

01168  
6



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OPTIMIZACIÓN Y REDUCCIÓN DE VARIACIÓN EN CALIDAD  
EN LA EMPRESA, APLICANDO LOS METODOS TAGUCHI

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA  
(INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES)

P R E S E N T A :

JOSÉ LUIS BAUTISTA HERRERA

DIRECTOR: M. en I. RUBÉN TÉLLEZ SÁNCHEZ

2003/10



CIUDAD UNIVERSITARIA

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no estaría concluido sin el apoyo de muchas personas, quienes con una palabra amable, una sonrisa, un consejo y más; motivaron su realización. Sentir que 20 años no es nada es cuestión de poesía. En la vida he recibido mucho. Desde la sonrisa de un ángel pequeño en la cara de mis hijos y de mis nietos, hasta la fuerza devastadora de la tristeza al perder una parte de mi alma en mis seres queridos. Pero también he sentido el bálsamo del consuelo de mi esposa y de mis amigos. Soy la resultante de un gran esfuerzo de Instituciones y de maestros que pusieron lo mejor de si mismos para forjarme y aunque quisiera ser su orgullo, lo único que sé es que soy, soy como Dios quiso que fuera, soy yo mismo.

A todos ustedes forjadores de mi vida ¡MIL GRACIAS!

No puedo citar a todos en este trabajo por faltarme espacio, pero por pequeña que sea su acción en mi vida, sepan que van en mi corazón y en mis recuerdos.

En particular dedico este trabajo a :

*M.A.R.H. Martha R. Moreno De Dios,  
Compañera de mi vida.*

*A mis hijos: Enrique Christopher, Jennifer,  
Ángela Michelle y Luis David, a quienes les dejo  
un reto a vencer.*

*A mis nietos: Guadalupe Scarlet y Samuel Gerard  
Jesús.*

*A mis amigos sinceros.*

Para mis sinodales:

Dr. Sergio Fuentes Maya  
Dra. Idalia Flores de la Mota  
Dr. José Jesús Acosta Flores  
M. en I. Rubén Téllez Sánchez  
M. en I. José Luis Coronel Trujillo

Para mi director de Tesis :

M. en I. Rubén Téllez Sánchez, por su generoso  
humanismo y por ser con sus consejos más que  
un maestro , un amigo.

Al Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos  
y en especial a la Academia de Ingeniería  
Industrial.

A la Universidad Nacional Autónoma de México  
y en particular a la División de Estudios de  
Posgrado, Facultad de Ingeniería por ser un  
crisol forjador de maestros.

# INDICE

	Página
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	i
Problemática.....	ii
Objetivos a lograr.....	iii
Limitaciones.....	iv
Beneficios.....	v
Hipótesis de trabajo .....	v
Contenido de la Tesis.....	vi
<b>CAPITULO 1 LOS RETOS DE LA EMPRESA EN MÉXICO.</b>	
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Los Retos de la Competitividad.....	6
1.3. La Empresa en Morelos.....	10
1.4. La Norma ISO 9000 y los Métodos Taguchi.....	15
<b>CAPITULO 2 OPTIMIZACION DE PRODUCTOS Y PROCESOS.</b>	
<b>MARCO TEORICO (PRIMERA PARTE)</b>	
2.1 La variabilidad en los procesos y su impacto en la Calidad.....	21
2.2 Variabilidad funcional y Calidad.....	26
2.3 Problemas de Calidad y problemas de variedad.....	27
2.4 Factores de control y factores de ruido.....	29
2.5 Herramientas que soportan la optimización y reducción de la variabilidad.....	29
2.6 La estrategia de Genichi Taguchi.....	32
2.7 Función de pérdida y nivel de Calidad.....	36

**CAPITULO 3 ESTRATEGIA DE LA INGENIERIA DE CALIDAD ORIENTADA  
A LA MEJORA DE PRODUCTOS Y PROCESOS.  
MARCO TEORICO (SEGUNDA PARTE)**

3.1 Estrategias de prueba típicas en el diseño experimental.....	46
3.2 Mejor estrategia de prueba.....	49
3.3 Metodología propuesta para el diseño, conducción y análisis de un experimento mediante la Ingeniería de Calidad: Diseño de parámetros.....	55
3.4 El diseño de tolerancias .....	77

**CAPITULO 4 PRESENTACIÓN DE CASOS DE APLICACIÓN**

Introducción .....	88
Considerandos.....	89
Caso 1: Mejoramiento del proceso de manufactura de la cubierta extruída en termoplástico del cable de un velocímetro mecánico automotriz .....	93
Caso 2: Aplicación de la metodología Taguchi al proceso de elaboración del adoquín.....	113
Caso 3: Mejoramiento de la calidad de un soporte de brazo (codera) utilizado en sillas tipo secretarial.....	123
Caso 4: Mejoramiento de la dureza y consistencia de la película protectora del metal en el repintado automotriz.....	134
Caso 5: Aplicaciones diversas del Diseño de Tolerancias.....	150

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>169</b>
--	------------

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>173</b>
--------------------------	------------

<b>ANEXOS.....</b>	<b>176</b>
--------------------	------------

# **INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

México como país, enfrenta los llamados retos de la modernización manifiestos principalmente en procesos de globalización con tres estrategias gubernamentales que gradualmente conducen a nuestra economía a desarrollarse en un ambiente altamente competitivo.

Dichas estrategias son:

- ❖ Internacionalización de la economía
- ❖ Desarrollo tecnológico para elevar la calidad y la productividad
- ❖ Desregulación económica

En este contexto económico, las distintas empresas deberán enfrentar retos generales y específicos que amenazan su propia supervivencia.

Así, las empresas para poder mantenerse y lograr sus objetivos, han adoptado una estrategia de competencia tomando la calidad como elemento central de su quehacer, entendida ésta en el sentido de integrar en los productos, características que satisfagan a los clientes (ISO 8402,1994; Organización Internacional de Normalización), más confiables, diseñando simultáneamente procesos más económicos y concordantes con normas internacionales de aseguramiento de la calidad.

Dentro de estas acciones, se ha podido apreciar, que en el ámbito competitivo actual, la nueva aseguranza de la calidad, impulsada por las exigencias de dicha normatividad internacional, está orientada a la disminución del tiempo de ciclo y de la variación de los procesos, así como de la mejora continua de los mismos.

Más aún, las nuevas normas con vigencia a partir de Diciembre del 2000 y que modificaron a la serie ISO 9000 (versión 1994), integran elementos que anteriormente correspondían solo a la norma automotriz norteamericana QS 9000 o a la correspondiente norma alemana VDA 6.1 donde los aspectos de planeación y control avanzado de la calidad, mejora continua, entre otros, se relacionan para introducir nuevas tecnologías en los procesos que disminuyan su variabilidad.

Ahora las empresas están obligadas a demostrar que mantienen un proceso para aprovechar oportunidades de mejora continua. Los principios de gestión de la calidad contenidos en esta norma, que tienen que ver con este trabajo, son aquellos relacionados con el enfoque hacia el cliente y con la medición sistemática de la eficacia de los procesos, su control y su proceso particular de mejora continua.

Es natural que una vez interpretadas adecuadamente las necesidades de cada organización, tendrán necesariamente que trabajar en estrategias robustas de implementación para escalar los sistemas de calidad actuales a los requerimientos de esta nueva norma, aún cuando se entiende que su aplicación será un proceso gradual y no instantáneo, puesto que las empresas disponen de tres años a partir de diciembre del 2000 para adecuar su actual sistema a la nueva visión de ISO 9000.



## PROBLEMÁTICA

Hacer operativa la estrategia fundada en calidad, requiere administrar los procesos: planearlos, organizarlos y controlarlos. Requiere aprender como se hace el trabajo, puesto que los buenos resultados son consecuencia de los buenos procesos.

Los esfuerzos que las organizaciones realizan para producir productos de calidad en nuestro país no han sido suficientes en razón de diversos factores que aquejan a las industrias principalmente las micro y pequeñas (menos de 100 trabajadores), factores que se harán notar de manera específica en el capítulo 1 de este trabajo, pero cuyos efectos constatamos como consumidores al no recibir los productos o servicios esperados en nuestras compras, dudando de la efectividad del sistema de calidad de las organizaciones.

Tal situación no es exclusiva de un tipo de empresa. Todas presentan una gran variabilidad en sus procesos y sus resultados están concatenados a su sistema de calidad.

El reto masivo de todas las empresas es similar y constituye la problemática que pretende ser atendida por el contenido de esta tesis buscando que las empresas mejoren la calidad de sus procesos y por ende de sus productos mediante la reducción de la variabilidad.

Esto será posible, si en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, las actividades que se realicen para asegurar la concordancia de las características de calidad del producto en su realización con las establecidas en su diseño, se integran en un sistema.

Este debe ser un sistema integrado de control total de la calidad, en el cual todas las actividades interactúen para producir productos cuyas características tengan desviaciones mínimas respecto de los valores objetivos, que minimicen los costos de calidad y hagan el más económico uso de los recursos tanto humanos como materiales de la empresa.

Esto es más comprensible si relacionamos la calidad con la pérdida que un producto causa a la sociedad desde el momento que está disponible para ser embarcado; incluyendo todas las pérdidas tales como fallas de funcionamiento, efectos dañinos, contaminación, costos de operación y costos de mantenimiento.

En este sentido, un producto es de calidad en la medida que sus características de calidad sean concordantes con los valores objetivos específicos diseñados en el producto.

De no asegurar esta concordancia el problema se traduce a la sociedad en pérdidas :

- ❖ Por variabilidad en la función
- ❖ Por efectos colaterales dañinos.

Esta tesis tiene el propósito de estructurar un esquema con la metodología que Genichi Taguchi ha aplicado en la reducción de la variabilidad de los productos y procesos. En consecuencia, la aplicación de este esquema contribuirá en la reducción del problema y en una más alta calidad y competitividad de la empresa.

El objetivo general que se pretende lograr con este trabajo, está centrado en el desarrollo de una estructura práctica sistematizada que permita aplicar los métodos Taguchi, particularmente en la micro, pequeña y mediana empresa para reducir la variabilidad de productos y procesos y en consecuencia, optimizar su calidad.

Otros objetivos colaterales que se esperan alcanzar son los siguientes:

- Identificar la problemática de la empresa en relación a la calidad
- Estructurar un mapeo de herramientas vinculadas con el estudio y abatimiento de la variación
- Identificar los elementos clave en los métodos Taguchi y relacionarlos entre si
- Presentar aplicaciones reales que validen la estructura propuesta para los diferentes tipos de características de calidad
- Estructurar un documento con la metodología de Taguchi y con aplicaciones de la misma en México que pueda servir como consulta para estudiantes de licenciatura de Ingeniería de Calidad

## MÉTODO

Los ingenieros y científicos están más frecuentemente enfrentados a dos situaciones de desarrollo de productos o procesos. Los términos producto y proceso pueden ser usados indistintamente en lo que sigue. Una primer situación de desarrollo es encontrar el nivel de un parámetro que mejore alguna característica de desempeño a un valor óptimo o al menos aceptable.

