six Sigma es el Diseño de Experimentos (DOE). Conocer el DOE puede resultar una ventaja competitiva para las empresas que quieren minimizar la variabilidad de sus productos y procesos. Es una herramienta que se emplea para encontrar de manera eficiente la relación causa efecto entre numerosas variables de entrada o procesos y la variable de salida.

Otros beneficios son:

- Optimización de procesos y formulaciones.
- Reducción en la variación del proceso y producto mejorando robustez.
- Investigación de variables del proceso.
- Investigación de variables que producen ruido.
- Reducción de costos y mejorar eficiencias.
- Centrar un producto en su nominal.
- Obtener un mejor conocimiento de los procesos.
- Mejorar de forma significativa la calidad.
- Mejorar los índices de capacidad.
- Identificar características de control.

El Diseño de Experimentos es la herramienta que consiste en realizar cambios activos, sistemáticos y controlados de las entradas a los procesos bajo estudio y posteriormente observar los efectos en los resultados obtenidos de estos procesos.

El Diseño de Experimentos es, en la actualidad, una de las herramientas más importantes dentro del marco de la iniciativa Six Sigma. Aporta una metodología para reducir la variabilidad propia de las características de calidad de los productos, y la variabilidad que originan los procesos sobre los productos. Constituye un recurso de gran utilidad en la gestión diaria de los procesos que permite aumentar la capacidad de las características dentro de las tolerancias impuestas. Su misión es obtener procesos capaces y productos con características capaces.

Uno de los objetivos que persigue cualquier empresa moderna para lograr la competitividad es conseguir productos y servicios de gran calidad y mínimo costo. La calidad es el mejor camino para lograr el éxito y, bien planteada, logrará la reducción de costos. En este sentido, el DOE desempeña un papel realmente importante en la optimización de procesos, productos y servicios. Dentro de lo que pueden denominarse herramientas de mejora Six Sigma, el DOE se enmarca dentro del grupo de técnicas que persiguen la optimización y la mejora continua. El DOE se emplea en las fases de diseño y planificación de productos, servicios y procesos de fabricación. No obstante, también se utiliza para la mejora de procesos, productos y servicios ya desarrollados.

El DOE es una valiosa herramienta para obtener una mejora apreciable de la calidad, mediante un proceso de experimentación con diferentes valores de las características o factores clave que afectan la respuesta de los procesos o productos sometidos a estudio. Suministra al técnico una forma de interrogar al proceso. No obstante, no sustituye al conocimiento técnico ni a la experiencia, pero permite al técnico ser más efectivo a la hora de eliminar la variabilidad en los procesos que afectan negativamente a su calidad.

El DOE es el cambio intencionado de las entradas de un proceso para observar cambios en la salida o salidas del proceso. Un proceso es un conjunto de pasos o una serie repetible de actividades que produce un producto o un servicio. Las entradas son factores que influyen en el comportamiento del proceso. Pueden incluir máquinas, materiales, métodos, personal, factores medioambientales, etc. La salida del proceso es una característica que se registra para determinar la calidad del proceso. Esa salida o respuesta puede ser el número de piezas defectuosas, el tiempo de servicio a un cliente, la altura de una capa metálica, etc.

El DOE pretende el cambio sistemático de los factores a la entrada que se cree que influye en la respuesta del proceso. Midiendo la salida del proceso se determinará que factor afecta la respuesta y con qué intensidad.

El objetivo del DOE es mejorar las prestaciones del nuevo producto y de su proceso productivo reduciendo la variabilidad de las características del producto o proceso que se consideran claves para garantizar la satisfacción del cliente. Todo producto o proceso presenta una variabilidad respecto a los objetivos previstos –especificaciones– en las magnitudes que definen la calidad del producto. Lo que interesa en lograr que la media de las características que se miden en el producto coincida con las especificaciones deseadas, los valores objetivo con la mínima dispersión o variabilidad: usando términos estadísticos, con la menor desviación estándar posible.

El Diseño de Experimentos permite lograr dos objetivos:

1. **Detección:** Identificar qué factores de entre todos los técnicamente posibles son las fuentes principales de variabilidad en las características elegidas que garantizan la calidad de las prestaciones del producto o proceso.
2. **Modelado:** Una vez identificados estos factores, determinar a qué valores deben ajustarse para que las características deseadas logren las especificaciones deseadas con la mínima variabilidad (o desviación estándar) mediante el modelado de la respuesta en función de los factores identificados.

El uso de esta herramienta es necesario porque si se intenta resolver el problema experimentando a base de cambiar el nivel de los factores uno cada vez, dejando los demás constantes, no se puede determinar si existen interacciones entre esos factores, y las interacciones están presentes en muchos casos. Para su diseño es imperativo repetir las condiciones del experimento dos o más veces, con el objeto de medir el error, es decir, la variabilidad entre las corridas realizadas bajo las mismas condiciones experimentales (variación de la causa común) y la diferencia entre las respuestas debido a un cambio en las condiciones de un factor (cambio especial).

Existen tres principios básicos a ser considerados en todo diseño y análisis de un experimento:

1. El *orden* de los experimentos debe ser *aleatorio*. Aleatorizar el orden de las pruebas neutraliza fuentes de variación que pueden estar presentes durante el experimento. En general, dichas fuentes de variación son desconocidas, y pueden ser muchas, por ejemplo, cansancio del trabajador durante la realización de las pruebas o durante la medición de las mismas, cambios de voltaje, cambios de humedad, etc.
2. Es recomendable *replicar* cada experimento. La razón es obtener un estimado del error, tanto para ver qué tan bien el diseño representa al proceso, como para poder comparar los factores y determinar si son activos o no. Se define como *réplica genuina* la obtenida en una sola prueba o medición para cada combinación de los factores, y volver a repetir dichas condiciones para cada réplica adicional, en lugar de tomar varias muestras o mediciones de una vez en cada combinación. Lo opuesto a las réplicas genuinas implican un mayor tiempo al realizar las pruebas y un costo también mayor, pero es la mejor manera de obtener un estimado más preciso del error.
3. Ocasionalmente pueden existir variables presentes en un experimento, cuyo efecto no se desea probar y que incluso pueden afectar o encubrir la influencia de las variables con las que se desea experimentar. En este caso es necesario neutralizar o bloquear el efecto de tales variables nocivas.

El Diseño de Experimentos es una técnica ampliamente utilizada en la actualidad en la metodología Six Sigma pero sus orígenes se remontan a los años veinte cuando Ronald Fisher desarrolló esta técnica estadística aplicándola en la agricultura. Sus trabajos se difundieron a otros países durante las décadas de los años treinta y cuarenta y a otros sectores como la biología, la medicina y la industria en general. Fisher continuó elaborando esta técnica junto a Yates, desarrollando los diseños factoriales a dos y tres niveles. En 1946, Plackett y Burman desarrollaron los diseños de identificación que permiten identificar entre varias variables cuáles afectan de modo significativo a la respuesta de interés.

No obstante, fue Genichi Taguchi quien reexportó desde Japón esta técnica a Estados Unidos y Europa a partir de los años ochenta, a partir del desarrollo de métodos propios caracterizados por el empleo de las matrices ortogonales.

Después de la II Guerra Mundial, Taguchi fue requerido por la empresa Bell para solucionar los problemas que habían surgido en las líneas telefónicas existentes entre las islas de Japón, provocados por el ruido en las comunicaciones, y lo consiguió mediante el método que define su filosofía: *reducir los efectos de las causas o variables en la respuesta*, en este caso el efecto del ruido en la señal.

