Diseño y Análisis de Experimentos

CONTENIDO

1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y LA CALIDAD
1.1 IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS
1.2 CONCEPTOS BASICOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS
1.2.1 DEFINICIONES DE TERMINOS EN DISEÑO DE EXPERIMENTOS
1.3 ALGUNOS EJEMPLOS DE ERRORES TIPICOS EN EL ANALISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS
1.4 DIRECTRICES PARA REALIZAR UN EXPERIMENTO y PRINCIPIOS
1.4.1 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS
2. DISEÑO UNIFACTORIAL
3. DISEÑO EN BLOQUES ALEATORIZADOS
4. DISEÑOS FACTORIALES
5. DISEÑOS FACTORIALES 2^K
6. DISEÑOS FACTORIALES 2^K NO REPLICADOS
/. DISEÑO FRACCION UN MEDIO
8. DISEÑO FRACCION UN CUARTO
9. DISEÑOS 2^k CON PUNTOS CENTRALES
10. PRÁCTICAS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

OBJETIVO GENERAL:

* Lograr que la experimentación estadística sea una estrategia cotidiana de quienes tomen el curso, en sus labores de control, mejora y desarrollo.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Corregir prácticas inadecuadas de experimentación de los asistentes.
2. Capacitar a los asistentes en la aplicación del diseño de experimentos en un contexto industrial y de investigación.
3. Lograr que el alumno sea capaz de usar adecuadamente la computadora para el análisis de los resultados experimentales.

EVALUACION

La evaluación o calificación se obtendrá de acuerdo a:

1) Resultado de dos exámenes 50%
2) Un reporte escrito de las prácticas (TAREAS) realizadas durante el curso (25%)
3) Proyecto final 25%

1. EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y LA CALIDAD

1.1 IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Uno de los elementos fundamentales de la evolución del control de calidad a sido el de enfocar mayores esfuerzos hacia la prevención, en detrimento de la detección (inspección). Lo anterior se puede apreciar gráficamente en la figura 1.1, donde se muestra el caso particular de la evolución del control de calidad en Japón (Romero y Zúnica, 1994). Ahí, como en los demás países, inicia el control de calidad con actividades de inspección después de la producción.

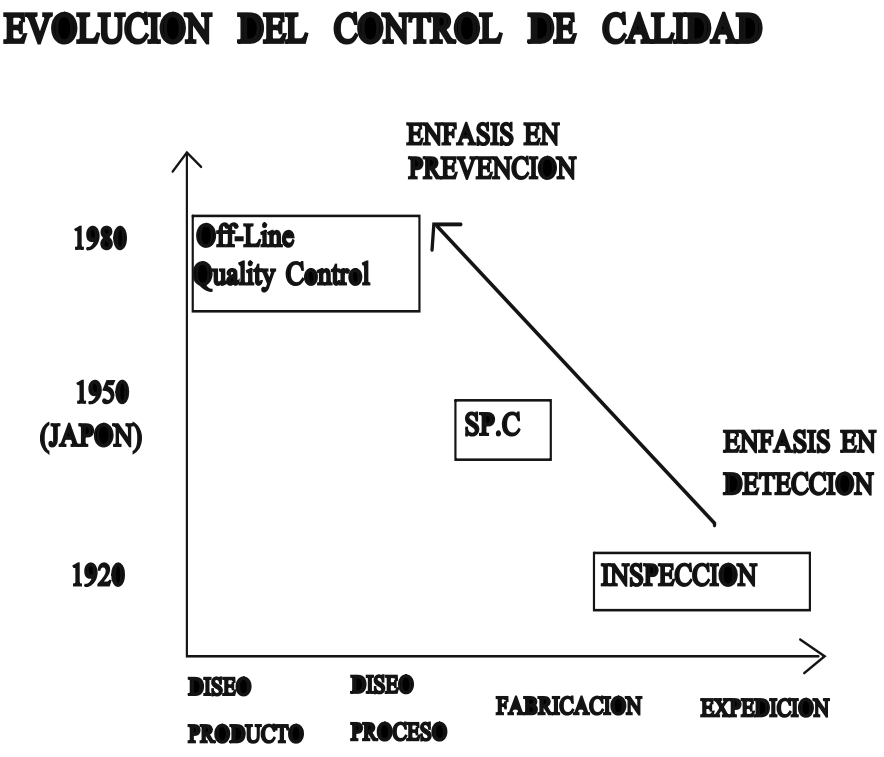

Figura 1.1. Evolución del control de calidad de detección a prevención.