Una segunda situación es para encontrar un menos costoso diseño alternativo, o materiales o método que proporcione un desempeño equivalente.

El primer caso será tratado en este trabajo mediante la aplicación del diseño experimental de una manera particular basada en la filosofía de Genichi Taguchi.

Los estudiosos de la estadística particularmente del diseño experimental, han desarrollado más eficientes planes de prueba, los cuales son llamados experimentos factoriales fraccionados (FFE por sus siglas en inglés).

Este tipo de experimento usa solo una porción del total de las combinaciones posibles para estimar los efectos de los factores principales y algunas, no todas, de las interacciones.

Se seleccionan ciertos tratamientos como condición para mantener la ortogonalidad entre los distintos factores y las interacciones. Es obvio que el FFE para 7 factores en dos niveles cada uno, a la octava parte con solo 16 combinaciones de prueba es mucho más atractivo para el experimentador desde el punto de vista de tiempo y costo puesto que el experimento completo que comprendería 128 corridas experimentales con sus correspondientes réplicas.

Taguchi ha desarrollado una familia de matrices FFE las cuales pueden utilizarse en varias situaciones y que se pretende utilizar en esta Tesis a situaciones específicas de la empresa mexicana.

Se tratará en lo posible seguir los lineamientos universalmente aceptados del diseño experimental. Las variantes particulares obedecerán a la metodología propia de la estrategia de Genichi Taguchi, la cual contiene los siguientes pasos:

- Selección del producto o proceso sujeto al proceso de mejora
- Selección de la característica de calidad a ser analizada
- Selección de factores y/ o interacciones a ser evaluadas.
- Selección del número de niveles para los factores
- Selección de un arreglo ortogonal (OA) apropiado.
- Asignación de factores y/o interacciones a columnas.
- Conducción de la prueba.
- Análisis de resultados mediante el ANOVA (análisis de variancia).
- Confirmación del experimento.

## LIMITACIONES

La aplicación práctica de los métodos Taguchi implica experimentación que puede resultar costosa para parámetros con más de 2 niveles y para un número de estos, combinados con posibles interacciones, superior a un arreglo ortogonal  $L_{16}$ . Lo anterior sin considerar el tiempo y la posibilidad de que la empresa pueda detener sus procesos para probar los distintos tratamientos que comprenda la experimentación necesaria.

Esto limita necesariamente la aplicación buscada y paradójicamente incrementa la posibilidad real de llevarla a cabo.

La estructura sistematizada a desarrollar, comprenderá una metodología de aplicación de los métodos Taguchi a procesos con características de calidad afectadas por no más de 15 factores controlables, incluyendo en éste número, las posibles interacciones de interés. Esto no necesariamente exige que los procesos sujetos a estudio deban corresponder a una micro o pequeña empresa. Sin embargo, se considera que es en este tipo de empresas donde no tienen personal suficiente y calificado para este tipo de experimentación.

Las características de calidad del tipo “dinámicas” no se consideran en este trabajo dado que en la bibliografía consultada su aplicación es escasa y muy específica y el esquema tratado en esta tesis pretende tener un carácter general.

Las referencias prácticas en su mayor parte, serán a organizaciones productivas establecidas en el Estado de Morelos las cuales por su propia constitución carecen de tecnología de computo y aún teniéndolo, están limitadas en la disposición del software correspondiente al diseño experimental. Por ello, se presentará el tratamiento matemático de la información de la manera más simple posible, para que ello no limite el objetivo general de este trabajo.

Se demostrará que la invasión del mercado será cada vez mayor e inevitable y el reto de las empresas a mejorar su calidad y aplicar tecnología como la que se presenta en esta Tesis, es impostergable.

Como se aprecia, queda fuera del propósito de esta Tesis profundizar en nuevas aplicaciones de los métodos Taguchi o investigaciones relativas a la metodología en si misma.

El propósito cae en un sentido estricto de la ingeniería, al centrar nuestro interés en el conocimiento y control de los procesos de una parte de las empresas establecidas en el país y aplicarle un conocimiento tecnológico, en busca de lograr un producto más económico y útil para la sociedad.

En tal sentido se enfocan diversas herramientas que se pretenden integrar al sector productivo de manera sistemática. La Ingeniería de Calidad es la que se enfatiza en ésta Tesis.

## **BENEFICIOS**

La disponibilidad y aplicación practica de una metodología de mejora que reduce la variabilidad de productos y procesos al alcance de la micro y pequeña empresa, los ejemplos de casos en los diversos tipos de características de calidad, abrirán la posibilidad de avanzar en el cumplimiento de los elementos cada vez más exigentes de las normas internacionales respecto de la mejora dentro de los sistemas de calidad. Asimismo, la documentación de esta metodología en si mismo podrá ser usada como referencia bibliográfica difundiendo el conocimiento sobre los métodos Taguchi de manera cada vez más objetiva.

## **HIPÓTESIS DE TRABAJO**

El contexto geográfico de estas proposiciones corresponde al Estado de Morelos, México.

H<sub>1</sub>: Los esfuerzos que las Micro y Pequeñas Empresas (Mi y PEs) realizan en materia de calidad es insuficiente y es resultado de una serie de problemas que las aquejan reflejándose en alta variabilidad y en su baja competitividad.

H<sub>2</sub>: En el ámbito competitivo actual, las Micro y pequeñas Empresas deberán integrar una estrategia de mejora continua de sus procesos que disminuya la variabilidad de los mismos e incremente la calidad de sus productos.

H<sub>3</sub>: La estrategia que Genichi Taguchi propone para disminuir la variabilidad y hacer procesos y productos más robustos, es aplicable en las Micro y Pequeñas Empresas con resultados favorables, aún limitando su aplicación.

H<sub>4</sub>: La ausencia de aplicaciones previas conocidas del diseño experimental en una Micro y Pequeña Empresa, abre mayores posibilidades de éxito a la aplicación de la Estrategia de Genichi Taguchi para lograr procesos o productos robustos.

Este trabajo se desarrolla como sigue: En el **capítulo 1** se presenta una síntesis de la problemática propia de la empresa en México en el marco global así como los retos que enfrenta en materia de calidad con los nuevos requisitos que la norma ISO 9000 versión 2000 integra en su contenido de manera mandataria. Se particulariza a manera de ejemplo con la variabilidad encontrada en la industria del estado de Morelos en la rama de la cerámica y con una empresa trasnacional manufacturera de llantas.

En el **capítulo 2 y 3** se establece en dos partes el marco teórico iniciando en la parte I, con la serie de pruebas comúnmente utilizadas en la experimentación, se sigue describiendo la relación existente entre variedad funcional y calidad; se hace una presentación de las herramientas que soportan la optimización y reducción de la variabilidad, derivando hacia la relación entre las distintas etapas del ciclo de vida de un producto y la estrategia de Genichi Taguchi, se presenta la función de pérdida y algunas de sus aplicaciones en la mejora de la calidad. En la Parte II, se presenta la técnica de la Ingeniería de Calidad. Se inicia con una presentación de la estrategia de prueba fundamentada en experimentos factoriales fraccionales ortogonales ejemplificando de manera simple y objetiva sus bondades, siguiendo con un esquema para realizar el diseño de parámetros acompañado de un breve resumen de cada componente y en lo posible, ejemplificándolos también. Se concluye con un esquema del diseño de Tolerancias acompañado de algunos ejemplos didácticos.

En el **capítulo 4** se presenta una serie de 5 casos de aplicaciones del esquema descrito previamente para el diseño de parámetros. Uno para cada característica de calidad diferente, incluyendo el Diseño de Tolerancias. En las características de tipo “continuas” se utiliza en el análisis la razón señal / ruido, mientras que en el caso donde se tratan “atributos” se utiliza un análisis regular. Se lista una serie de considerandos para acotar las aplicaciones al propósito práctico que se persigue con este trabajo. Se utiliza un lenguaje lo más accesible posible al personal de producción para hacer viable su aplicación independientemente de poseer o no una formación en el diseño experimental.

Al final del trabajo se incluyen dos ANEXOS en el primero de los cuales se presentan las matrices y gráficos de línea propuestas por Taguchi para la aplicación de su método, mientras que en el segundo se presenta una descripción del contenido de un programa de cómputo para el análisis experimental basado sobre los métodos Taguchi, realizado por Gil Schumacher y Bill Eureka.

## CAPITULO 1

# LOS RETOS DE LA EMPRESA EN MEXICO

# CAPITULO 1

## LOS RETOS DE LA EMPRESA EN MEXICO

### INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende establecer un marco referencial del ámbito productivo donde es posible aplicar la metodología Taguchi buscando la disminución de la variabilidad en los procesos. Para ello, en la primera sección se presenta un enfoque de empresa desde el punto de vista de los sistemas tratando de entender el proceso de cambio que ha sufrido en nuestro país en virtud tanto de las fuerzas ambientales como de la política económica gubernamental, hasta ubicarla en el ámbito globalizado donde enfrenta retos de competitividad y supervivencia. En la segunda sección se enfatiza en las dimensiones que deben ser atendidas para el éxito organizacional, centrandó la atención en la eficiencia. Se puntualiza la problemática de la micro, pequeña y mediana empresa. En la tercera sección se presentan los problemas específicos del sector manufacturero de cerámica en el Estado de Morelos así como los diferentes "Scraps" que pueden presentarse en una gran empresa fabricante de neumáticos. Se relaciona esta problemática con la Norma ISO 9000. En la cuarta sección se cita la calidad y su vínculo con la Norma ISO 9000 relacionando ambas con los métodos Taguchi.

### 1.1 ANTECEDENTES

Durante su existencia sobre la faz de la tierra, la civilización ha sufrido diversas transiciones que han llevado a la sociedad del momento a establecer nuevas formas de relaciones de la gente entre si y de la gente con la naturaleza; nuevos significados, nuevas formas de organización y nuevas formas de administración; en resumen, una nueva sociedad y una nueva economía.

Alvin Toffler (La tercera ola, 1980), le llama a este periodo "La tercera ola", la era de la información, de la electrónica, la era de los sistemas. Las sociedades tienen un medio ambiente cada vez más "turbulento" con cambios discontinuos y acelerados. Toffler la describe con el siguiente párrafo:

"Una nueva civilización está surgiendo en nuestras vidas y los hombres ciegos en todas partes están tratando de suprimirla. Esta civilización trae consigo nuevos estilos familiares; formas diferentes de trabajar, amar y vivir; una nueva economía; nuevos conflictos políticos; y más allá de todo esto, también una nueva conciencia"

Kast y Rosenzweig (Administración en las organizaciones un enfoque de sistemas y de contingencias 1988 pp 1 - 18) afirman que "la historia de la humanidad puede trazarse a través del desarrollo de sus organizaciones sociales. Durante el siglo XX se ha producido

un enorme crecimiento en el tamaño, la diversidad y la complejidad de organizaciones – empresas. . . . Con frecuencia nos asombramos ante los avances tecnológicos . . . . , pero pocas veces reconocemos un factor importante que está detrás de todos estos logros: la capacidad de crear y administrar una gran diversidad de organizaciones sociales para alcanzar nuestras metas. . . . El desarrollo de estas organizaciones y la administración efectiva de las mismas, constituye uno de los logros más importantes del hombre”.