La reducción del impacto de las causas o variables sobre la respuesta deseada hace que ésta sea robusta o inmune a variaciones en esas variables: por eso Taguchi dice que se hace esa respuesta robusta, se dota al producto o proceso que se caracteriza con esa respuesta, de <<robustez>>. Se trata pues, de que esas variables no afecten a aquello que realmente interesa.

El procedimiento que se muestra a continuación es el método Taguchi, el cual es una opción usada para experimentar en un proceso y determinar los factores significativos que lo afectan, se basa en diseñar productos y procesos cuya actuación no se vea afectada por condiciones externas para construir y usar un plan experimental. El método incluye un juego de tablas que permiten investigar las principales variables y sus interacciones con un número mínimo de ensayos.

La técnica Taguchi pone mucha importancia en la reducción de la variabilidad de productos y procesos; en otras palabras para hacer productos y procesos más robustos y menos susceptibles a cambios debido a la influencia de la variación de los materiales, condiciones de operación, máquinas, líneas de producción, equipos y cambios de operadores.

En lugar de concentrarse en las variables del proceso, a menudo es mejor intentar ajustar el nivel de variables que producen ruido.

Se define el ruido como aquellas variables que son difíciles o imposible de controlar y que afectan el proceso, son a menudo medioambientales como temperatura y humedad, pero puede incluir variación de lote a lote de materiales y el uso de operadores y máquinas diferentes.

Un proceso robusto es aquél que no cambia con ruido cambiante. Esta es una parte importante de la técnica de Taguchi.

Aunque el concepto es bastante simple, seleccionar la tabla más apropiada e interpretar los resultados puede ser difícil. Hay riesgo de tener una conclusión no adecuada. Por consiguiente siempre es aconsejable verificar cualquier resultado de una matriz Taguchi.

La metodología de diseño de Taguchi está compuesta de 4 fases principales, cada una de las cuales contiene un determinado número de pasos, los cuales se resumen en la figura 6.3.

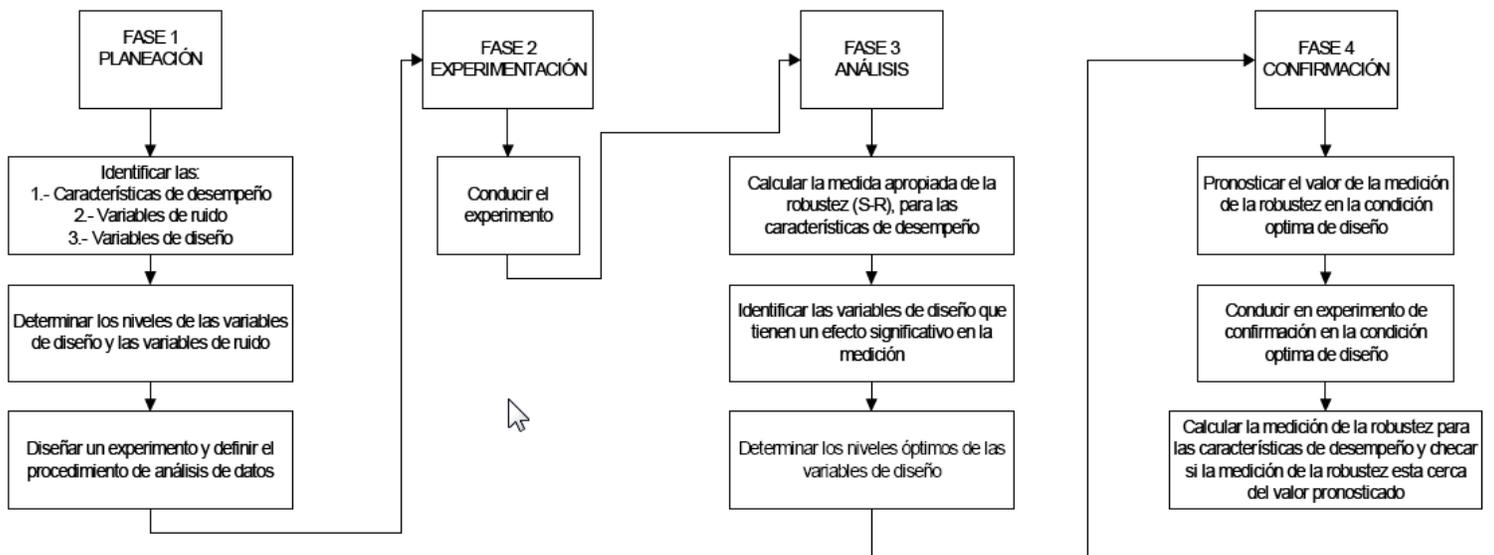


Figura 6.3 Metodología de diseño de Taguchi

De acuerdo con la metodología de Control y Mejora de Procesos, el Diseño de Experimentos se utiliza para adquirir un conocimiento completo de los procesos y fundamentalmente en dos casos particulares:

1. Cuando en un proceso se han identificado y eliminado todas las causas especiales de variación y sin embargo el proceso sigue sin estar en estado de control estadístico, o
2. Cuando una característica de control no cumple el mínimo de capacidad a pesar de estar el proceso en estado de control.

La característica que distingue al DOE en comparación con otras herramientas de mejora de calidad es que esta metodología requiere cambios activos en un proceso para identificar las variables claves del proceso y entorno, industrial o de servicios, es importante reconocer que el DOE es el método más económico de conocer y mejorar un proceso.

La figura 6.4 muestra el modelo del proceso y los objetivos de DOE.