Sin embargo, las empresas líderes en Japón fueron desplazando el control de calidad a detectar y prevenir oportunamente los problemas de calidad durante la fase de fabricación, aplicando para ello el control estadístico de calidad (SPC, Statistical Process Control). Es a partir de los años 80´s que en Japón, en las empresas líderes, se llega a la conclusión que los esfuerzos de control de calidad deben enfocarse principalmente hacia actividades fuera de la línea de producción (Off-line) para prevenir los problemas de calidad durante las fases de diseño del proceso de producción y del diseño del producto. Y es en estas etapas donde técnicas como QFD, AMEF, Confiabilidad, Diseño de Experimentos, etc. han tenido una amplia aplicación.

En la figura 1.2 se muestra la contribución de diferentes herramientas a los esfuerzos de control de calidad en Japón y Estados Unidos. En la que se aprecia como en Japón la inspección ha ido disminuyendo desde 1950, cosa que empezó a ocurrir en E.U. hasta la década de los 80´s. En cuanto al diseño de experimentos a partir de 1960 en Japón ha crecido sistemáticamente hasta alcanzar una contribución similar al Control Total de Calidad, en cambio en E.U. se empezó a aplicar más ampliamente el diseño de experimentos apenas a partir de 1980. Otra hecho que destaca es que a medida que el control total de calidad y el control de calidad fuera de línea se difunden y tienen éxito en la empresa, es menos necesaria la inspección y el control estadístico.

Como conclusión de lo anterior podemos decir que es necesario trabajar más ampliamente en actividades de control de calidad enfocadas a la prevención durante las fases de diseño del producto y del proceso; y para esto el diseño de experimentos es fundamental. Esto se reconoce cada día más en los medios industriales, y esta metodología cada día se utiliza más en las diferentes ramas industriales en todo el mundo, por su relativa sencillez, utilidad y eficiencia tanto en resolver problemas, buscar mejoras y para buscar innovaciones (nuevos productos, materiales o procesos).

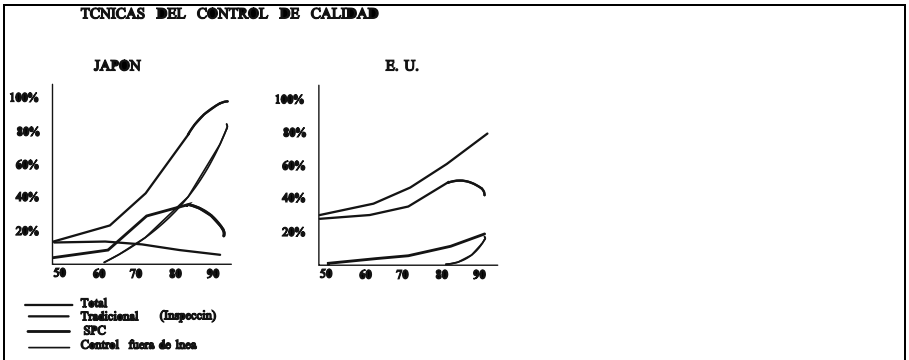

Figura 1.2. Diferentes herramientas del control de calidad.

1.2 CONCEPTOS BASICOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Un experimento es una serie de pruebas en las que se inducen de manera planeada cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso, con el propósito de ver cómo influyen en una característica de calidad de salida. Estas variables, también llamados factores controlados o estudiados, pueden ser numéricas, como temperatura, tiempo, velocidad, presión de procesos; o no numéricas, como tipo de material, operador, modelo de maquina, etcétera. La figura 1.3 muestra un esquema de diseño de experimentos.

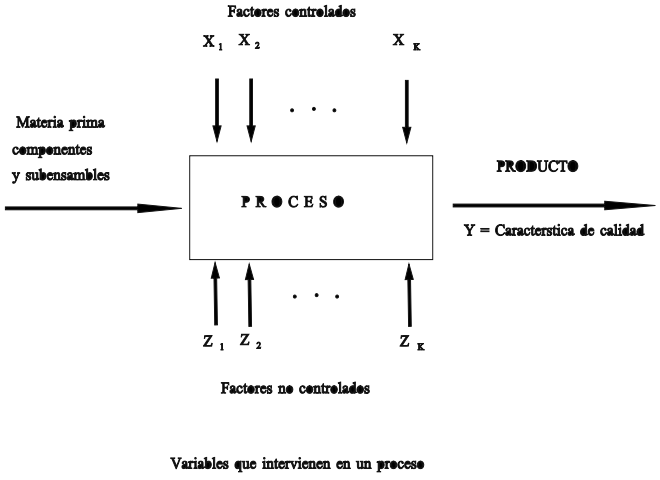

Figura 1.3. Esquema de un diseño de experimentos.