Así pues, la empresa es una organización social. “un sistema continuo de actividades humanas diferenciadas y coordinadas que han utilizado –en su tiempo y en su espacio- , transformado y unido mentalmente, un conjunto específico de recursos humanos, materiales, capitales imaginativos y reales, dentro de un todo único capaz de resolver problemas y cuya función ha sido satisfacer necesidades humanas particulares interaccionado con otros sistemas”<sup>op. cit.</sup>

Es necesario dejar establecido un modelo conceptual de las organizaciones que sea adecuado para todos los tipos. Kast y Rosenzweig lo presentan como sigue:

1. Un subsistema inserto en su medio
2. Orientado hacia ciertas metas –individuos con un propósito; incluyendo
3. Un subsistema técnico –individuos que utilizan conocimientos, técnicas, equipo e instalaciones.
4. Un subsistema estructural –individuos que trabajan juntos en actividades integradas.
5. Un subsistema psicosocial –individuos que se interrelacionan socialmente- y que son coordinados por
6. Un subsistema administrativo –que planea y controla el esfuerzo global.

Esquemáticamente, tenemos representada a una empresa como sigue:



FIGURA 1.1 Esquema simple de una empresa.



Antes de introducimos a los aspectos internos, tan importantes para el tema de esta tesis, tratemos de entender que es lo que ha definido las condiciones ambientales del suprasistema de las organizaciones en nuestro país.

Leopoldo Solís Manjares (La realidad económica mexicana: Retrovisión y perspectivas; 3ª Edición 2000), afirma que “el proceso de industrialización de México ha sido orientado por las medidas de política económica adoptadas, en su momento, por el gobierno federal”. Así, fueron hilándose políticas tales como la de “sustitución de importaciones” otorgándose una protección a la industria cuyos resultados fueron diferentes a los esperados puesto que tendió a hacerse excesiva, indiscriminada y sumamente rígida. “De la Madrid, tuvo necesidad de reconsiderar el modelo de desarrollo a seguir. Desde ese momento, en lugar del proteccionismo, la economía se abrió al exterior, y en vez de que el gobierno fungiera como motor del crecimiento, el sector privado se convirtió en el pivote de ese crecimiento”. Se impulsó la industria maquiladora. Surge la política comercial que ha tendido a reorientar a la economía mexicana hacia el exterior mediante la formalización de acuerdos comerciales que faciliten el acceso de los productos nacionales a nuevos mercados. Así, durante los últimos años, la economía mexicana ha experimentado cambios sustanciales para modernizar el país ante los cambios estructurales que se observan en el escenario económico internacional. El Dr. Ernesto Zedillo Ponce de León durante su gestión, ha planteado una modernización del Estado, esto es, reducir su tamaño para aumentar con ello su capacidad de respuesta. Esta política se caracteriza por un manejo realista del presupuesto, la privatización de empresas paraestatales, la reforma fiscal, la desregulación económica, la reforma financiera, la liberación del comercio, la renegociación de la deuda externa y el fortalecimiento de la tenencia de la tierra que se constituyeron en los elementos centrales de un nuevo modelo económico.

Igualmente, plantean aumentar la eficiencia del aparato productivo, fomentar las exportaciones no petroleras e incrementar y diversificar los mercados para las exportaciones. Se buscó un trato equitativo para todos los importadores y exportadores nacionales por parte de los socios comerciales de México.

Hasta 1994 se mantuvo un pacto orientado a mantener la decisión estratégica de incrementar la competitividad de la economía Mexicana.

Se abandona el esquema de sustitución de importaciones, adoptando una estrategia que planteaba la necesidad de modernizar y eficientar la planta productiva nacional a fin de hacerla competitiva tanto en el interior como hacia el exterior.

En términos de eficiencia y competitividad, la apertura económica y comercial adquiere relevancia en la medida en que se convierten en pilares fundamentales del nuevo esquema de globalización que prevalece hoy en día en el mundo, por lo que de una u otra forma, cualquier país, México entre ellos, debe considerar al menos los siguientes elementos para, en lo interno, generar un ambiente lo suficientemente positivo para que las empresas puedan potenciar su competitividad:

a) La posibilidad de que una empresa pueda tener economías de escala para utilizarlas y, a través de ellas, abatir sus costos medios, distribuir sus costos fijos entre un mayor número de productos y lograr ventajas competitivas, sustanciales y sostenibles adicionales sobre la competencia en el mercado pequeño.

b) La economía de la especialización, que se traduce en la capacidad de una empresa para conocer un sector de la producción en detalle y especializarse en él, sin importar el tamaño de la industria.

c) Permitir a la empresa que elija la tecnología correcta de acuerdo con sus necesidades y las condiciones de mercado, brindándole un abanico de opciones, que, cuanto más amplio, mayor margen de competitividad le otorgará.

Para hacer posible lo anterior, el Gobierno Mexicano ha considerado las siguientes directrices sobre las cuales se busca una mayor modernización de la industria y del comercio exterior:

- La internacionalización de la industria nacional, la cual exige del empresario una nueva cultura exportadora que le permita enfrentar la competencia y responder a la dinámica internacional.
- El desarrollo tecnológico, el mejoramiento de la productividad y la promoción de la calidad total, con lo cual se pretende incrementar la capacidad de respuesta de la industria nacional a las exigencias cambiantes de los consumidores tanto nacionales como extranjeros.
- La promoción de las exportaciones, concentrando los esfuerzos en las negociaciones comerciales con el exterior.

En diversas ocasiones se ha reiterado el compromiso de nuestro país por ingresar al escenario de un mundo interdependiente, para lo cual se ha buscado ampliar el mercado a Europa y Asia. De hecho se han firmado tratados comerciales que están abriendo áreas de oportunidad comercial para la industria mexicana: Israel es quizá el más reciente de ellos.

México ha realizado significativos avances en crecimiento económico y ha demostrado poder situarse como nuevo país industrializado. Así lo demuestran las cifras en cuanto al monto de las exportaciones de productos no petroleros y también su diversificación. En 1986 se logró un total de 7 116 millones de dólares, ya para 1994 se alcanzó un total de 18 000 millones de dólares y en ambos casos correspondieron a productos manufacturados.

México y sus empresas se encuentran en un medio ambiente "turbulento" como lo llamara Peter Drucker. Esto se debe a las fuerzas ambientales de diferentes tipos que han sido llamadas "Megatendencias" como es el caso de la formación de bloques comerciales que han dado lugar a la Globalización: "varias economías interdependientes se transforman en una sola con procesos de producción y comercialización distribuidos por todo el mundo en función de ventajas comparativas y competencia a nivel mundial". CIDAC

Si bien es cierto que algunas de estas fuerzas no tienen efecto significativo en la micro y pequeña empresa, otras como la internacionalización de las empresas, el crecimiento de la comunicación, la preocupación ecológica, entre otras, adquieren significado especial que debe ser atendido si se quiere sobrevivir.

Los cambios económicos, sociales, culturales, políticos y gubernamentales; son hechos incontrolables que afectan el funcionamiento de las empresas y se refleja en la demanda de los clientes tanto para productos como para servicios. Las fuerzas ambientales afectan al tipo de producto, la estrategia de segmentación del mercado, las clases de servicios ofrecidos y las alternativas de las empresas con respecto a comprar o vender.

Para que México pueda lanzarse al mercado de exportación de productos más elaborados, se requiere entre otras cosas una planta de producción más eficiente, lo cual puede lograrse solamente mejorando la calidad de los productos manufacturados, lo cual, como W. Edwards Deming lo demostrara en su famosa cadena (Calidad, Productividad y competitividad . La salida de la crisis 1989), baja los costos de producción e incrementa la productividad de la empresa.

## **1.2 LOS RETOS DE LA COMPETITIVIDAD.**

La micro, pequeña y mediana empresa en México.

Salvador García de León, 1993; en su libro con éste título presenta datos relevantes que deben ser considerados cuando de este tipo de empresa quiera hablarse. Estos negocios constituyen el 98 % del total de empresas en el país, generando 75% del empleo formal de la industria manufacturera (excepto servicios financieros).

El desempeño de estas organizaciones se ve afectado por sus tradicionales problemas de baja competitividad, aumentando hoy en día la rivalidad doméstica y la cada vez mayor competencia extranjera.

Para sobrevivir deben centrar su esfuerzo en un incremento en el desempeño organizacional conceptualizado en cuatro dimensiones:

- Eficiencia
- Eficacia
- Satisfacción de los participantes
- Cumplimiento de la responsabilidad social de la empresa

Las 4 dimensiones son vitales para el éxito organizacional. Sin embargo por el ámbito que comprende este trabajo, se amplía el enfoque sobre la eficiencia. La evaluación de la eficiencia se realiza comúnmente a través de indicadores de productividad sobre la relación entre los productos y los insumos requeridos para lograrlos.

La eficiencia según Fabián Martínez Villegas (Planeación Estratégica Creativa. 1994), está íntimamente relacionada con la Administración operativa, la cual es la responsable de incrementar la proporción de los resultados logrados con los esfuerzos y recursos utilizados conjuntamente; busca también la combinación de los recursos al más

bajo costo, en términos de tiempo, energía y dinero; finalmente se dice que trata de incrementar la proporción de la producción real que se embarca al cliente, que le satisface a un mínimo costo; en relación al insumo contribuido en realidad.

Como se deriva del párrafo anterior, los métodos Taguchi tienen en esta necesidad de las empresas un área de oportunidad para contribuir a incrementar la eficiencia, al reducir la variabilidad de productos y procesos y por ende, aumentar la calidad de la oferta, incrementando la satisfacción del cliente sin incrementar su pérdida.

En la micro y pequeña empresa (79 % y 16 % respectivamente del total instalado en 1992), la necesidad de plantear acciones que permitan incrementar su eficiencia es de carácter vital. Esta situación es la que justifica que se realice este trabajo de forma tal que sea aplicable y contribuya en tal propósito, sin menoscabo de que esta metodología sea utilizada también en cualquier proceso sin acotar el tamaño o clasificación de la empresa interesada. Es oportuno relacionar lo presentado anteriormente con la hipótesis de trabajo  $H_1$  al detectar una gran necesidad de eficientar los procesos en las organizaciones.