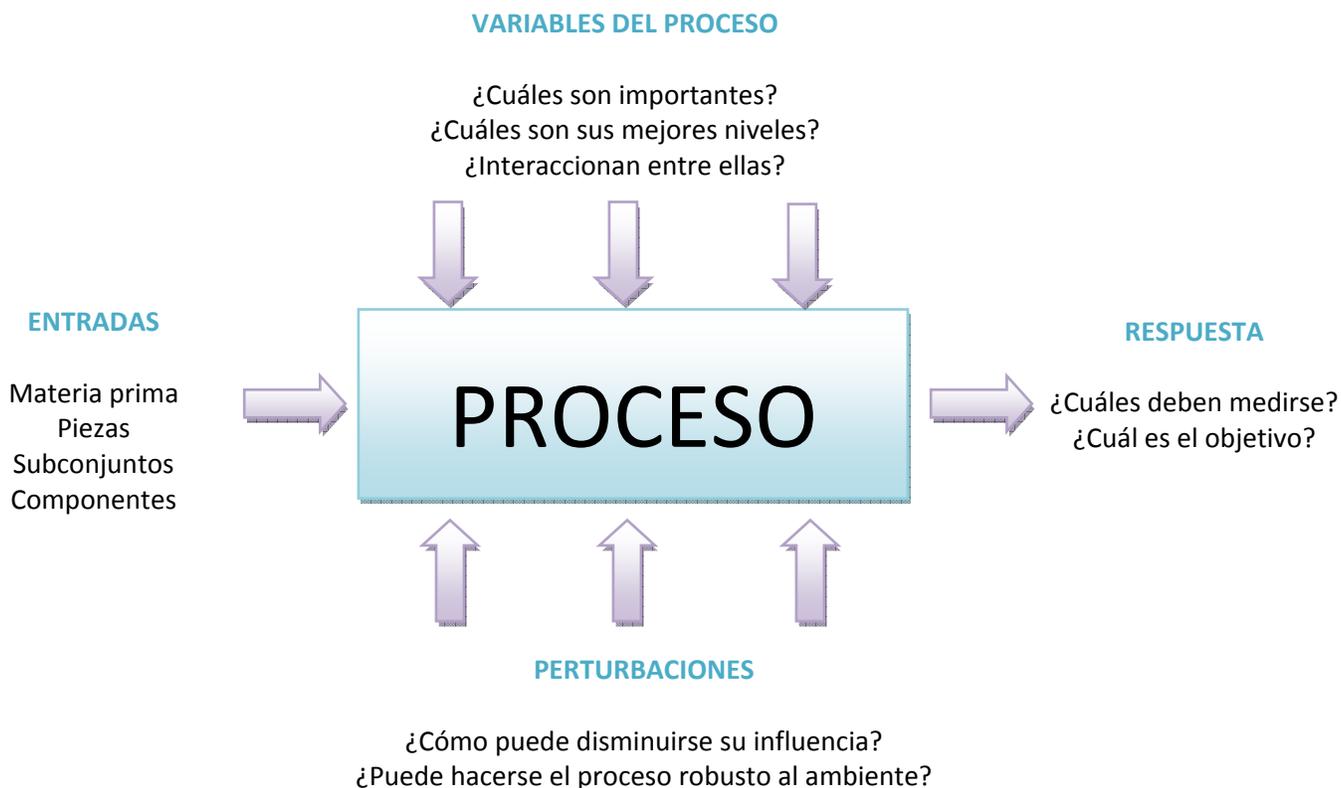


Figura 6.4 Modelo del proceso y los objetivos de DOE

La mejor manera de evitar problemas futuros de calidad es utilizar el DOE desde las primeras etapas del ciclo del producto para diseñar productos de calidad. Requiere el uso de prototipos o simulaciones para evaluar los distintos diseños de los componentes de un conjunto (con criterio basado en las actuaciones), así como el ajuste de estos componentes en un conjunto (criterios de fabricación). El DOE puede ser utilizado también en etapas posteriores a la de diseño, como es durante la fabricación, aunque en muchas ocasiones todos los esfuerzos de mejorar un proceso en esta etapa no son capaces de remediar un diseño no adecuado.

Terminología del Diseño de Experimentos

En la tabla 6.5 se muestra parte de la terminología requerida para discutir el Diseño de Experimentos. Se consideran las distintas columnas de la tabla. Su contenido es la *matriz de diseño completo* de un diseño sencillo. En este diseño hay tres variables del proceso (factores, entradas, variables independientes o variables de control) etiquetadas con las letras A, B y C. Para cada factor se han seleccionado dos niveles (dos valores de cada factor a los que se van a realizar los distintos experimentos individuales). En las columnas debajo de cada letra identificativa de un factor se pueden ver los niveles indicados con los números 1 y 2. El número 1 indica el nivel bajo del factor mientras que el 2 indica el nivel alto. Por ejemplo, si la temperatura fuese un factor, el 1 podría ser 100° y el 2, 150°. Los niveles también pueden designarse con -1 y +1 para el nivel bajo y alto respectivamente. En ocasiones se simplifica más señalando sólo (+) y (-).

| e.e. | Variables del Proceso | | | Variables de Respuesta | | |
|------|-----------------------|---|---|------------------------|-----------|-----------|
| | A | B | C | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 5.4 | 5.9 | 5.1 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 6.1 | 5.8 | 6.4 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | 7.2 | 7.5 | 6.9 |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 3.7 | 4.1 | 3.9 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 9.3 | 9.8 | 10.1 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 5.5 | 5.1 | 4.9 |
| 7 | 1 | 2 | 2 | 8.3 | 7.7 | 8.6 |
| 8 | 2 | 2 | 2 | 10.7 | 9.8 | 10.4 |

Tabla 6.5 Terminología del diseño de experimentos.

Cada fila representa un experimento elemental o combinación de tratamientos. Un *experimento elemental* (e.e.) es una combinación particular de los niveles de los distintos factores. Al observar la tabla, que se denomina *matriz de diseño*, podemos comprobar que están representadas todas las posibles combinaciones. Ésta es una característica de una de las familias de diseños existentes (diseños factoriales completos). No todos los diseños incluyen todas las combinaciones posibles (diseños factoriales fraccionados).

Para cada experimento elemental se obtiene un resultado, observación o medida de la variable de respuesta. La variable respuesta refleja alguna característica de calidad del proceso o producto. El objetivo del experimento es llegar a conocer de qué forma la combinación de tratamientos afecta a la variable respuesta. De esta forma se identifican las variables del proceso que tienen una mayor influencia en la respuesta. También se identifica la combinación de tratamientos más deseable para los objetivos del proceso.

En el diseño del ejemplo de la tabla se obtienen tres mediciones de la respuesta para cada experimento elemental con el fin de proporcionar una estimación mejor de cómo se comporta la variable respuesta con cada combinación de tratamientos y también una estimación del error experimental. A estas repeticiones se les denomina replicaciones o réplicas.

La figura 6.6 muestra la representación gráfica del diseño.

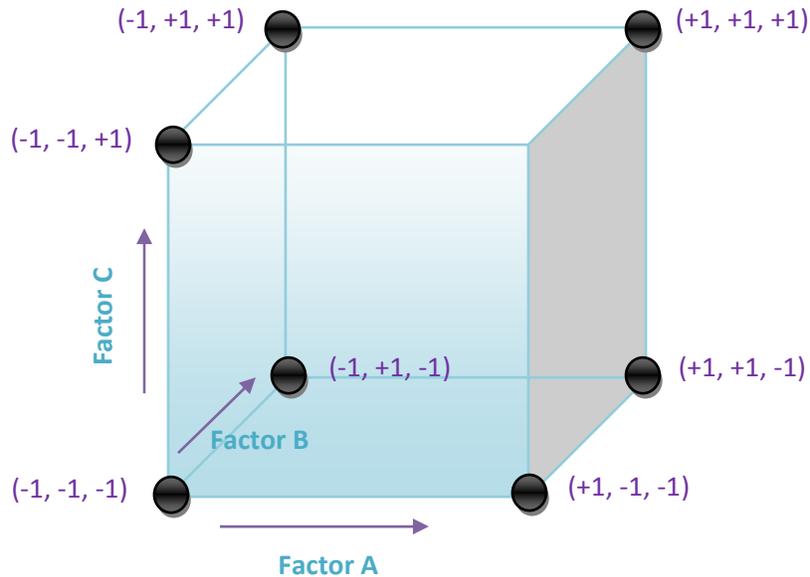


Figura 6.6 Representación gráfica del diseño de experimentos

Principios Fundamentales de la Experimentación

- **Control experimental.** Implica el control por parte del investigador de las variables del proceso y de otras fuentes de variación de una forma activa y sistemática de tal manera que exista una alta probabilidad de identificar las relaciones existentes entre las variables del proceso y las variables de respuesta existiendo al mismo tiempo una baja probabilidad de que factores que no están incluidos en el diseño afecten a la variable de respuesta.
- **Aleatorización.** Protección del experimento frente a todas las posibles fuentes de influencia exterior e interior con sesgo. El investigador puede proteger el experimento mediante el uso de la Aleatorización. Las herramientas estadísticas utilizadas para analizar el experimento tienen como supuesto de partida que varios aspectos del experimento se han realizado utilizando la Aleatorización y las restricciones en ésta producen distintas situaciones de análisis de resultados.

La aleatorización se aplica tanto a la selección de los elementos o materiales utilizados en el experimento (unidades experimentales) como a la secuencia de los experimentos elementales, que también se realiza en orden aleatorio.

- **Replicación.** Supone obtener dos mediciones o más para cada combinación de tratamientos. La replicación proporciona una estimación del error experimental y una estimación más precisa de los efectos de los factores, ayudando también en el análisis del experimento.