En un experimento bien planeado se puede contestar por lo general tres preguntas básicas:

a) Cuáles factores influyen de manera significativa en la variable de respuesta (Y);
b) Cuál es la relación entre los factores estudiados y Y;

c) Qué niveles de los factores controlados optimizan la variable de respuesta.

De manera más específica una buena planeación de un experimento y un buen análisis se pueden resolver problemas como los siguientes:

- Desarrollar productos que sean resistentes a diferentes condiciones de uso.
- Encontrar las condiciones de proceso que dan por resultado valores óptimos de las características de calidad del producto.
- Elegir entre diferentes materiales, métodos de producción o proveedores, con el fin de mejorar la calidad y reducir costos.
- Hacer el proceso insensitivo (robusto) a la variabilidad trasmitida por sus componentes.

El diseño de experimentos es una herramienta fundamental para caracterizar un proceso, ya que permite investigar la relación entre las variables de entrada de un proceso y sus variables de salida.

El éxito de un experimento radica en la calidad de su planeación. Lo cual se convierte en un obstáculo mayúsculo si tomamos en cuenta que una de los hábitos poco favorecidos por las personas en las organizaciones es la planeación (Gutiérrez Pulido, 1997). Es común que aunque se tenga conocimientos de diseño de experimentos, se quiera empezar a realizar pruebas antes de conceptualizar el problema y decidir la mejor estrategia experimental para abordarlo. Por ello, en la sección 1.4 se recomienda de manera primordial seguir a detalle y de manera secuencial los siguientes pasos para diseñar y analizar un experimento.

1.2.1 DEFINICIONES DE TERMINOS EN DISEÑOS DE EXPERIMENTOS

Experimento: conjunto de pruebas cuyo objetivo es obtener información, para fundamentar conclusiones y decisiones, y así cumplir con objetivos.

Factores Controlados (Factores estudiados): Variables cualitativas o cuantitativas, que son estudiadas durante el experimento para ver si influyen o no en la variable de respuesta. Su identificación requiere de conocimiento previo. Para estudiar el efecto de estos factores es necesario que durante las pruebas experimentales el experimentador asigne y controle los niveles o valores que va a tomar cada uno, de tal forma que no esté variando indiscriminadamente, sino que tenga un papel (valor) controlado con el propósito de poder apreciar su efecto cuando cambia de valor. Por ejemplo, si un factor a estudiar es una temperatura de un horno para ver como influye en la eficiencia del proceso de horneado, entonces el experimentador debe asignar dos niveles por lo menos en los que se estudiará el efecto de la temperatura, de tal forma que al compara estos efectos se tenga una idea de cómo influye la temperatura en el proceso de horneado.
Es frecuente que los factores a estudiar en un experimento sean las principales variables de entrada del proceso. Recordar que estas variables, son por lo general las variables de control del proceso, tales como temperatura, velocidad, tipo de material, etcétera; y es necesario definirlas en un nivel adecuado para que el proceso realice correctamente su función. Se espera que los cambios en estas variables se reflejen en las variables de salida

Factores no controlables (Factores no estudiados). Son variables que no se estudian durante los experimentos, ya sea porque se puede suponer que no influyen sobre la variable de respuesta, o porque es difícil o incosteable controlarlos (fijarlas a un nivel o valor determinado). Si un factor que no se estudia durante el experimento tiene posibilidades de influir de manera importante sobre la variable de respuesta, las pruebas experimentales deben hacerse de tal manera que el efecto del factor sea mínimo. En general todos los factores no estudiados deben permanecer lo más invariantes que sea posible durante los experimentos para anular o disminuir el efecto que pudieran tener.

Variable de Respuesta: Ésta define la forma en que el proceso o producto responde a las variaciones de los factores controlados, y son el objetivo del experimento. Es decir, la variable de respuesta

por lo general son variables de salida del proceso, y recordemos que éstas son por lo general las características de calidad del producto o en las que se refleja, desde el punto de vista de ingeniería, la eficiencia del proceso. Por lo que la variable de respuesta son las variables objetivo o las variables problema.