Los beneficios que se logren al incrementar la productividad de las empresas sin duda beneficiaran al personal directamente relacionado con ellas. En Morelos, este personal en la industria manufacturera en 1992 se encontraba distribuido como sigue:

Estado	Micro industria (1,204)*	Industria Pequeña (192)*	Industria Mediana (35)*	Industria Grande (24)*	TOTAL (1455)*
MORELOS	4,396	7,223	5,489	20,819	37,927

TABLA 1.1 INDUSTRIA MANUFACTURERA  
Personal ocupado en el estado de Morelos 1992

Fuente: Dirección General de la Industria Mediana y Pequeña y de Desarrollo Regional de la SECOFI; con información del IMSS

\*Número de establecimientos.

## PROBLEMÁTICA.

Algunos de los elementos que inciden negativamente en los niveles de desempeño de la industria micro, pequeña y mediana, citados por Salvador García de León, quien toma como fuente tres encuestas:

1. <<Encuesta de la industria Mediana y Pequeña, 1985>>preparada por NAFINSA y SPP publicada en 1988.
2. <<La Industria Mexicana por escala Productiva 1988>> Editada por SECOFI y Japan International Cooperation Agency.
3. <<La Micro Pequeña y Mediana Empresa. Principales características>> NAFINSA; S.N.C. e INEGI divulgada en 1993

los cuales se presentan en la Figura 1.2 y se refieren a :

- Empleo de modelos gerenciales que corresponden a entornos de baja competitividad
- Falta de una sólida preparación empresarial y bajo nivel de escolaridad de los dueños de los negocios
- Bajo nivel de escolaridad y calificación de los trabajadores
- Actitudes poco favorables de empresarios y trabajadores hacia la capacitación
- Una capacitación orientada fundamentalmente hacia niveles ejecutivos y mandos intermedios
- Falta de una fuerza laboral estable
- Estilos gerenciales derivados de los rasgos culturales no acordes con los rápidos ritmos de cambio del contexto
- Poco desarrollo de la función planeación
- Limitada capacidad de autodeterminación tecnológica
- **Rezago tecnológico y carencia de maquinaria y equipo adecuados.**
- Restringido empleo de la asistencia técnica externa por parte de los empresarios
- **Uso de sistemas tradicionales de control de calidad y falta de controles de calidad**
- Limitado desarrollo de las funciones de mercadotecnia
- Restringida aplicación de la administración financiera
- Carencia de sistemas modernos de información administrativa
- Condiciones de trabajo inadecuadas
- Bajos niveles de compromiso social de los empresarios con la contaminación ambiental

FIGURA 1.2. Principales problemas que afectan a la micro, pequeña y mediana empresa.

Sin duda, un solo trabajo por muy ambicioso que sea, no podrá atender con propuestas válidas toda esta problemática. Particularmente se enfatiza a continuación, aquel rubro que puede ser atenuado con la propuesta de esta Tesis.

En forma amplia, la tecnología se define como “el conjunto organizado de conocimientos aplicados para alcanzar un objetivo determinado, generalmente el de producir y distribuir un bien o servicio” (Giral y González, 1980). Lo anterior, en términos más específicos se debe entender como el conjunto de procesos, herramientas, métodos, procedimientos y equipo que se usan para producir bienes y servicios (Schroeder, 1988).

Con base a la definición anterior, la aplicación de los métodos Taguchi se identifica perfectamente con una aplicación tecnológica orientada a la resolución de un problema que enfrenta la micro, pequeña y mediana industria y que impacta fuertemente en su productividad. En consecuencia, la aplicación busca coadyuvar, conjuntamente con otras acciones y herramientas, en la solución de parte de la problemática antes citada.

Tratando de entender, que ha pasado en este aspecto. (Salvador García de León, 1993) , se dice que los empresarios de la micro, pequeña y mediana industria (MiP y MI), no han sabido valorar, debidamente, la importancia que la autodeterminación tecnológica y la propia tecnología tienen para elevar el nivel de competitividad de sus plantas. Las razones surgen de la política proteccionista hacia la industria nacional, su cultura gerencial, falta de personal especializado, particularmente de técnicos, ingenieros y administradores; y a otros aspectos no menos importantes como puede ser el equipo obsoleto que propicia una gran variabilidad respecto de sus especificaciones y de las necesidades de mercado y que impacta en consecuencia su calidad, afectando negativamente su relación empresa-cliente.

Si bien es cierto que se ha adquirido tecnología, esta no siempre es la más moderna y apropiada. Por orden de importancia, la MiP y MI, depende tecnológicamente del exterior en el siguiente orden:

Maquinaria y Equipo  
Procesos Productivos  
Diseño de Productos  
Control de Calidad

La atención adecuada y oportuna de estos elementos en las condiciones tecnológicas que están al alcance del ingeniero, del administrador, del tomador de decisiones, darán mayores oportunidades de competitividad y rentabilidad a las empresas.

### 1.3 LA EMPRESA EN MORELOS

Basados en la información presentada previamente y debido al alcance establecido para este trabajo se presenta a manera de ejemplo, información complementaria respecto de empresas en el estado de Morelos cuya información particular indica que su problemática es similar o igual que la del resto del país. En la figura 1.3 se presenta la participación porcentual por sector. Obsérvese que la rama más grande en esta clasificación corresponde a “Regalos, muebles y artículos de decoración” con un 25.4 % del total de industrias manufactureras. Particularmente en esta rama se encuentra la industria cerámica la cual se ha estudiado logrando la siguiente información:

- CANACINTRA tiene registradas 151 empresas de este tipo.
- Se encuestaron 81 de ellas.
- 80 son microempresas (menos de 30 trabajadores; clasificación 2000)
- Solo una de ellas es pequeña empresa.

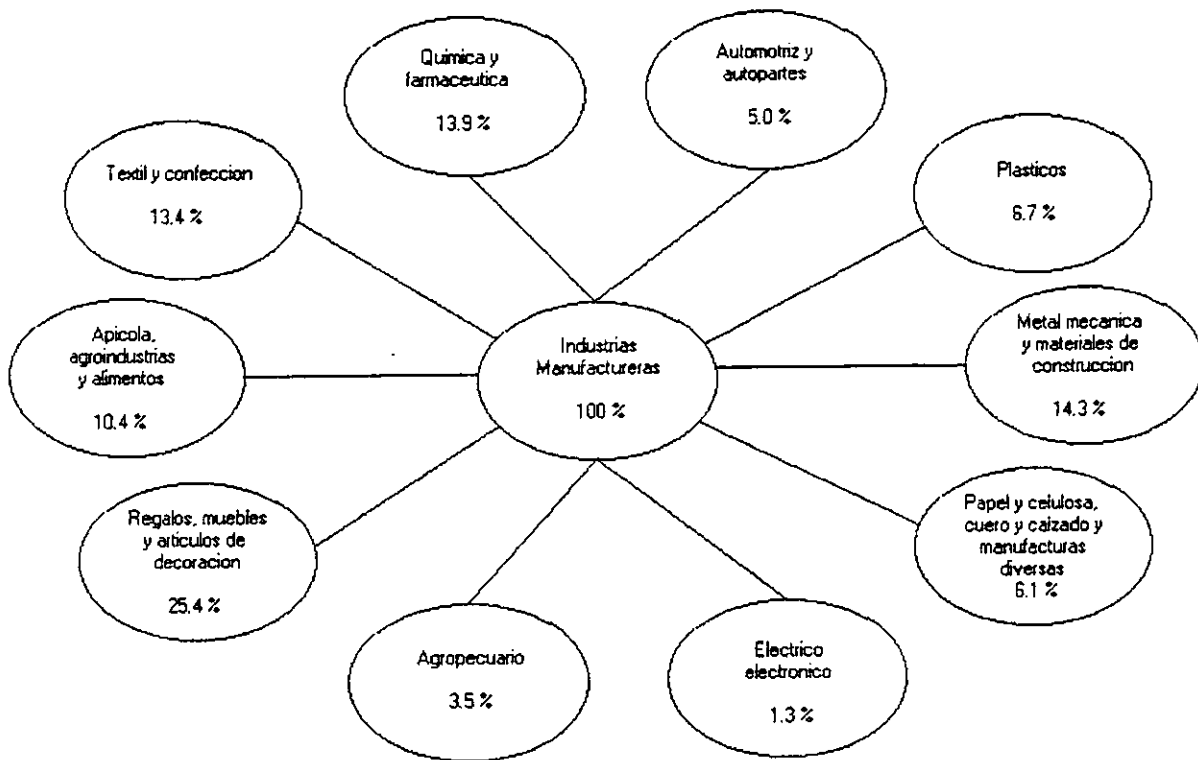


FIGURA 1.3. DISTRIBUCIÓN POR SECTOR DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA EN EL ESTADO DE MORELOS AÑO 2000.

FUENTE: CATALOGO DE EMPRESAS CANACINTRA.

La distribución del personal en la industria de la cerámica es como sigue:

No de trabajadores	No de empresas
1 a 5	21
6 a 15	53
16 a 29	13
entre 30 y 100	1

TABLA 1.2. Número de trabajadores / empresa en el estado de Morelos, en la rama de la cerámica.

Se ha promulgado el hecho de que la economía del país es impulsada por el trabajo que realiza la micro y pequeña empresa y que llegan a ser aproximadamente 95 % del total, un 3 % para la mediana (de 100 a 500 trabajadores) y solo un 2 % para la gran empresa (más de 500 trabajadores).

Se cita a continuación parte de la problemática que enfrenta una firma manufacturera de neumáticos, ubicada en el Estado de Morelos que llamaremos BF, preocupada en ofrecer a sus clientes neumáticos más seguros, confiables, resistentes, con mejor respuesta bajo condiciones de lluvia, altas velocidades, terrenos accidentados, etc; se acepta que sus neumáticos son resultado de una meticulosa investigación científica, de un continuo perfeccionamiento y de un riguroso control de calidad en su realización.