- **Comprender las relaciones del proceso.** Relaciones existentes entre variables del proceso, relaciones existentes entre las variables de respuesta y relaciones entre ambos tipos de variables.

Secuencia típica del proceso experimental

Cada experimento es único, por lo que puede llevar a error el presentar una secuencia típica del proceso experimental. La secuencia mostrada en la figura 6.7 es típica de la que sigue un equipo cuando comienza una serie de experimentos en un proceso.

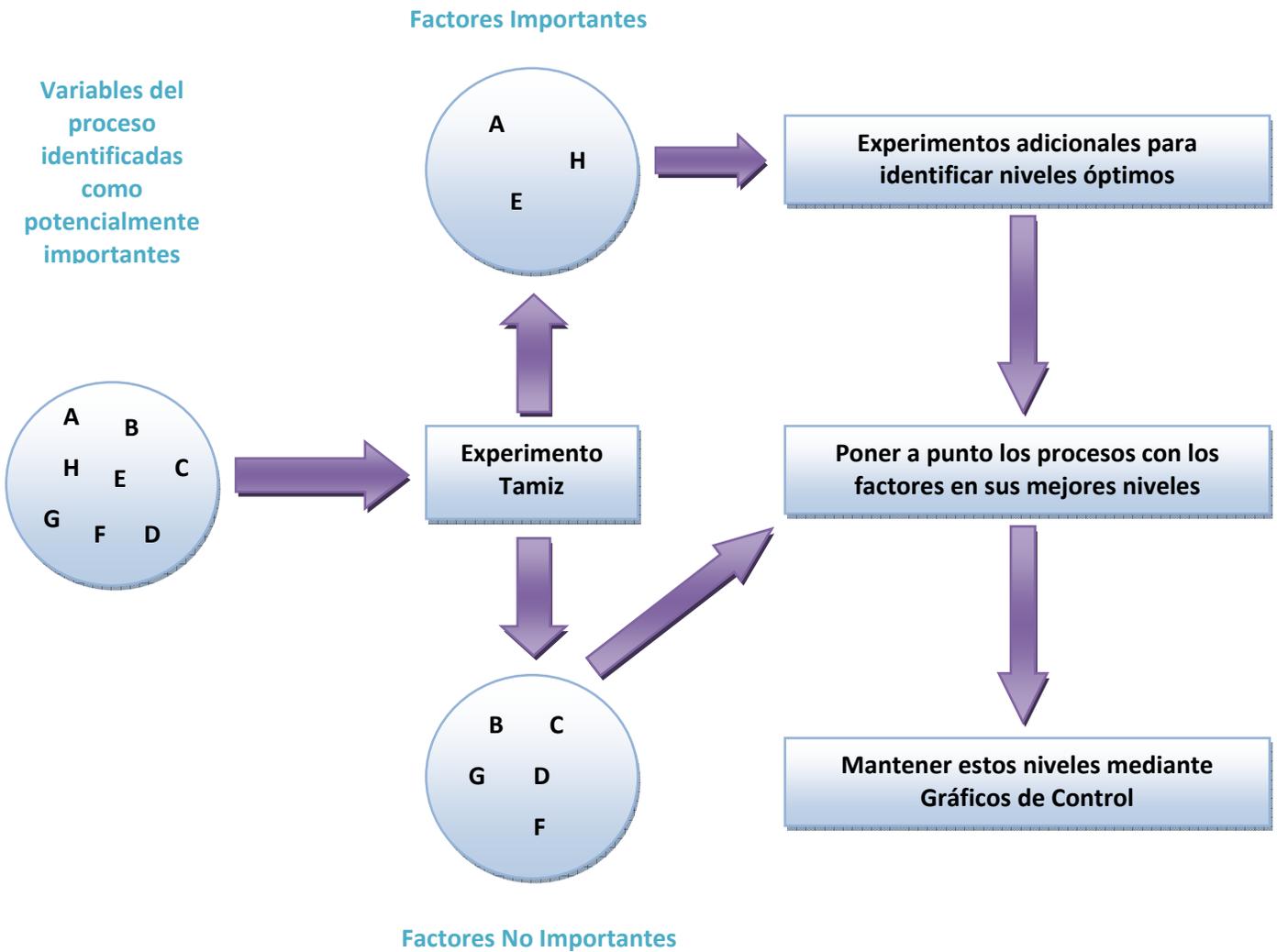


Figura 6.7 Secuencia típica del proceso experimental

Típicamente, el primer paso es identificar un gran número de variables de proceso que pueden afectar a la variable de respuesta. El experimento inicial es un experimento que hace de “tamiz” en el sentido de que su objetivo es identificar de entre todas las variables candidatas aquellas que realmente tienen un efecto importante en la variable de respuesta. Este enfoque es eficaz porque los siguientes experimentos se concentrarán en aquellas variables del proceso que se sabe que son importantes.

Después de este experimento tamiz, se dispondrán de dos conjuntos de factores: los importantes y los no importantes. Son factores importantes aquellos que en análisis estadístico indica que tienen un efecto significativo en la variable de respuesta. Son factores no importantes aquellos que cuando varían no le afecta, o le afecta ligeramente, a la variable de respuesta. Los factores importantes se estudian mediante experimentos adicionales que identificarán sus valores más deseables o “mejores niveles”.

Por lo general, se necesita tiempo para implantar los resultados del experimento en el entorno de producción. Supone poner a punto el proceso con los factores del mismo en sus mejores niveles. Existen mejores niveles tanto para las variables importantes como para las no importantes. Para las importantes se consideran mejores niveles aquellos que producen un funcionamiento óptimo del proceso mientras que para las no importantes los mejores niveles son aquellos que producen inferior costo. Por último, una vez que el proceso está funcionando en sus niveles óptimos, se mantiene mediante la aplicación de gráficos de control.

Comparación entre el Control Estadístico de Procesos y el Diseño de Experimentos

Los papeles jugados por cada una de las técnicas son fundamentalmente los que se muestran a continuación:

Control Estadístico de Procesos

- Utiliza técnicas dentro del propio proceso productivo.
- Detecta problemas.
- Realiza una observación pasiva del proceso.
- Vigila las características de productos y/o parámetros de control del proceso.
- Se utiliza para mantener el proceso en una región óptima.

Diseño de Experimentos

- Utiliza, por lo general, técnicas fuera del proceso productivo.
- Identifica fuentes del problema.
- Realiza cambios activos en el proceso.
- Identifica los parámetros claves del proceso.
- Identifica las regiones óptimas del proceso.

Ambas herramientas tienen papeles complementarios. Ninguna herramienta por separado es tan potente como su uso conjunto. Tanto el CEP como el DOE son potentes herramientas de mejora de calidad y su potencia sólo puede ser mejorada cuando se aplican en conjunto.

Tipos de Variables en el Diseño de Experimentos

- **Variables de respuesta.** También denominadas *respuestas, salidas o variables dependientes*. Su identificación es una de las tareas más importantes. Estas variables son mediciones utilizadas para evaluar el proceso mediante el experimento, por lo que su selección requiere considerar:
 - Qué aspectos del proceso son importantes.
 - La capacidad de medir la variable de respuesta de una forma precisa y fiable.