Tratamiento: Combinación de variantes y/o niveles de cada factor que se utiliza en cada prueba experimental.

Error aleatorio. Es la suma de efectos debidos a muchas pequeñas causas, que por ser pequeñas no son identificables. Es error aleatorio el pequeño efecto que pudieran tener los factores que no se controlaron, así como la variabilidad de las mediciones hechas bajo las mismas condiciones. El error "aleatorio" absorbe todos los errores que el experimentador comete durante los experimentos, y si éstos son graves, el error deja de ser aleatorio y puede imposibilitarse el detectar cuales factores controlados tienen un efecto real sobre la respuesta.

1.3 ERRORES TIPICOS EN EL ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos trata de fenómenos que son observables y repetibles. Sin pensamiento estadístico los conceptos de observabilidad y repetibilidad son inherentemente contradictorios. Ya que cualquier cosa observada se aprecia con variabilidad; nada ocurre exactamente de la misma forma dos veces, incluso mediciones del mismo evento varían. Así que, ¿qué se quiere decir cuando la ciencia demanda que una observación sea repetible?, ¿Qué repetición es repetición?, ¿Cuándo un resultado es el mismo o difiere -confirmación o contradicción? Estas preguntas no pueden ser coherentemente contestadas sin el fundamento del pensamiento estadístico. Por ejemplo: alguien da una nueva receta de chocolate. Te dicen que no falla. Pero lo pruebas y no sale, en el segundo y en el tercer intento sí. ¿La receta está comprobada completamente? (Los chocolates tienen más de 800 ingredientes individuales que pueden ser separados).

PRIMER EJEMPLO DE ERROR

Uno de los principales errores en el análisis y diseño de experimentos es el siguiente caso: En una industria se está buscando aumentar el rendimiento de un proceso químico. Un grupo de mejora propone tres alternativas y realizan cinco pruebas experimentales con cada una, después de la experimentación se procede a calcular los promedios de rendimiento de cada alternativa y dichos resultados son graficados como se muestra en la figura 1.4.

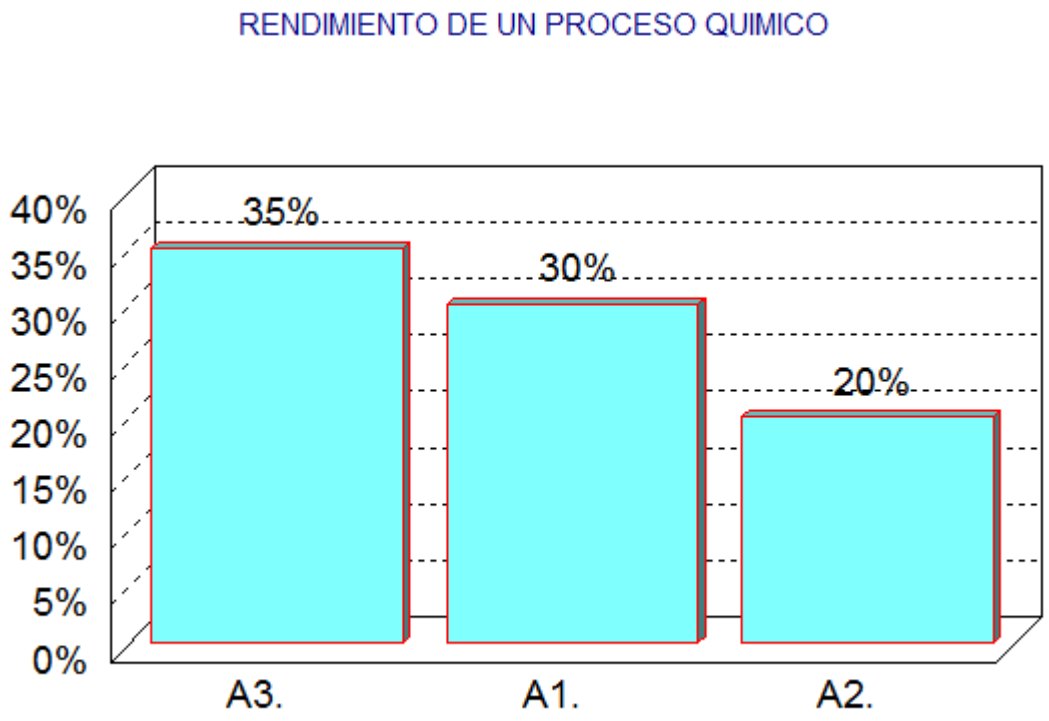

Figura 1.4. Diagrama de barras del rendimiento de un proceso químico

¿LA ALTERNATIVA TRES ES MEJOR?