<p><b>AMPOLLAS</b></p> <p>02 EN COSTADO (ZONA 5)</p> <p>03 EN CEJA (ZONA 6)</p> <p>04 EN SELLANTE (ZONA 2, 7, 8 Y 9)</p> <p><b>SEPARACIONES</b></p> <p>06 PISO EN EL CENTRO (ZONA 1)</p> <p>06"A" PISO EN EL HOMBRO (ZONA 2)</p> <p>07 COSTADO (ZONA 3)</p> <p>07"A" COSTADO (ZONA 4)</p> <p>07"B" EN BLEEDER YARN</p> <p>08"A" CAP-PLY/ ESTABILIZADOR</p> <p>08"B" ESTABILIZADOR</p> <p>08"C" ESTABILIZADOR CUERDA</p> <p>08"D" CUERDA /CUERDA</p> <p>08"E" CUERDA RELLENO</p>	<p><b>COSTADO BLANCO</b></p> <p>23 LTA O BAJA COLOCACIÓN DE CDO.</p> <p>25"A" BLANCO EN NEGRO 7 NEGRO EN BLANCO</p> <p>28 MANCHADO</p> <p><b>CEJA DAÑADA</b></p> <p>29 LLANTA VERDE DEFORME</p> <p>29"A" FALTA DE MATERIAL</p> <p>29"B" EXCESO DE MATERIAL</p> <p>29"C" CARGADOR</p> <p><b>DESCENTRADO</b></p> <p>29"D" POR MALA OPERACIÓN</p> <p>29"E" POR BLADDER</p> <p>29"F" LLANTA MAL LUBRICADA</p> <p>29"G" OTROS</p> <p><b>CONSTRUCCIÓN</b></p> <p>30 MATERIAL EQUIVOCADO</p> <p>30"A" PAQUETE DESCENTRADO</p> <p>30"B" FALTA DE COMPONENTES</p> <p>30"C" MAL ARMADA (AL REVES)</p> <p>30"D" OTROS</p> <p>32 UNION INCORRECTA DE PISO</p> <p>32"A" UNION INCORRECTA DE COSTADO</p> <p>33 UNION ABIERTA DE SELLANTE</p> <p>34 CUERDAS SUELTAS</p> <p>34"A" CUERDAS ABIERTAS (CORTADORAS)</p> <p>34"B" CUERDAS ABIERTAS (ARMADO)</p> <p>34"C" CUERDAS VISIBLES</p> <p>35 ABRASION ARRUGADA</p>	<p><b>VULCANIZACION</b></p> <p>17 VENTANILLA</p> <p>17"A" VENTILA TAPADA</p> <p>24 BAJA VULCANIZACION</p> <p>36 SERIE DOT</p> <p>37 MOLDE SUCIO</p> <p>37"A" ANILLO SUCIO</p> <p>42 MARCA DE BLADDER</p> <p>43 BLADDER ROTO POR ESPACIADOR</p> <p>43"A" BLADDER ROTO REVERSOR</p> <p>43"B" BLADDER ROTO MATERIA EXTRAÑA</p> <p>43"C" BLADDER ROTO ENVEJECIMIENTO</p> <p>43"D" BLADDER ROTO FATIGA</p> <p>43"E" BLADDER ROTO EQUIPO</p> <p>43"F" BLADDER ROTO MALA OPERACIÓN</p> <p>43"G" BLADDER ROTO DEFECTUOSO</p> <p>43"H" OTROS</p> <p>44 BLADDER DOBLADO</p> <p>44"A" BLADDER DOBLADO INTERMITENTE</p> <p>45 MOLDE EQUIVOCADO</p> <p>45"A" VULCANIZADA AL REVES</p> <p>45"B" YO - YO</p> <p>46 MOLDE MAL AJUSTADO / REBABA</p> <p>47 DAÑADA EN POS - INFLADO</p> <p>47"A" DAÑADA POR ANILLO DE BLADDER</p> <p>47"B" LLANTA DEFORME</p> <p>47"C" PEGADA AL MOLDE</p> <p>47"D" AJUSTE U OPERACIÓN INCORRECTA</p>
<p><b>AREA DELGADA</b></p> <p>09 PISO</p> <p>10 COSTADO</p>	<p>30"OTROS</p>	<p>45"OTROS</p>
<p><b>PULIDO BUFF</b></p> <p>11 EXTERIOR</p>	<p>32"OTROS</p>	<p>45"OTROS</p>
<p><b>MATERIA EXTRAÑA EXTERNA</b></p> <p>15 HILO</p> <p>15"A" METAL</p> <p>15"B" ACEITE</p> <p>15"C" PINTURA</p> <p>15"D" DOPE</p> <p>15"E" OTROS</p>	<p>33 UNION ABIERTA DE SELLANTE</p>	<p>45"OTROS</p>
<p><b>MATERIA EXTRAÑA INTERNA</b></p> <p>16 HUMEDAD</p> <p>16"A" PAPEL</p> <p>16"B" POLIETILENO</p> <p>16"C" INSECTO</p> <p>16"D" TECATA</p> <p>16"E" OTROS</p>	<p>34"OTROS</p>	<p>45"OTROS</p>
<p><b>GRIETAS</b></p> <p>18 EN PISO (ZONA 1)</p> <p>19 EN COSTADO (ZONA 3, 4 Y 5)</p> <p>19"A" POR LUBRICACIÓN</p> <p>19"B" POR FUGA</p> <p>20 EN CEJA (ZONA 6)</p>	<p><b>INSPECCION FINAL</b></p> <p>41 SCRAP POR DESBALANCEO</p> <p>48 ALTURA DE PULIDO DE COSTADO BLANCO</p> <p>48"A" MAL PULIDO DEL COSTADO</p> <p>48 "B" DESVIRADO INCORRECTO</p>	<p>45"OTROS</p>
<p><b>DAÑOS EN TRANSPORTE</b></p> <p>21 POR BRAZOS DE DESCARGA</p> <p>21"A" RODILLOS DE TRANSPORTADOR</p>	<p>55 SCRAP POR RPP</p> <p>55"A" SCRAP POR RH1</p> <p>55"B" SCRAP POR LPP</p> <p>55"C" SCRAP POR CONICIDAD</p> <p>55"D" SCRAP POR CRRO</p> <p>59 PULIDO INCORRECTO EN TUBO</p> <p>59"A" MALA OPERACIÓN EN máquina T.U.O.</p>	<p><b>RAYOS "X"</b></p> <p>01 MATERIA EXTRAÑA</p> <p>38 CUERDAS ABIERTAS (ESTABILIZADORES)</p> <p>38"A" UNIONES ABIERTAS (ESTABILIZADORES)</p> <p>39 UNIONES ENCIMADAS (ESTABILIZADORES)</p> <p>40 CONDICION DE ORILLA DE (ESTABILIZADORES)</p> <p>56 OTROS</p>

TABLA 1.3- Clasificación de "scraps" que pueden ocurrir en el proceso de manufactura de un neumático en B.F.



No obstante, en BF se tienen diversas y variadas causas por las cuales el producto no cumple con los requerimientos de calidad y funcionalidad que debiese tener la llanta, causas que se consideran desviaciones del proceso de manufactura (de acuerdo a información estadística disponible del año 2000).

Estas desviaciones producen diversos tipos de “scrap” (desperdicio) que inciden en la eficiencia y rentabilidad de la empresa. En la tabla 1.3 y 1.4 se presenta un listado y clasificación de “scrap” que se puede encontrar en cada una de las etapas del proceso.

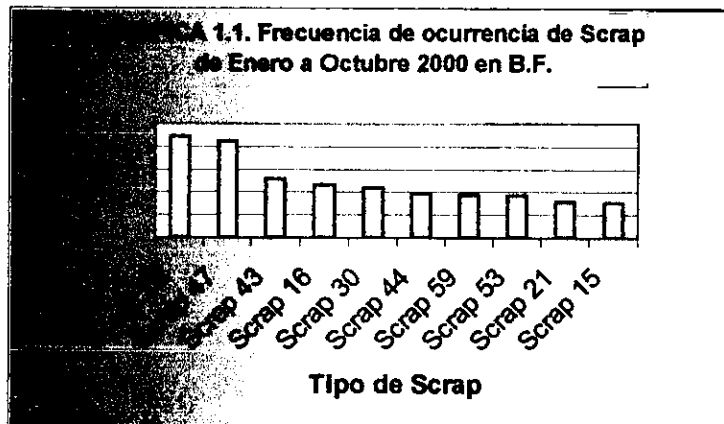
El reto aún para una empresa de clase mundial, es enorme. Esta empresa está certificada desde 1997 según las normas ISO 9001 y QS 9000 relativas a su sistema de calidad. Posee centros de investigación y desarrollo en distintos lugares alrededor del mundo: Tokio, Akron, Ohio, Roma, etc; en Cuernavaca trabajan 1200 personas y exporta a distintos países de Europa y del Continente Americano incluyendo Estados Unidos de Norteamérica.

No obstante, la presencia de *scrap* es aún un problema. La tabla 1.4 y la gráfica 1.1 presentan la frecuencia de los 10 *scrap*s con mayor número de incidencia durante el periodo Enero – Octubre del 2000.

SCRAP	29	47	43	16	30	44	59	53	21	15
Enero	635	547	320	296	230	366	164	152	98	139
febrero	531	425	241	264	173	175	147	33	71	129
Marzo	683	484	230	298	276	217	157	150	115	164
Abril	308	322	203	195	220	153	109	162	212	106
Mayo	339	392	314	204	217	128	187	403	169	141
Junio	446	543	248	221	228	183	204	305	180	134
Julio	263	238	252	122	166	98	253	231	158	174
Agosto	494	602	287	237	248	152	305	245	203	251
Septiembre	297	392	217	248	231	182	156	107	192	163
Octubre	479	312	279	248	225	287	201	70	185	151
TOTAL	4475	4257	2591	2333	2214	1961	1883	1858	1583	1552

CLASIFICACION	FRECUENCIA	PORCENTAJE ACUMULADO
SCRAP 29	4475	18.11
SCRAP 47	4257	35.34
SCRAP 43	2591	45.83
SCRAP 16	2333	55.27
SCRAP 30	2214	64.23
SCRAP 44	1961	72.17
SCRAP 59	1883	79.79
SCRAP 53	1858	87.31
SCRAP 21	1583	93.72
SCRAP 15	1552	100
TOTAL	24707	

TABLA 1.4 *Scrap* con mayor número de incidencia durante el periodo Enero – Octubre del 2000 en B.F.



El problema que presenta B.F. no es exclusivo. La mayor parte de las empresas en México enfrentan situaciones similares que les causan costos enormes y afectan su rentabilidad y aunque en BF este problema está siendo atendido con un proceso de mejoramiento continuo en la organización, que se fundamenta en una filosofía basada en calidad total y la aplicación de diversas herramientas disponibles incluyendo la Ingeniería de Calidad, es la micro y pequeña empresa la que ha estado más desprotegida en este último sexenio, con mínimos apoyos y enfrentando la apertura del mercado mexicano a la producción internacional.

Miles de empresas que presentan serias deficiencias como fue citado anteriormente, básicamente en su administración, recursos limitados, tecnología obsoleta y personal escasamente calificado, tienen procesos de producción susceptibles de ser eficientados significativamente, con diversas acciones que pueden ser desde un sistema de control de almacenes, hasta técnicas más sofisticadas fundadas en la estadística y en el diseño experimental. La información presentada de manera conjunta hacen verdadera la hipótesis de trabajo  $H_1$ .

Este pequeño estudio busca incursionar en la estructura de la empresa en Morelos y en general en nuestro país, abriendo la posibilidad de mejora de sus procesos mediante la mejora de su calidad y disminución de su variabilidad.