- Las variables de respuesta pueden ser cualitativas o cuantitativas, siendo éstas últimas preferibles cuando se pueda elegir, debido a que las cualitativas son menos sensibles y requieren un mayor número de experimentos elementales.
 - Es mejor disponer de múltiples variables de respuesta independientes en un experimento, porque proporcionan un mayor conocimiento del proceso ayudando a evitar la obtención de resultados con comportamientos inferiores a los óptimos. Estos resultados se obtienen cuando el investigador enfoca su atención en la optimización de un aspecto del proceso sin tener en cuenta, aunque sea inadvertidamente, otros aspectos también importantes.
 - La inclusión de variables de respuesta altamente correlacionadas es un despilfarro, dado que estas variables añaden poca información adicional.
- **Variables del proceso.** También denominadas *variables de control del proceso, factores, variables controlables o variables de control del proceso.*
 - Estas variables son aquellos factores del proceso que pueden ser controlados por el investigador y que se piensa que están relacionadas con la variable de respuesta. Lo normal es empezar con una gran lista de variables candidatas y, mediante consideraciones de costo o dificultad de su variación, llegar a una lista más pequeña. Hay que llegar a una solución de compromiso entre dos objetivos contrapuestos: entender el proceso y hacer mínimo el costo del experimento.
 - Aunque el costo del experimento es menor cuanto menor sea el número de variables a estudiar, el desestimar excesivas podría ocasionar que se perdiera un aspecto importante del proceso. No existen reglas para seleccionar el mejor conjunto de variables del proceso. La decisión principalmente depende de la experiencia y los conocimientos técnicos, así como de consideraciones económicas respecto al presupuesto concedido para conocer el proceso.
 - Pueden ser cualitativas o cuantitativas y, también igual que antes, son preferibles las cuantitativas, dado que proporcionan un mayor conocimiento del proceso.
 - **Perturbaciones.** Son condiciones o factores que pueden afectar a la variable de respuesta, pero que no son controlables de una forma activa durante el proceso de fabricación, aunque puedan serlo durante el experimento.
 - Lo peligroso con estas variables es no tenerlas en cuenta.
 - El experimento se puede proteger del efecto de estas variables mediante el uso de diseños y procedimientos adecuados: aleatorización, formación de bloques, análisis de covarianza, etc.

- Estas variables pueden hacer peligrar el resultado del experimento de dos formas: enmascarando efectos de ciertos factores y hacer que variables del proceso que son importantes no lo parezcan y lo contrario, que variables sin importancia parezcan importantes.
- Cuando no se siguen los procedimientos adecuados, nunca se sabe si los resultados del experimento son verdadero reflejo del proceso o un artificio de algunas variables desconocidas.

El Método Experimental. Conocimiento del Proceso

La mayoría de los fabricantes no conocen sus procesos de una forma tan profunda como sería ideal. Las siguientes preguntas ayudan a saber si se conocen en forma los procesos:

- ¿Se han identificado que factores y parámetros de éstos son importantes en los procesos?
- ¿Se podría afirmar, documentándolo con datos, que los procesos están funcionando de una forma óptima?
- ¿Se podría representar una curva de cómo reacciona cada proceso cuando se modifican los valores de sus factores?
- ¿Se sabe cuáles son las interacciones existentes entre los factores más importantes de los procesos?

La mayoría de las industrias deberían contestar que no a las preguntas anteriores. El objetivo de la experimentación es aprender cosas respecto a los procesos.

El aprendizaje en este contexto se define como el proceso de llegar al conocimiento del comportamiento de las variables de respuesta cuando se modifican los valores de las variables del proceso.

El Método Experimental. Modelo del Proceso

La representación de un modelo del proceso nos ayudará a entender las relaciones existentes entre los distintos elementos del proceso.

Los elementos más importantes de un proceso, y las preguntas que deben hacerse con respecto a cada elemento, son los siguientes:

- a) Las entradas del proceso:
 - Materias primas.
 - Piezas.
 - Componentes.
 - Subconjuntos.

¿Puede minimizarse la variación de estos elementos antes de realizar el experimento?

¿Puede hacerse robusto el proceso frente a su variación?

- b) Las variables del proceso:
¿Cuáles son importantes?
¿Cuáles son sus mejores niveles?
¿Existen interacciones entre ellas?
- c) Las perturbaciones y variables ambientales:
- ¿Cómo puede minimizarse su influencia?
- ¿Puede hacerse robusto el proceso frente a las variables ambientales?
- d) El resultado del proceso:
¿Qué variables de respuesta deben medirse?
¿Cuáles son los objetivos de las variables de respuesta?

El Método Experimental. Resumen del experimento

Una forma adecuada de resumir un experimento es representar los resultados como se muestra en la figura 6.8. Cada variable respuesta se representa en función de las distintas variables del proceso. En estos ejemplos, existen dos niveles o valores distintos para las variables del proceso y se ha representado la respuesta media a cada nivel.

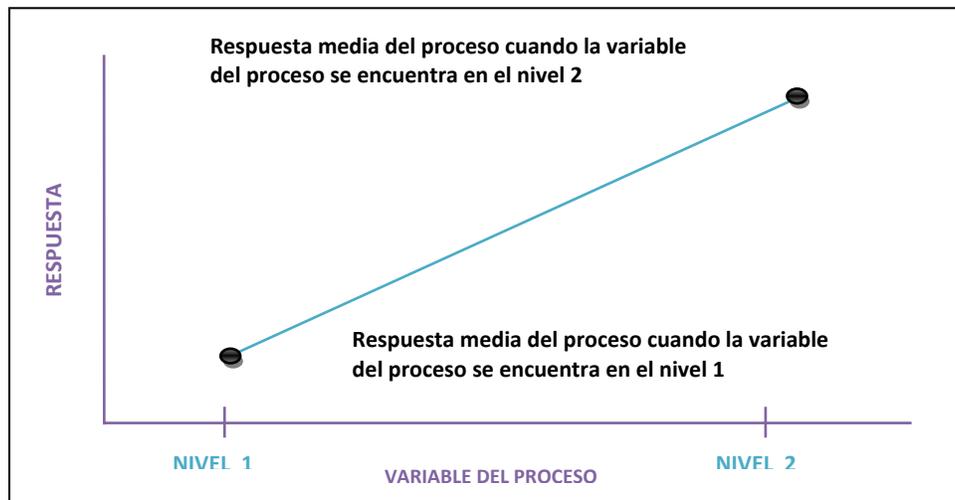


Figura 6.8 Resumen del experimento

El Método Experimental. Explorar el proceso.

El objetivo es entender las relaciones existentes entre las variables de proceso y las variables de respuesta. En el caso de diseños de experimentos a dos niveles, la elección de estos niveles es crítica para el éxito del experimento. Los resultados pueden variar considerablemente dependiendo de los valores (niveles) elegidos para realizar el experimento.

El Método Experimental. Objetivos del experimento.

Se debe identificar un objetivo para cada variable de respuesta del experimento. Existen cuatro tipos distintos de objetivos:

- Nominal,
- Hacer mínimo,
- Hacer máximo,
- Hacer robusto.

Por lo general, el objetivo más común es que la respuesta sea lo más cercana a un valor objetivo que puede ser el nominal. En este caso, encontrar los mejores niveles de los factores del proceso en encontrar aquellos valores que centran la respuesta en la especificación.

En ocasiones, el objetivo puede ser hacer mínima la respuesta. Casos de este tipo ocurren cuando la respuesta es la variación, los costos, el porcentaje de elementos defectuosos, etc.

Algunas respuestas, como la producción, el rendimiento, etc., tienden a hacerse máximos. El objetivo es identificar qué valores de las variables del proceso logran hacer que la respuesta sea máxima.