Claro que no. No podemos concluir que la alternativa tres es mejor si solo estamos hablando de promedios. Para ello es necesario analizar a demás del promedio la variabilidad. De esta forma si analizamos la gráfica de la figura 1.5, observamos que la alternativa 3 presenta mayor variación, lo por lo que haberse decidido por esta alternativa hubiera sido un error.

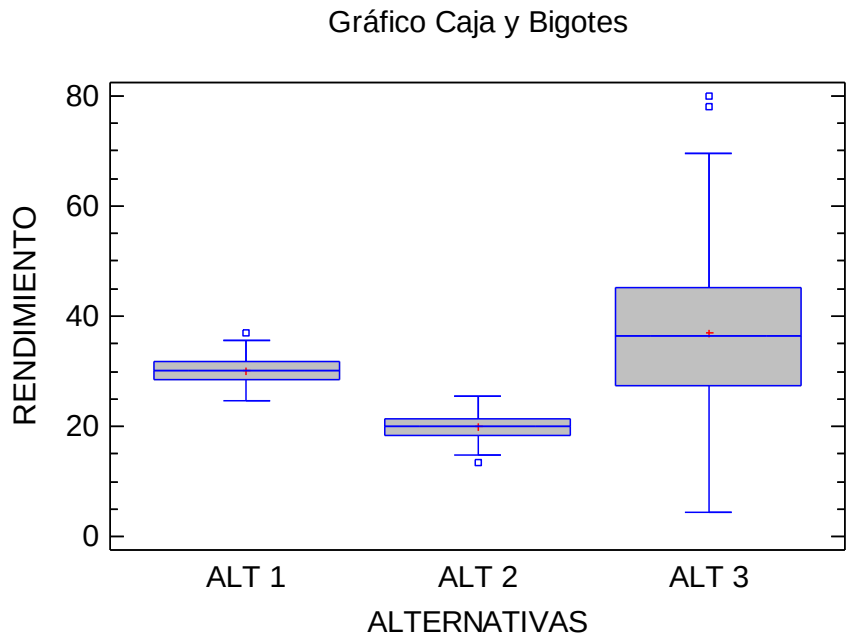

Figura 1.5. Diagrama de cajas para las alternativas

SEGUNDO EJEMPLO DE ERROR

Inadecuada experimentación. Muchas ocasiones se experimenta sin un orden metodológico, sin planeación. Analicemos el siguiente ejemplo:

Un grupo de investigadores esta trabajando para industrializar la mermelada de tuna. Para ello se realizan mermeladas considerando:

a : variedad de tuna (3)
b : con cáscara o sin cáscara (2)
c : completa o la pura pulpa (2)

Por lo que se obtienen 12 posibles formas (combinaciones) de producir mermelada (ver figura 1.6).

Las preguntas que se pueden hacer son las siguientes:

¿Influye a, b, c?

¿Cual es la mejor combinación de mermelada?

Para responder esto, se elaboraron las 12 combinaciones de mermelada de tuna, después se procedió a seleccionar personas que probaran las 12 combinaciones y calificaran su sabor.

C_1 C_2 C_3 ... C_{12}

Figura 1.6. Esquema de orden de las mermeladas

El error de este experimento consistió precisamente en dar a probar a cada persona el conjunto de las doce combinaciones de mermelada de tuna, lo que origino que las bajas calificaciones las tuvieran las últimas combinaciones. Lo recomendable hubiera sido que las personas probaran a lo más dos combinaciones.

TERCER EJEMPLO DE ERROR

El basarse en las ideas subjetivas como: "yo creo", "siempre se ha trabajado así", "creo que la solución es esta"; ocasionan que realice una sobre experimentación aumentando los recursos y sin obtener bueno resultados. Analicemos el siguiente ejemplo:

ERROR EXPERIMENTAL (SOBRE EXPERIMENTACION)

Una industria electrónica mexicana se vio afectada por un problema que se registro a lo largo de un proceso en el cual se rompían, por diversas causas, un gran número de dispositivos electrónicos (De la Vara, 1995).