#### 1.4 LA NORMA ISO 9000 Y LOS METODOS TAGUCHI

Por si lo antes presentado no fuera suficiente problema para las empresas, las condiciones de los mercados globales exigen que los proveedores tengan sistemas de calidad certificados, siendo esto un despliegue que ya está en la puerta de todas las organizaciones, incluyendo las de servicios (gasolineras, hoteles, etc;) y las gubernamentales (el Gobierno del Estado de Tamaulipas como ejemplo).

Un proceso de calidad, es aquel cuyas operaciones concatenadas suministran un resultado que tiene un valor agregado y que permite que el producto se integre como un paquete de beneficios que tiene un valor específico para el adquirente y que es posicionado en su mente mediante un concepto que lo presenta y diferencia de los demás.

Dos objetivos básicos a lograr con un programa de mejoramiento de la calidad serían los siguientes:

1. Controlar todas las operaciones fabriles en esa empresa para aumentar la productividad, para disminuir sus desperdicios, su variabilidad y sus rechazos con el objeto de minimizar los costos de producción y asegurar la satisfacción del cliente.
2. Obtener un producto con determinadas características de funcionalidad, presentación, realización y aspecto para que sus clientes al transformarlo en un producto más elaborado o usarlo directamente, puedan a su vez optimizar su productividad y costo y obtener el máximo beneficio posible.

Existe una variedad muy amplia de empresas en el mundo y en México, lo cual dificulta el establecimiento de una metodología estándar para lograr el mejoramiento de la calidad. Pero en términos generales deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

1. Diseño de la planta y del producto
2. Control de la materia prima adquirida
3. **Control de los procesos de fabricación**
4. Control de los productos fabricados
5. Observación del comportamiento de los productos en el mercado y retroalimentación a la planta productiva.

Recordando el enfoque sistémico de Kast y Rosenzweig, al interiorizar en su modelo se puede comprender más fácilmente un concepto asociado a la estructura operativa de las empresas: Los procesos.

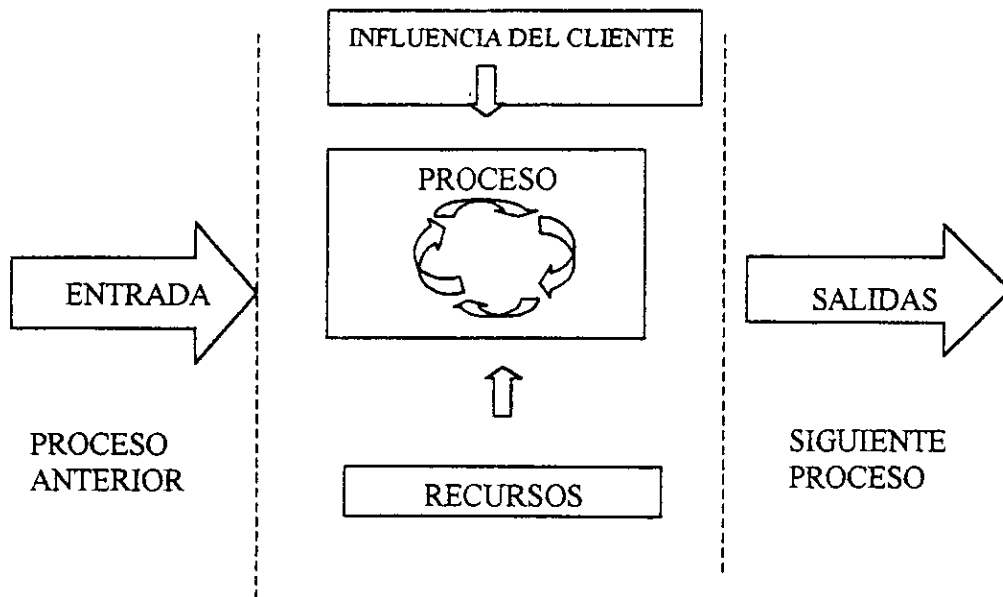


FIGURA 1.4. Principales elementos constitutivos de un proceso

Según Joseph Jablonski (TQM como implantarlo ,1996) un proceso “es una serie de operaciones concatenadas para suministrar un resultado que tiene un valor agregado”.

La empresa puede ser concebida como una cadena cliente proveedor, como una serie de micro procesos enlazados para estructurar un macro proceso.

Estos procesos han sido incorporados dentro de la nueva visión de la norma ISO 9000 que actualmente rige los sistemas de aseguramiento de la calidad en las organizaciones productivas, la cual ha sido revisada por segunda vez publicándose los cambios en diciembre de 2000, sufriendo respecto de la versión anterior (1994) cambios significativos que exigen a las empresas controlar mejor sus procesos (MANUFACTURA año 7/número 71/mayo 2001 Pág. 72). Es en esta versión donde las empresas están obligadas a demostrar que mantienen un proceso para aprovechar oportunidades de mejora continua. Se lista a continuación los principios de gestión de la calidad contenidos en esta norma, resaltando en “negritas” los puntos relevantes relacionados con el control y mejora de los procesos.

#### PRINCIPIOS DE GESTION DE LA CALIDAD Norma ISO Serie 9000:2000

1. ORGANIZACIÓN ENFOCADA AL CLIENTE
2. LIDERAZGO
3. PARTICIPACIÓN DEL PERSONAL
4. **ENFOQUE A PROCESOS.** Es la identificación y gestión sistemática de los procesos fundamentales de las organizaciones. Se incluyen: medición, análisis y mejora, realización del producto y ....., así como todas las interacciones entre dichos procesos.
5. **ENFOQUE DEL SISTEMA HACIA LA GESTION.** Este principio comprende desde la detección de las necesidades y expectativas del cliente y particularmente:
  - ❖ Determinar los procesos y las responsabilidades críticas para la consecución de los objetivos de la calidad;
  - ❖ Establecer medidas para la eficacia de cada proceso orientado a la consecución de los objetivos de la calidad;
  - ❖ Aplicar las medidas para determinar la eficacia actual de cada proceso;
  - ❖ Determinar los medios para prevenir no conformidades y eliminar sus causas;
  - ❖ Buscar oportunidades para reducir riesgos y mejorar la eficacia y eficiencia de los procesos; .....
6. **MEJORA CONTINUA.-** Se refiere a las acciones a tomar para mejorar las prestaciones y características de los productos y para incrementar la eficacia y eficiencia de los procesos utilizados para producirlos y entregarlos.
7. ENFOQUE OBJETIVO HACIA LA TOMA DE DECISIONES
8. RELACION MUTUAMENTE BENEFICIOSA CON EL PROVEEDOR.

Se dispone de diversas herramientas para lograr el control y mejora de los procesos algunas de ellas orientadas a tareas más o menos específicas como lo es la metodología Taguchi que tiene que ver con conceptos contenidos en la nueva versión de la norma ISO 9000, tales como “realización del producto”, “eficacia de los procesos”, “prevenir no conformidades y eliminar sus causas”, “mejorar la eficacia y eficiencia de los procesos”.

De manera particular, “La ISO 9001:2000 está diseñada para que las organizaciones puedan desarrollar sistemas de trabajo que les permitan tener la habilidad y consistencia para proveer productos y servicios que cumplan con otras regulaciones aplicables, además de las demandas del consumidor. De esta manera, se logra la satisfacción de los clientes a través de la efectiva aplicación del sistema de gestión de la calidad. Parte fundamental de esta filosofía se sustenta en mantener procesos de mejora y de prevención de no conformidades.”

La estructura de la norma actual es simple y está fundamentada en procesos.

El concepto de calidad que antiguamente se confundía con una simple función de inspección, se redefinió totalmente en el ámbito global, por lo que las empresas que quieren estar en primer plano en relación con la calidad y el control de la misma, tienen que desarrollar líneas de producción de alto rendimiento, con fuerza de trabajo capaz de superar y mejorar continuamente sus procesos.

En el ámbito competitivo actual, la nueva aseguranza de la calidad, impulsada por las exigencias de la normatividad internacional para sistemas de aseguramiento de la calidad, está orientada a la disminución de la variación de los procesos y a la mejora continua de los mismos.

La aplicación de los métodos Taguchi se ha realizado en empresas con gran capital intelectual y generalmente como parte de un proceso de investigación particular de la empresa en cuestión.

En nuestro país han sido las Instituciones de educación superior las que han incursionado en el estudio tanto del diseño experimental como de los métodos Taguchi .

En el sector productivo su aplicación ha sido limitada toda vez que en México el diseño de productos y procesos está muy restringido, lo que corrobora el hecho de que la mayor parte de las empresas certificadas con la norma ISO 9000, lo hacen con el modelo de aseguramiento de la calidad correspondiente a ISO 9002 que no comprende el diseño del producto.

En materia de micro y pequeña empresa (menos de 100 trabajadores, clasificación 2000), las limitaciones adquieren proporciones mayúsculas puesto que aún con la nueva clasificación, el porcentaje de este tipo de empresas alcanza el 95 % del total instalado en nuestro país.

La inversión en ciencia y tecnología dentro del porcentaje de 5% del PIB dedicado a la educación pública, no garantiza que a corto plazo se puedan atender las necesidades tecnológicas de las empresas para mejorar su calidad y su productividad.

De hecho, en materia de sistemas de calidad las empresas en nuestro país están apenas iniciando y muestra de ello es que mientras aquí existen certificadas con ISO 9000 poco más de 500 empresas, en el Reino Unido dicho certificado lo tienen cerca de 80000, manteniendo continuamente inversiones de mejora.

Aún con esta realidad, México tiene firmados tratados comerciales con Chile, Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea, Israel, entre otros establecidos y más que se están negociando. Forma parte del GATT hoy renombrado Organización Mundial de Comercio, al cual se están integrando cada vez más países, entre ellos el más reciente a la fecha por integrarse: China.

La invasión de su mercado con productos Chinos, aún con las limitaciones que nuestro país presentó para negociar, es inevitable y el reto de sus empresas a mejorar su calidad y aplicar tecnología como la que se presenta en esta Tesis, es impostergable.

La aplicación en otras partes del mundo (y en México) de los métodos Taguchi es el punto de partida para esta Tesis. Su vínculo con la realidad de la empresa mexicana en un esquema sistematizado y ejemplificado constituirá su aportación.

Es indudable que, el nuevo enfoque de las normas ISO 9000 visión 2000, deberá incidir en los sistemas de calidad de las empresas, convirtiéndose en un camino hacia un sistema de calidad total (TQM). Entre otros aspectos, se enfatiza una correcta evaluación, análisis y seguimiento del desempeño de los productos y de los procesos –incluyendo los resultados del sistema de gestión de la calidad–; en lo futuro, será de vital importancia tener un verdadero sistema de mejora continua.

La ventaja competitiva de las organizaciones, residirá fundamentalmente en el control que las empresas tengan sobre sus procesos y en los cambios benéficos, graduales, progresivos, sistemáticos y sostenibles que puedan lograr.