Localizar las regiones robustas de un proceso puede verse como un caso particular del objetivo de hacer mínimo, porque lo que se intenta es minimizar el impacto de algunos factores en la respuesta. La robustez es un tema importante, por lo que merece ser tratado aparte. Hacer que un proceso sea prácticamente insensible a la variación de las variables molestas o a la variación entre los distintos lotes de distintos proveedores es un objetivo importante. Es una de las áreas de mayor ahorro de costos. Se considera el caso en el que existe mucha variabilidad entre los distintos lotes de materia prima recibidos por una empresa. El material puede estar dentro de especificaciones, pero la variación existente entre los distintos lotes es lo suficientemente grande como para requerir que se fabrique una preserie cuyo fin es identificar los valores que debe tomar el proceso para cada lote. Si el proceso fuera robusto a esta variación entre lotes, se tendría un ahorro de todos los costos asociados a estas puestas a punto.

Preparación del Programa Experimental

La necesidad de realizar experimentación generalmente es el resultado de un programa de mejora de la calidad de los procesos. En dicho programa debe establecerse debidamente cuáles son los objetivos del experimento y los criterios necesarios para saber si se han alcanzado dichos objetivos cuando se finalice la experimentación.

Como cualquier otra herramienta o técnica de mejora, la experimentación funciona mejor cuando es realizada por un equipo. Se debe crear un equipo que esté compuesto por un grupo de personas que conozcan y entiendan el problema específico que se debe solucionar. La herramienta es tan específica que suele ser necesario un facilitador estadístico.

El primer trabajo que debe abordar el equipo es la identificación de las variables de respuesta del proceso. Éstas son las variables que definen la calidad del proceso o producto resultado del proceso. Después de cada experimento elemental, se registran los valores de una o más variables de respuesta, en aquellas unidades que previamente se hayan acordado por el equipo.

Las variables de respuesta deben ser, siempre que se pueda, cuantitativas y el equipo debe definir el procedimiento de medición (punto de inspección, instrumentación a utilizar, etc.).

Si se produce una desviación respecto a los procedimientos, se deberá registrar porque cualquier desviación respecto a los procedimientos acordados podría invalidar el experimento.

Una vez que se han listado las variables de respuesta que se van a observar en el experimento, el equipo centra su atención en la identificación de las variables del proceso.

Las variables del proceso, cuya variación es la que va a provocar la variación observada en las variables de respuesta, son las que van a participar en el experimento y pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas. Las variables del proceso tienen como característica que son perfectamente controlables durante el proceso productivo, es decir, se pueden establecer los valores que se deseen para ellas.

En ocasiones también se pueden identificar las perturbaciones, que podemos definir como aquellas variables que son imposibles de controlar en el entorno real de producción (aunque puedan ser controlables en el entorno experimental) y cuya variación puede dar lugar a que exista variación en las variables de respuesta.

Cuando el equipo acaba la identificación de las variables del proceso, la lista suele ser excesiva. Es necesario reducir ese listado a un número manejable de variables. La experiencia de las personas que han participado en la selección es fundamental en la priorización de las variables. El criterio de selección debe apoyarse en la experiencia previa que el equipo tenga sobre si una variable es muy probable que afecte o no a la respuesta del proceso. También se utilizarán criterios de tipo económico, como puede ser el costo de los cambios de nivel de la variable.

Después de desarrollar la lista de variables del proceso (y perturbaciones cuando sea aplicable), el equipo debe decidir los valores a los que van a ser ensayadas estas variables, los denominados *niveles*.

La selección de niveles exige escoger una solución de compromiso. Cuanto más separados se encuentren los valores de los niveles, más sensible será el experimento; pero, cuando el experimento se realice durante la producción, estos niveles no podrán estar más separados que los límites de tolerancia de la especificación. Cuando el experimento se realiza fuera del entorno productivo, suelen escogerse unos niveles entre un 10 y un 15% fuera de los límites de la especificación.

Selección del Diseño

Después de identificar las variables de diseño y sus valores de ensayo, se seleccionan los experimentos elementales (e.e.) que van a formar parte del experimento. Cada e.e. es una única combinación de valores de ensayo.

Por ejemplo, si un experimento se va a realizar con tres variables del proceso (presión, catalizador y tiempo de reacción) con los niveles siguientes: la presión a 1 y 1.5, el catalizador a dos niveles (el del fabricante A y el del fabricante B) y un conjunto de tiempos de 20 y 60 minutos, un e.e. puede consistir en realizar el proceso a una presión de 1.5 con el catalizador B durante un tiempo de 60 min. El diseño del experimento es el conjunto de e.e. que configura el experimento.

Para el ejemplo anterior, un diseño de experimentos podría consistir en los siguientes e.e. que se muestran en la figura 6.9.

| e.e. No. | Presión | Catalizador | Tiempo |
|----------|---------|-------------|--------|
| 1 | 1 | A | 20 |
| 2 | 1.5 | A | 20 |
| 3 | 1 | B | 20 |
| 4 | 1.5 | B | 20 |
| 5 | 1 | A | 60 |
| 6 | 1.5 | A | 60 |
| 7 | 1 | B | 60 |
| 8 | 1.5 | B | 60 |

Figura 6.9 Diseño de experimentos elementales (e.e)

La selección del diseño consiste en la elección de un conjunto de experimentos elementales que proporcione la información deseada de la forma más eficiente.

Teniendo en cuenta que al final, a mayor número de experimentos elementales, más tiempo será necesario para realizarlos y mayor el costo de la experimentación, en la selección del diseño se deberá tener en cuenta que el experimento se realizará dentro de los límites del presupuesto disponible. Además, en caso de que el experimento se realice en el entorno de producción, se tendrá en cuenta que usualmente no es posible mantener máquinas fuera de producción durante un periodo largo de tiempo.

Es regla general que en aquellos experimentos con muchas variables de diseño, no es práctico ensayar todas las posibles combinaciones de valores de ensayo. En vez de esto, se selecciona un subconjunto del total de posibles experimentos elementales. Es lo que llamamos un experimento fraccionado. Se debe decidir el número de distintos e.e. a incluir en el experimento. Un e.e. es distinto de otro si tiene una combinación diferente de valores de ensayo. Después, se debe decidir si los e.e. deben ser duplicados; es decir, realizar replicaciones. Cuando un conjunto de valores de ensayo se realiza más de una vez, se dice que el diseño es replicado.

El número de e.e. distintos en el experimento determina la resolución del diseño. El número de replicaciones determina su sensibilidad.

- **Resolución del Diseño.** Determina el tipo y cantidad de información que puede extraerse de un experimento. Los diseños de baja resolución (con pocos experimentos elementales) son capaces sólo de estimar los efectos independientes de las variables de diseño y no pueden estimar los efectos de sus interacciones. Por lo general, los diseños de baja resolución son realizados usualmente al principio para identificar las variables de diseño que son significativas. Los diseños de alta resolución se utilizan para identificar las interacciones entre las variables de diseño.
- **Sensibilidad.** La sensibilidad de un experimento determina con cuánta precisión se puede distinguir entre la variación causada por las variables del proceso y la causada por el error aleatorio. Cuanto mayor sea la replicación, mejor será la sensibilidad del experimento.

En la selección del diseño, también se tendrá en cuenta si se encuentra en una fase inicial de la experimentación o en una fase avanzada. La fase inicial se caracteriza por disponer de poca información y muchas variables del proceso candidatas a participar en el experimento. En este caso, se seleccionarían diseños de baja resolución.

Hay muchos tipos diferentes de diseños estándar, algunos más complejos que otros. Cada diseño tiene sus puntos fuertes y débiles y es apropiado para una situación particular.

Realización del Experimento

La realización del experimento de acuerdo a lo planificado es fundamental para obtener unos resultados de confianza.

Antes de comenzar el experimento, la matriz de ensayo debe ser aleatorizada. La matriz de ensayo se sabe que es el resumen donde se plasma el diseño del experimento. Por lo tanto, hablar de aleatorización de la matriz es lo mismo que hablar de la aleatorización del experimento. La aleatorización afecta a dos cosas fundamentales:

- a) Aleatorización de la secuencia de los e.e.
- b) Aleatorización en la asignación de las unidades experimentales a cada experimento elemental.