En la empresa existe un departamento donde se procesan millones de microcircuitos integrados en obleas de silicio y este proceso consta de más de 200 operaciones en serie. De antemano se sabía que el número de obleas rotas es un problema con impacto económico importante, ya que se han registrado que 30 obleas de cada 1000 se rompen al llegar a la solución piranha. Se procesan 18000 obleas al mes de las cuales se rompen 540, lo que representa 17,280 dólares de pérdidas mensuales.

Por lo que se prosiguió a localizar el subproceso en el cual se presentaba este problema. Dicho subproceso se muestra en la figura 1.7.

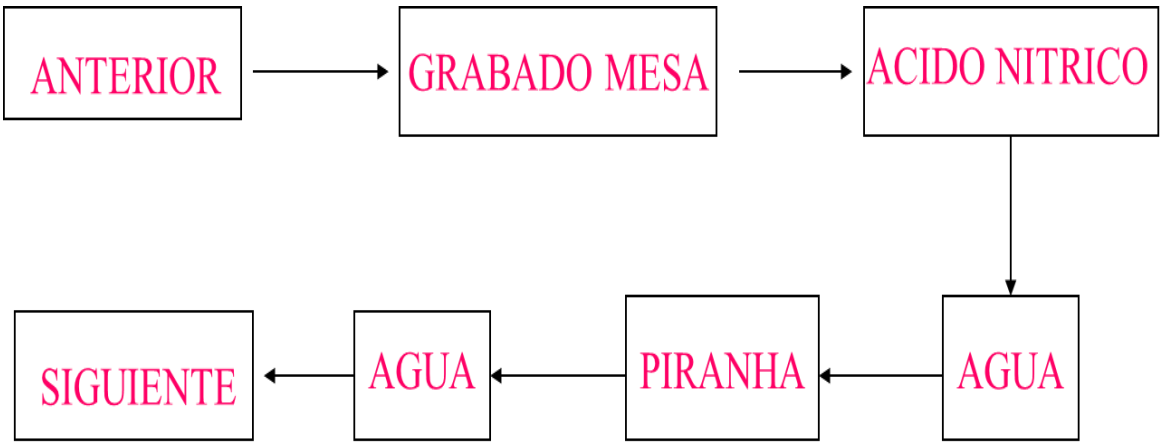

Figura 1.7. Subproceso de la elaboración de obleas de silicio

En este subproceso se analizó la solución piranha que era el lugar donde se efectuaban dichos rompimientos, por lo que se observaron los factores temperatura y tiempo que son los que controlan en esa parte del proceso, de manera que se empezaron a cambiar tanto la temperatura como el tiempo de manera intuitiva, es decir, se aumentaba la temperatura pero si no se veían resultados se procedía a bajarla un poco, si tampoco mostraban lo que ellos esperaban volvían a subir o a bajar la temperatura según creían conveniente; lo mismo hicieron con el tiempo.

Como solo experimentaban teniendo en cuenta su experiencia, las consecuencias de ello se vieron reflejadas en que la información no les proporcionaba ningún indicio de lo que ocasionaba esos rompimientos. Pues lo único que consiguieron con esta sobre experimentación fue que hubiera más gastos en el desarrollo empírico de experimentación.

Con el fin de poder llegar hasta el fondo del problema se prosiguió hacer un diseño experimental, mediante una asesoría estadística. Para ello se desarrolló un diseño factorial 2^2. Los resultados obtenidos mostraron que tanto la temperatura como el tiempo de la solución piranha no influían en el rompimiento de las obleas. De esta manera al ver que la causa principal no estaba en el proceso piranha se empezó a investigar hacia atrás, y al analizar con detalle los factores que influían en las obleas se notó que se debían a algún efecto térmico, ya que se ha observado que el

efecto térmico hace que el rompimiento de las obleas presenten el borde de la falla recto y cuando es por otras causas la falla es irregular.

Como solo se sabía que era debido a efectos térmicos se investigaron las temperaturas que intervienen en el subproceso, además de que la información indicaba que el problema no era de la solución piranha sino que venía de otra parte del proceso.

La solución del problema fue realizar un diseño experimental 2^3 Analizando tres temperaturas:

Temperatura de grabado (T1)

Temperatura de la solución piranha (T2)

Temperatura de agua (T3).