Esta información valida la hipótesis de trabajo H<sub>2</sub> como verdadera al exigir en este nuevo contexto global, calidad en los productos y procesos de las organizaciones, la cual deberá surgir necesariamente de un sistema de calidad regulado por las normas internacionales en la materia, las cuales incluyen necesariamente en su más reciente versión, la mejora continua como parte de la operación cotidiana de los procesos.

Idealmente, un sistema integrado de control total de la calidad es aquel en el cual todas las actividades interactúan para producir productos con desviaciones mínimas respecto de los valores objetivos, minimizan los costos de calidad y hacen el más económico uso de los recursos tanto humanos como materiales de la compañía ( Taguchi; Elsayed y Hsyang 1992).

Como se ve, Genichi Taguchi tiene un concepto muy particular de lo que es calidad. Según él “La calidad es la mínima pérdida que un producto (o proceso) causa a la sociedad a partir del momento en que es embarcado”. Se centra la atención en pérdidas por variación funcional y pérdida debidas a efectos colaterales dañinos. Se excluyen las pérdidas ocasionadas por la propia función que debe cumplir el producto.

Esta tesis pretende contribuir dentro del contexto amplio de un sistema de calidad total, al control de calidad fuera de línea, aunque mayormente se enfoca en la correspondiente tarea en línea, atendiendo las desviaciones respecto de los valores objetivo sea del producto o del proceso, buscando atenuar la problemática derivada de la inadecuada selección de maquinaria y equipo, así como de su deficiente uso, centrando la atención en disminuir la variabilidad de los procesos mediante su rediseño.

Se orienta a la creación de un esquema de aplicación práctica de la metodología Taguchi a efecto de poder acercarla a empresas que no poseen en su infraestructura humana, personal capacitado en el diseño experimental y menos aún en los métodos del diseño de parámetros.

La estrategia a seguir considera los siguientes pasos:

1. EL CLIENTE COMPRARÁ UN PRODUCTO QUE SEA:
  - ❖ Deseable poseer y satisfaga un propósito
  - ❖ Funcional y robusto contra el medio ambiente
  - ❖ Mejor que los productos competitivos, por sus características, estilo y por los costos de compra y posesión.
  
2. LOS OBJETIVOS DEL CLIENTE EXTERNO SON ALCANZADOS A TRAVÉS DE:
  - ❖ Optimizar el diseño de productos y procesos para mejorar calidad y reducir costos
  - ❖ Usar la función de pérdida de calidad para cuantificar mejoras en calidad en términos de costo y para uso de tolerancias de diseño
  - ❖ El despliegue de la función de calidad -“la voz del consumidor”- desplegada a través de los clientes internos en las fases de planeación, diseño de productos, diseño de procesos, producción, ventas y servicios.
  
3. PASOS:
  - ❖ Desarrollo del sistema
  - ❖ Diseño de parámetros
  - ❖ Diseño de tolerancias
  
4. METODOS:
  - ❖ Arreglos ortogonales
  - ❖ Gráficas lineales
  - ❖ Función de pérdida de calidad

## 5. CONCEPTOS:

- ❖ El resultado del análisis no necesita ser el óptimo (validez estadística a nivel óptimo) pero si se requiere que sea mejor y rápido (50% de resultados en 10 días es más rentable que 90% de resultados en 200 días).
- ❖ Mejoras incrementales pequeñas sobre un gran número de productos y procesos tiene efectos acumulativos superiores que grandes mejoras sobre problemas conocidos.

El capítulo siguiente, se inicia con la presentación de los métodos más comúnmente utilizados en la optimización de productos y procesos en relación a su variabilidad, para posteriormente detallar los pasos específicos de la estrategia de Genichi Taguchi.



**CAPITULO 2**

**OPTIMIZACION DE PRODUCTOS Y  
PROCESOS**

**MARCO TEORICO**  
PRIMERA PARTE

## CAPITULO 2

### OPTIMIZACION DE PRODUCTOS Y PROCESOS

El énfasis sobre productos de “calidad superior” a bajo costo, combinado con la competencia extranjera en los mercados internacionales, ha magnificado la importancia del control de calidad. Consecuentemente, las actividades de control de calidad han sido redefinidas para asegurar la calidad del producto durante cada fase de su ciclo de vida.

En este capítulo, en las secciones 2.1 a 2.5 se pretende relacionar los conceptos de variabilidad con calidad, justificando el enfoque de Taguchi en relación a estos conceptos. Se definen sus factores causales y se presentan algunas de las herramientas que soportan la optimización y reducción de la variabilidad enfatizando los métodos Taguchi. En la sección 2.6 se presenta de manera específica la estrategia de Taguchi explicando con ejemplos en diversas etapas del ciclo de vida del producto en que consiste cada parte: Diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias. Finalmente, en la sección 2.7 se presenta la función de pérdida y su relación con el nivel de calidad de un proceso y /o producto. Se anexan ejemplos de aplicación en este sentido.

#### 2.1 LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD

Sabemos que previo a la segunda guerra mundial, la calidad de los productos japoneses era muy pobre. Los precios eran bajos y era difícil, sino imposible, el asegurar que una venta se repitiera. Una simple comparación entre la calidad de los productos hechos en los Estados Unidos y Japón en ese tiempo puede ilustrarse por el siguiente ejemplo: Suponga que un producto hecho en Japón, valía la mitad de un producto similar hecho en Estados Unidos. Si las pérdidas causadas a un consumidor al usar el producto japonés fuera 9 veces su precio de compra, mientras que el producto hecho en Estados Unidos solo le causara una pérdida igual a su propio precio, entonces la pérdida total para el consumidor por el producto japonés debe ser 2.5 veces la pérdida causada por el producto norteamericano. Esto debe sugerir que el producto hecho en Estados Unidos fue 2.5 veces superior en calidad al producto japonés, de acuerdo con los siguientes cálculos:

	Producto norteamericano	Producto japonés
Precio de compra	$p$	$0.5 p$
Pérdida debido al uso del producto	$p$	$9(0.5p)$
Costo total al consumidor	$2 p$	$5 p$

Distinguir entre calidad y precio es pues, una tarea importante.

Se escucha a ejecutivos decir “ la calidad de nuestros productos es excelente, pero el precio es demasiado alto”. Como se indicó al principio, debe existir un balance entre pérdidas por calidad y precio del producto. El precio representa la pérdida del consumidor en el momento de la compra y la calidad pobre representa una pérdida adicional para el consumidor durante el uso del producto. **Una meta de la Ingeniería de calidad debe ser reducir la pérdida total al consumidor.**

Continuando con el análisis entre precio y calidad, se necesita predecir las pérdidas de calidad en las fases de diseño del producto, diseño de proceso y producción. El precio de un producto se define en base generalmente al costo de producción. Por consiguiente, el costo de producción es un factor muy importante para el análisis correspondiente entre calidad y precio. En términos de pérdida de calidad se hace necesaria una predicción monetaria. Muchas compañías mantienen en uso un porcentaje defectuoso como medida del nivel de calidad. Los productos defectuosos sin embargo usualmente no son embarcados. Solo los productos que se embarcan causan problemas de calidad a los consumidores. Por esta razón, las pérdidas por productos defectuosos no embarcados, deben considerarse como un costo y no como una pérdida de calidad.

En lo sucesivo, pérdida de calidad se define como *“ la pérdida que un producto causa a la sociedad desde el momento en que está disponible para ser embarcado. Se incluyen todas las pérdidas tales como fallas de funcionamiento, efectos dañinos, contaminación, costos de operación y costos de mantenimiento”*. Genichi Taguchi

En este sentido, un producto es de calidad en la medida que sus características de calidad sean concordantes con los valores objetivos específicos diseñados en el producto.

Es importante notar las actividades que son necesarias considerar en todo lo ancho de la compañía para mejorar la calidad y la productividad. Estas actividades surgen del ciclo de vida de un producto y son:

1. **Planeación del producto:** Incluye estimación de la demanda para una función dada a un precio dado determinado en base a su vida útil.
2. **Diseño del producto:** Diseñar el producto para que tenga las funciones decididas en el estado de planeación.
3. **Diseño del proceso de producción**
4. **Producción**
5. **Marketing :** Incluye informar al mercado de la existencia del nuevo producto.
6. **Ventas**
7. **Servicio post venta**

Para lograr la satisfacción total del cliente se requiere un **sistema de control total de calidad**. Un Sistema que comprenda el concepto de calidad y costo de calidad a través de todas las fases del ciclo de vida del producto señaladas anteriormente.

*¿Qué constituye un sistema de control total de la calidad? ¿Cómo afecta la calidad de los productos resultantes del proceso?*

Desde el punto de vista de valor recibido, la calidad del producto está determinada por las pérdidas económicas impuestas a la sociedad desde el momento que el producto esta disponible para ser embarcado. Un ejemplo típico es la pérdida causada por variación funcional: es decir, la desviación de una de las características funcionales principales respecto del “valor objetivo” (nominal), especificado en el diseño del producto. Si el diseño del proceso y la ingeniería del control de la calidad no son capaces de reducir suficientemente la desviación mediante el ajuste del proceso, entonces la inspección puede ser una alternativa económicamente viable. Entender las fuentes de variación de productos y procesos , medir esta variabilidad y tomar acciones que puedan reducirla, es vital para la mejora de la calidad y el incremento de la competitividad de una organización.

Todas las cosas tienden a variar. La calidad de un café de taza a taza, el tiempo de entrega del correo de letra a letra, el volumen de llenado de refrescos, la tasa de flujo entre bombas, el espesor de una película de plástico, etc. La naturaleza misma nos muestra día a día esa variación. Las empresas resienten esa variación en sus procesos, pues determina de una manera directa productos defectuosos que deben ser reprocesados o que definitivamente se convierten en "scrap" (desperdicio).

En la siguiente figura 2.1 se distingue variación. Sin embargo en la A) ésta no es excesiva y los productos caen dentro de las especificaciones, mientras que en B) y C) al rebasar los límites, el proceso arroja un determinado porcentaje de defectuosos.