La aleatorización de la secuencia de ensayos es un paso muy importante que debe hacerse antes de la realización del experimento, siendo su objetivo fundamental mitigar el efecto de cualquier factor desconocido que pudiera resultar en un sesgo en los resultados del experimento. Por lo general, se denomina *orden de ensayo u orden de experimentación* al orden obtenido al aleatorizar la secuencia de experimentación y *orden natural u orden original* al orden obtenido mediante el generador de diseño.

Siempre es preferible realizar experimentos en los que la secuencia de experimentación ha sido aleatorizada, aunque existen ocasiones en las que esta aleatorización es impracticable física o económicamente.

Un experimento en el que los ensayos no se realizan de forma aleatoria es vulnerable a los efectos de las perturbaciones. El riesgo real que se corre es no reconocer que una variable oculta que no ha sido considerada como variable del proceso introduzca un efecto sesgado en el experimento. Esta situación no sería detectada hasta que no se realizaran los ensayos de verificación de los resultados cuando en estos no se confirmara la predicción.

El proceso de experimentación consta de una serie de etapas preestablecidas de carácter genérico, como se muestra en la figura 6.10

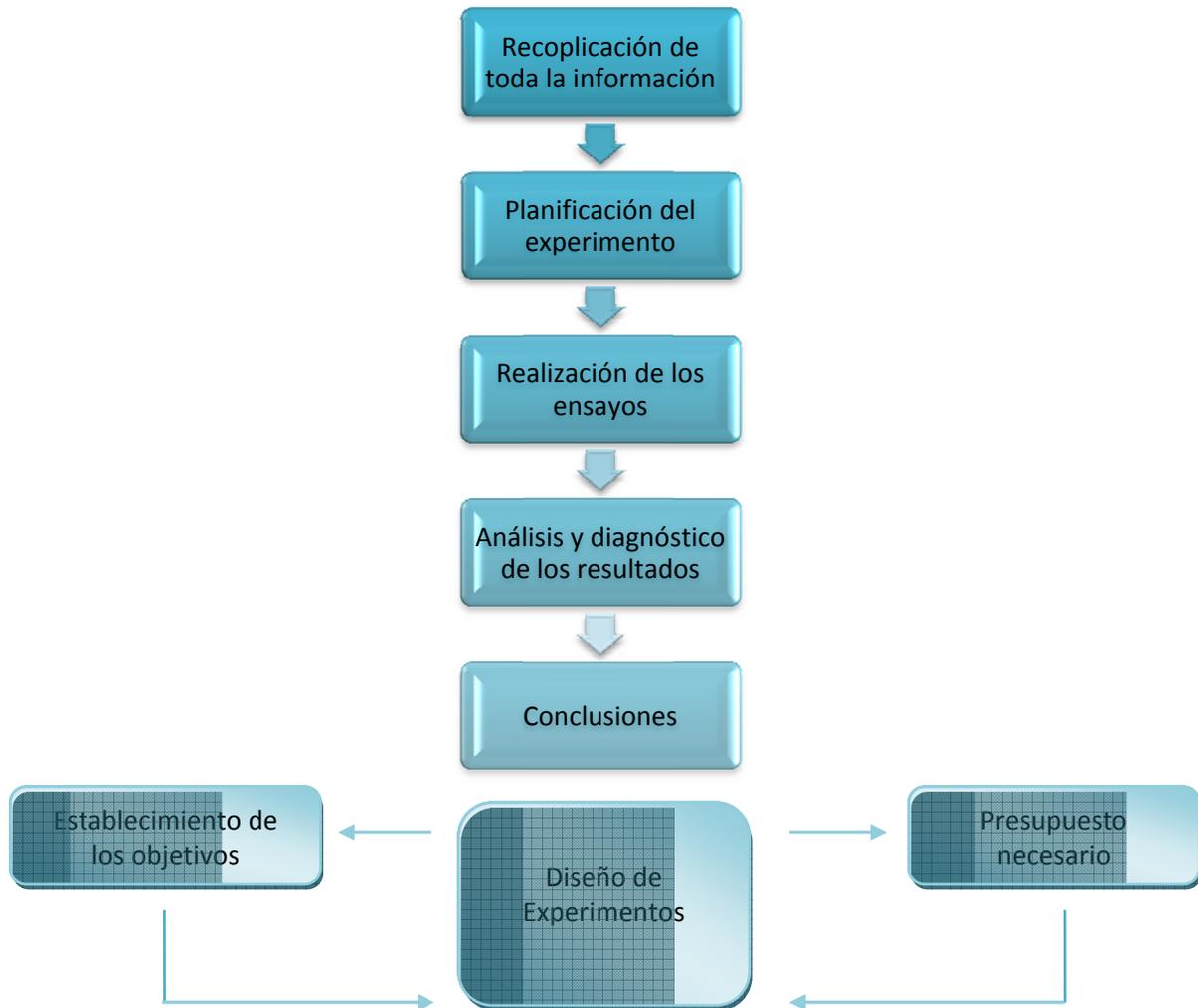


Figura 6.10 Proceso de experimentación

- 1. Recopilación de información.** Recopilar toda la información necesaria y hacerlo de forma adecuada será fundamental para lograr la efectividad del experimento. Hay que conocer perfectamente el proceso o producto que se someterá a estudio, la problemática que existe, así como todo lo relacionado con la toma de datos.
- 2. Establecimiento de los objetivos principales.** Es imprescindible conocer de antemano cuáles son los objetivos que se tratarán de alcanzar con el experimento. Será preciso que todo el grupo de trabajo que realizará el estudio consensue tanto los objetivos como los diferentes criterios que permitirán evaluar si se han alcanzado los mismos.
- 3. Presupuesto disponible.** Con la información recopilada y una vez establecidos los objetivos, es importante conocer el presupuesto con el que se contará a efectos de planificar los ensayos, personal, instrumentación, etc.

4. **Planificación de los experimentos.** Ésta trata de analizar los aspectos clave y los factores del proceso o producto que influyen de manera determinante, de evaluar los niveles de dichos aspectos, de planificar el número de ensayos y la metodología a utilizar, del tiempo durante el cual se van a realizar dichos ensayos, etc.
5. **Realización de los ensayos.** Deberán llevarse a cabo de forma arbitraria o aleatoria, sin un orden establecido, con el objeto de evitar posibles efectos de memoria. De esta forma se obtiene mayor objetividad y precisión.
6. **Análisis y Diagnóstico de los resultados de los diversos ensayos.** Se procederá a realizar un estudio exhaustivo de toda la información disponible, elaborando los gráficos y tablas necesarias que faciliten el análisis.
7. **Conclusiones.** Por último, se tratará de elaborar unas conclusiones sobre el estudio realizado, en las que se indicarán si se han logrado los objetivos establecidos, si se ha obviado algún factor clave, si se ha de repetir algún ensayo, etc.

Análisis de Resultados

El análisis de los resultados consiste fundamentalmente en determinar el efecto que cada variable del proceso que ha participado en el diseño tiene sobre las variables de respuesta. El cambio medio sufrido por la variable de respuesta del proceso que se puede atribuir al cambio en los niveles de una variable del diseño se le denomina el “efecto principal” de esta variable. Se puede utilizar un gráfico denominado “gráfico de efectos principales”, para mostrar la magnitud y dirección del efecto de cada variable de diseño (esto es, el tamaño del efecto y si aumenta o disminuye la salida).