Después de realizar el experimento se encontró que la solución óptima para llevar a cabo
El proceso disminuyendo el número de obleas rotas es cuando las temperaturas para grabado, solución piranha y de agua fueron de –1, 98, y 20 grados centígrados.

Por otro lado se observo que el impacto económico disminuyo notablemente, pues antes se rompían 30 obleas de cada 1000 que se procesaban y con la nueva combinación se redujo a 15 obleas por cada 1000, lo que represento un ahorro aproximado de 8000 dólares mensuales.

1.4 DIRECTRICES PARA REALIZAR UN EXPERIMENTO y PRINCIPIOS

Diseñar un experimento es plantear y llevar a cabo una investigación de tal manera que dé respuestas válidas a preguntas previamente planteadas. Estas preguntas tienen que ver con un problema de calidad que causa importantes pérdidas a la empresa. El problema importante se puede localizar herramientas básicas.

En alguna etapa de la investigación se requiere la evidencia de los datos, y es precisamente la obtención de los datos el problema fundamental del diseño de experimentos. Para obtener los datos se debe precisar cuales tratamientos se van a probar y cuantas se van hacer en cada uno, de tal manera que se obtengan la máxima información al mínimo costo sobre el problema que se quiere

resolver. A continuación se presentan los pasos que hay que seguir para realizar un experimento, y más bajo se describen.

1. Identificación y enunciación del problema
2. Elección de los factores controlados y sus niveles
3. Elegir la variable de respuesta
4. Elección del diseño experimental
5. Realizar el experimento
6. Analizar los datos estadísticamente
7. Conclusiones y recomendaciones

Los tres primeros corresponden a la planeación previa del experimento. A continuación se hace una descripción un poco más detallada de los pasos para realizar un experimento.

1. Identificación y enunciación del problema

En este primer paso se debe hacer un esfuerzo especial por entender claramente el problema o la situación que se quiere abordar, en esa medida se estarán sentando las bases para el experimento sea exitoso. Por ello se recomienda contestar por escrito las siguientes preguntas.

* ¿Porqué es importante?

* ¿Cómo afecta la calidad y la productividad?

* ¿En qué parte del proceso se da (D. de flujo)?

* ¿Cuál es la situación actual? (En la medida de lo posible trate de medir la magnitud histórica que ha tenido el problema, haciendo un estudio de capacidad o un análisis de

Pareto, o algo que se le parezca, de tal forma que tenga una medición precisa de la situación actual)

* ¿Cómo se ha intentado resolver?

* A manera de conclusión: ¿Qué objetivo se persigue al realizar el experimento?

2. Elección de los factores controlados y sus niveles

Para seleccionar adecuadamente las variables de entrada que estudiará durante el experimento, y que cree que influyen en el problema, realice las siguientes actividades.

* En un esqueleto de un diagrama de Ishikawa del tipo 6M, hagan una lista de todas las posibles causas del problema.

* A partir del diagrama de Ishikawa, identifique las posibles causas principales.

* De entre las causas principales seleccione las que se pueden estudiar cómo factores en un experimento. De alguna forma el experimento es una forma de verificar si efectivamente estas causas son las principales.

* A partir de lo anterior haga una lista de los factores que estudiará. Se recomienda que en la etapa inicial de una investigación se consideren en el diseño experimental todos los factores que pudieran tener alguna influencia sobre la característica de calidad del producto.

* Elija los niveles para cada factor. Generalmente se utilizan 2 ó 3 niveles equiespaciados en cada factor. Es importante la separación que se elija entre un nivel y otro en un factor dado. Los niveles

muy juntos no sirven para detectar el efecto de ese factor, mientras que niveles muy separados pueden provocar un cambio drástico en la respuesta o un producto que no sirva. Se debe recurrir al conocimiento de la física del proceso, de tal forma que los niveles representen opciones de búsqueda sobre en qué nivel se debe operar el proceso. Una pregunta clave en este sentido es: ¿si se incrementa o disminuye el nivel actual se puede encontrar resultados positivos?

Si el factor no es numérico, se debe seleccionar por lo menos dos situaciones representativas de tal factor. Por ejemplo, si el factor es experiencia de la mano de obra, entonces seleccionar como niveles de tal factor a dos operadores con experiencia muy diferente. Si el factor es la influencia de una operación previa en el material, entonces los niveles pueden ser: hacer y omitir tal operación.

3. Elegir la(s) variable(s) de respuesta

Estas variables son el objetivo del experimento, son las variables de salida que se quieren corregir, sea reducir su variabilidad, centrarlas, disminuir su valor o incrementarla. Para encontrar estas variables, realice las siguientes actividades.

* Haga una lista de las variables de salida o características de calidad del producto en las que se reflejan los cambios en los factores controlados

* De la lista anterior, seleccione una o más aplicando los criterios siguientes: que se puedan medir con relativa facilidad, que reflejen mejor la calidad del producto o eficiencia del proceso, y que reflejen la magnitud del problema.

Las mediciones de estas variables seleccionadas medirán el resultado de cada prueba experimental.

4. Elección del diseño experimental

Aquí se debe elegir el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento. Es decir el conjunto de pruebas que se van a correr, y esto resulta de la cantidad de

factores y niveles seleccionados; también el costo y tiempo en que se ejecutaría la cantidad de tratamientos (combinaciones resultantes).

Por ello se debe de contestar las siguientes preguntas:

* ¿En qué va a consistir cada prueba?

* ¿Cuántas corridas se requieren para hacer una replica completa?

* Elegir diseño y decidir el número de pruebas (costo vs. necesidad) y el orden

5. Realizar el experimento

*Organizar el trabajo experimental asignando responsabilidades y precisando necesidades de tiempo, medios, etc.

*Registrar los datos en un formato adecuado

6. Analizar los datos estadísticamente

El análisis estadístico depende del diseño experimental empleado; tener presente que las conclusiones de un experimento bien diseñado se pueden sacar fácilmente aun con métodos estadísticos elementales, y por el contrario, el análisis estadístico más sofisticado no puede salvar de la basura un experimento mal planeado.

En general hay tres tipos de preguntas que deben quedar claras:

¿Qué factores y efectos influyen significativamente en la respuesta, y cuáles no?

¿Qué relación hay entre la variable de respuesta y los efectos principales?

¿Qué condiciones en proceso son las mejores?

Aquí se debe evaluar los resultados obtenidos, teniendo en mente la magnitud antes y después del experimento.

7. Conclusiones y recomendaciones

Con base al análisis estadístico se debe atender los siguientes puntos.

* ¿Qué combinación de niveles de los factores reducen el problema? Es viable

* ¿Qué combinación o solución se sugiere?

* Hacer pruebas de confirmación

* Comparar la magnitud del problema antes y después.

* Medir impacto en términos de dinero y calidad.

* ¿Qué medidas se deben tomar para generalizar los resultados experimentales? Hacer recomendaciones, plan, etc.

* ¿Cómo se puede evitar la recurrencia del mismo problema? Informar o justificar medidas preventivas, involucrando a los afectados.

* Repasar el procedimiento seguido y documentarlo

* Principales experiencias y enseñanzas obtenidas

* Planear el trabajo futuro

1.4.1 PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Además en la elección del diseño y en la realización del experimento se debe aplicar los tres principios básicos del diseño de experimentos: aleatorización, repetición y bloqueo. De la aplicación de éstos, dependerá que los datos obtenidos sean útiles (representativos) para responder a las preguntas planteadas y de esa manera obtener conclusiones validas y objetivas.

La **aleatorización** consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio y con material seleccionado también aleatoriamente. Es una manera de asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipo y todos los factores no controlados (no estudiados), se repartan homogéneamente en todos los tratamientos.

La **repetición**, se refiere a correr o probar más de una vez en un tratamiento o combinación dada. Las repeticiones permiten distinguir mejor que parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores. Repetir también aumenta la confiabilidad de las mediciones, ya que las repeticiones en el mismo tratamiento se esperan razonablemente parecidas.

El **bloqueo** permite controlar en forma adecuada a todos los factores que puedan afectar la respuesta observada. El nombre de este principio se deriva de experimentos agrícolas en los cuales se controla el efecto de parcela (bloque) al comparar varios tratamientos. Al bloquear se supone que el subconjunto de datos obtenidos sobre un nivel particular de un factor bloqueado, deben resultar más homogéneos que el conjunto total de datos. Así pues, por cada factor de ruido que se controla se dice que se está bloqueando en esa dirección. Con el principio de bloqueo, se logra una mayor precisión del experimento.

De la aplicación de éstos, dependerá que los datos obtenidos sean útiles (representativos) para responder a las preguntas planteadas y de esa manera obtener conclusiones validas y objetivas.