En la figura 6.11, se dibuja una línea entre el valor de la salida media correspondiente al primer nivel de la variable de diseño y el valor de salida media correspondiente al segundo nivel de la variable de diseño. La diferencia entre las dos medias se denomina *efecto principal medio de la variable de diseño*. Si los dos niveles de la variable de diseño están codificados como +1 y -1, la pendiente de la recta coincide con el efecto principal dividido por 2. La pendiente de la línea mide el cambio medio en la salida por cada unidad de cambio en la variable de diseño. Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será el impacto de la variable de diseño en la salida

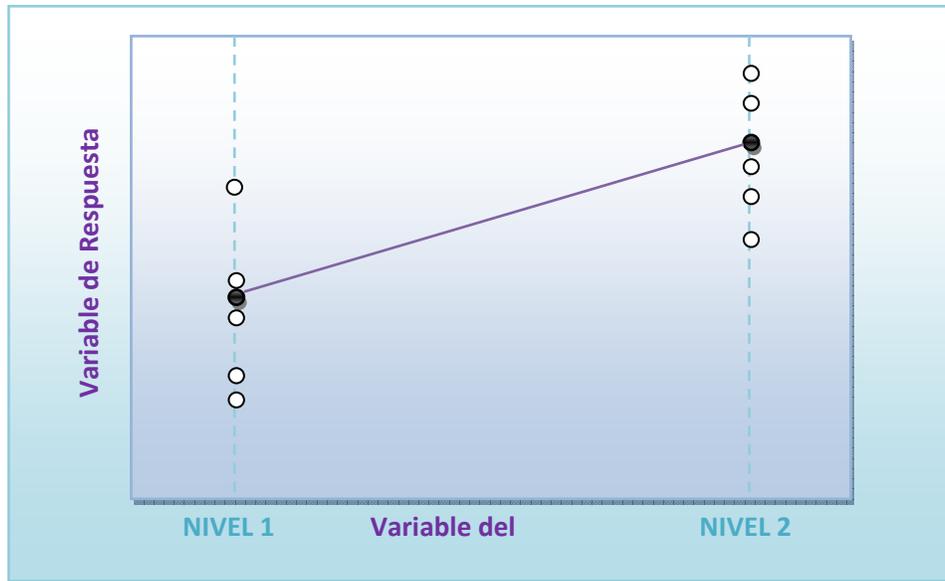


Figura 6.11 Análisis de resultados

A continuación, se determina qué cantidad de la variación de la salida es debida a los cambios efectuados en las variables de entrada y cuanta debida al error experimental. Para ello suele utilizarse el método ANOVA. Este método identifica la cantidad de variación explicada por cada variable de diseño (y cada interacción) y la cantidad explicada por el error. Se calcula un estadístico F que es utilizado para determinar la probabilidad de que la variación observada sea realmente resultado sólo del error experimental. Sólo aquellas variables que impactan en la salida más allá de lo que podría ser explicado por la variación aleatoria son consideradas “estadísticamente significativas”. Se dice que estas variables “contribuyen a la señal”.

En el caso de que sea imposible que la variación fuera causada por una fluctuación aleatoria (error), se considera significativa la variable de diseño o la interacción.

Las variables no significativas pueden descartarse y los siguientes experimentos pueden concentrarse en los valores significativos.

Una forma de ilustrar la significancia de los efectos es dibujar un diagrama de Pareto de los valores absolutos de sus pendientes. Si el impacto de una variable de diseño excede un cierto nivel de “ruido” (error), entonces se considera significativo. Si, por el contrario, los cambios en la característica de calidad se encuentran en una región que puede ser explicada por el error experimental, la variable de diseño es considerada estadísticamente no significativa. En la figura 6.12, las variables A, F, H y E están por debajo del nivel y se consideran estadísticamente no significativas. Las variables B, C, G y D tienen un efecto no explicable por el error experimental y, por lo tanto, son estadísticamente significativas.

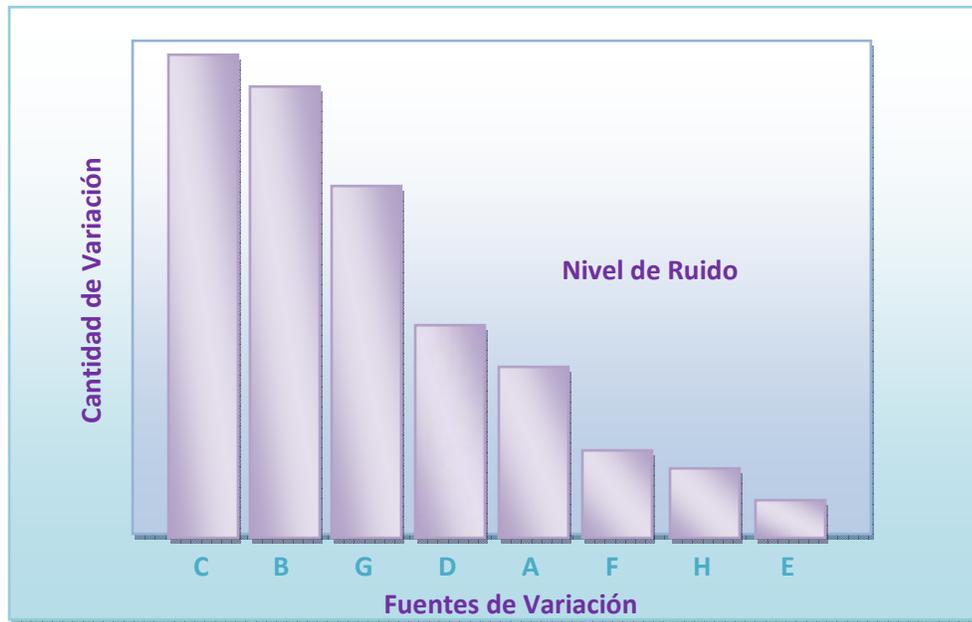


Figura 6.12 Diagrama de Pareto

Después de identificar los factores claves del proceso, se deben determinar los “mejores” niveles de operación. Los “mejores” se refieren a aquellos valores que están más cercanos a cumplir el objetivo experimental (que la salida sea mínima, máxima o un valor tomado como objetivo).

El Diseño de Experimentos proporciona un modelo matemático del comportamiento del proceso. A las diferencias encontradas entre los valores que predice el modelo y los valores reales observados en la experimentación se denominan *residuos*. Dichos residuos son una muestra del error aleatorio y es parte del análisis comprobar que los residuos no se oponen a los supuestos realizados respecto al error experimental. Estos supuestos son que los residuos se distribuyen de forma independiente de acuerdo a una distribución $N(0, s)$. En el análisis de los residuos se utilizan técnicas gráficas y contrastes estadísticos formales.

Determinación de la Aceptabilidad de los Resultados

En la fase de análisis, el resultado puede revelar que algo no ha ido bien en el experimento. Por ejemplo, puede haber sucedido algo no planificado durante el experimento que introduzca variación adicional en los resultados y, por lo tanto, haya hecho disminuir la sensibilidad del experimento. También es posible que la resolución elegida para el diseño no sea la adecuada. En cualquier caso, se deberá repetir el experimento desde la fase en que haya ocurrido el fallo.

El último paso es comprobar en el entorno de producción que los resultados obtenidos del experimento se repiten en el proceso productivo.

La relación del diseño de experimentos con la metodología Six Sigma se da durante la ejecución de la etapa mejorar, específicamente en:

- a) Optimizar y robustecer el proceso. Si el proceso no es capaz, se deberá optimizar para reducir su variación. Se recomienda usar diseño de experimentos, análisis de regresión y superficies de respuesta.
- b) Validar la mejora. Realizar estudios de capacidad.