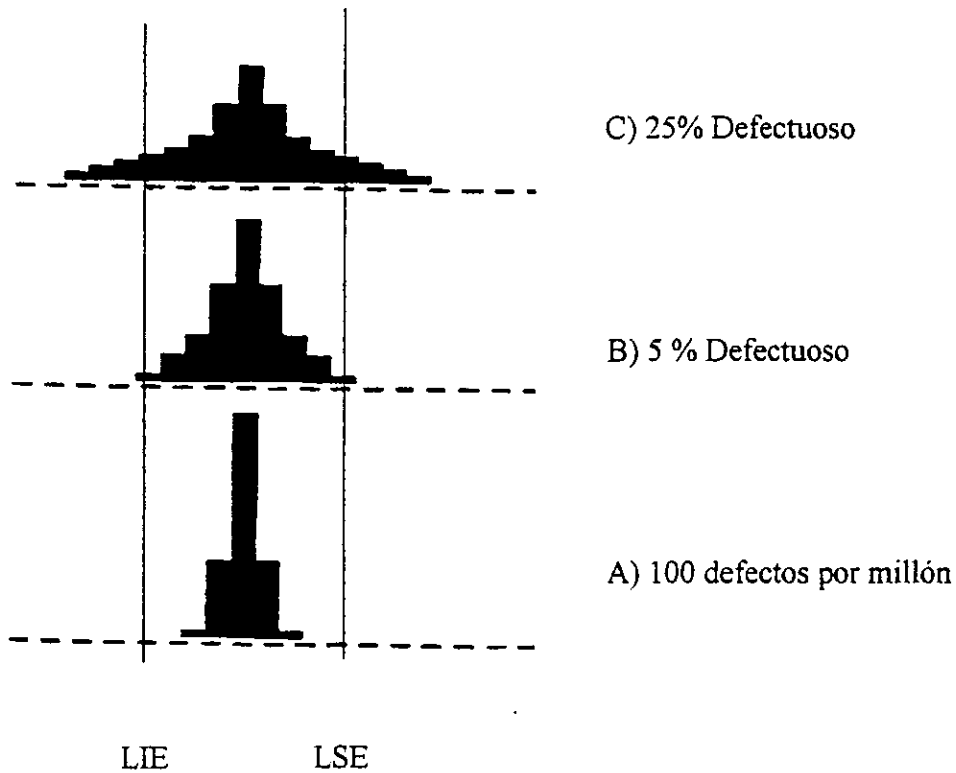


FIGURA 2.1 . Diferente variabilidad en los procesos

La variación puede enfocarse observando las diferencias en las salidas de los procesos. Específicamente en los productos. Estas diferencias pueden ser dentro de una unidad. Por ejemplo, en una bolsa de plástico que ha sido sellada, puede observarse diferencia entre la resistencia de sellado del lado izquierdo, respecto del lado derecho (figura 2.2).

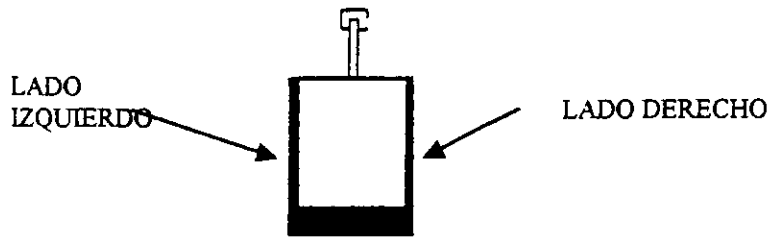


FIGURA 2.2 Diferencias en una unidad (bolsa de plástico)

Las diferencias también pueden observarse entre dos o más unidades (figura 2.3), entre flujo de unidades (figura 2.4), o dentro de una misma línea en periodos diferentes de tiempo (figura 2.5).

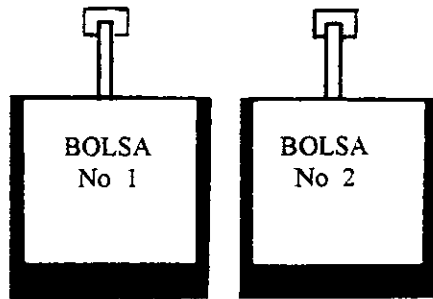
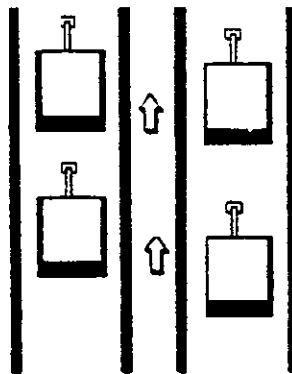


FIGURA 2.3 Diferencias entre dos unidades



LINEA 1 LINEA 2

FIGURA 2.4 Diferencias entre diferentes líneas.

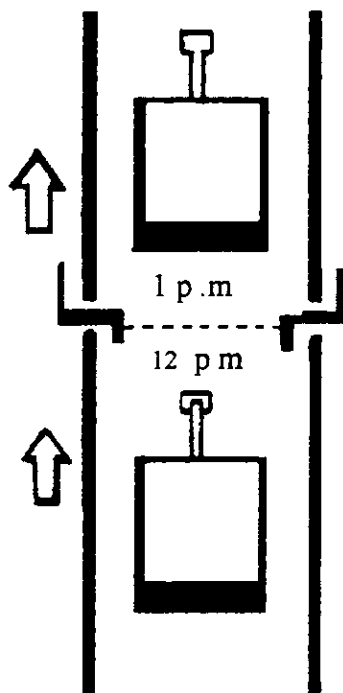


FIGURA 2.5. Diferencias entre periodos de tiempo

La ingeniería de diseño del producto puede en si misma operar como un factor primario en pérdidas principales, incluyendo tolerancias que se traduzcan en ensambles inadecuados o procesos de producción especiales que son innecesarios. Ejemplos similares pueden encontrarse en otras fases del ciclo de vida del producto, tales como desarrollo del mercado, empaque o mantenimiento.

Cuando se está en el proceso de producción, la necesidad inmediata es satisfacer los objetivos de diseño, de funcionalidad, de duración, entre otros; que se ven afectados por la variación.

**La clave para mejorar sustancialmente productos y procesos es entonces a través de la reducción de la variación.**

Entonces, se debe buscar diseñar e implantar idealmente *un sistema integrado de control total de la calidad, en el cual todas las actividades interactúen para producir productos con desviaciones mínimas respecto de los valores objetivos, minimicen los costos de calidad y hagan el más económico uso de los recursos tanto humanos como materiales de la compañía.* Este sistema que permite alcanzar producción controlada de productos con calidad superior, puede llamarse **un sistema de calidad total.**

Como se discutió al principio, pérdida de calidad en términos amplios, lo define Taguchi como *“la pérdida impuesta a la sociedad desde el momento en que el producto está disponible para ser embarcado”*. Más adelante se enfatizará sobre las pérdidas causadas por desviación en las características funcionales de un producto respecto de su valor nominal especificado (valor objetivo deseado).

## 2.2 VARIABILIDAD FUNCIONAL Y CALIDAD

Se ha hecho énfasis en el costo que se traslada a la sociedad por la variabilidad que presentan los diferentes productos y/o procesos. Las fuentes naturales de energía presentan una gran variabilidad, por ello, casas que utilizan generadores de energía eléctrica impulsados por el viento tienen que afrontar el hecho de que aproximadamente el 15 % de los días del año estén parados por faltar la fuente de energía natural. El mismo problema ocurre con mayor o menor grado en productos y servicios proporcionados por el hombre. Máquinas que se descomponen, fallas de energía eléctrica, trenes que llegan tarde, techos que “gotean”, etc. Las especificaciones son puestas para prevenir muchos de estos problemas. Aunque nuestro enfoque se centra en la variabilidad de los productos, las mismas consideraciones pueden aplicarse a la variabilidad de los servicios.

Basados en las explicaciones anteriores, se llega a establecer por Taguchi, que *calidad, es la pérdida que un producto causa a la sociedad después de haber sido embarcado, con excepción de aquellas pérdidas causadas por sus funciones intrínsecas*. Esto “choca” con el pensamiento de aquellas personas que ven la calidad como *valor*, aunque este es un concepto muy subjetivo y depende del punto de vista de cada persona. *En economía elemental valor se define como utilidad marginal*. Así los economistas han sido cuestionados de porqué el agua, la cual es esencial para la vida humana debe ser barata mientras que los diamantes, que no lo son, deben ser caros. La demanda para un artículo a un precio dado, es el número de gente que piensa que su valor es igual o mayor que el precio. Si el precio disminuye a la mitad, el número de compradores se incrementará, por el contrario, es sabido que recortando la producción de “crudo” los países exportadores de petróleo es como logran aumentar el precio.

Determinar esta calidad subjetiva de valor es un problema de *marketing* y de *planeación del producto* de vital importancia para una compañía, pero no es un problema de ingeniería. **Es un problema de clasificación humana**, de segmentación de mercado. Por ello Taguchi se opone a tratar la calidad como una cuestión de valor.

Otro problema es el concepto de pérdida. En este contexto de la calidad, pérdida debe restringirse a dos categorías:

- 1.- Pérdida causada por variabilidad de la función.
- 2.- Pérdida causada por efectos colaterales dañinos.

Ejemplos de efectos colaterales dañinos son la vibración y ruido de los motores; el daño causado por las emisiones de rayos alfa, beta gamma, de equipos de televisión; la “cruda” causada por bebidas alcohólicas, etc.

Un artículo realizado con buena calidad es aquel que no presenta variabilidad en sus funciones y que tampoco causa efectos colaterales incluyendo el costo de usarlo. Si el **control de costos** está relacionado con la reducción de las distintas pérdidas que pueden ocurrir antes de que el producto sea embarcado, el **control de calidad** se relaciona con la reducción de los dos tipos de pérdidas que pueden causarse a la sociedad después de que ha sido embarcado.

El control de calidad no está relacionado con la reducción de las pérdidas que el producto pueda infligir a la sociedad a través de sus funciones intrínsecas. Por ejemplo, además del aroma y gusto, el licor tiene la función de intoxicar. Es incontable el número de gente que ha sufrido pérdidas por accidentes ocurridos bajo la influencia del licor. La intoxicación sin embargo es una función del mismo y no tendría sentido fabricar licor que no intoxicara solo por las pérdidas citadas anteriormente. Si lo hiciéramos, el producto resultante no sería licor. La cuestión de qué funciones debe permitir la sociedad deben tener los productos, es un problema cultural y legal y no un problema de ingeniería. Países civilizados permiten el uso de productos con efectos dañinos colaterales y dejan que su gente satisfaga su curiosidad usándolos. La pornografía y el tabaco, entre otros.

**Si nosotros centramos nuestra atención en cuestiones de utilidad y valor, estaremos fuera del campo de la ingeniería y dentro de la esfera de valores culturales.** Los ingenieros son libres de debatir estas cuestiones como individuos, pero deben reconocer que están tratando con cuestiones sociales y fuera del enfoque del control de la calidad.

Muchos niños ven tanta televisión que puede llegar a ser en verdad dañina para su aprovechamiento escolar. El control de calidad demanda que la programación sea tan atractiva como sea posible y que los equipos de TV fallen lo menos posible. La cuestión de permitir la TV es de naturaleza cultural y verla o no es una decisión individual.

### **2.3 PROBLEMAS DE CALIDAD Y PROBLEMAS DE VARIEDAD**

Suponga que el producto es una camisa de hombre. Además de diferentes modelos y colores, este producto (al menos en Japón) se presenta en cerca de 100 tamaños diferentes. También en México, cuando compramos una camisa consideramos, color, modelo, material, tamaño y precio. Las preferencias sobre modelo y color son cuestiones subjetivas. Hay quién las prefiere azules y otros rosas. Modelos casuales o formales. Como fabricantes debemos saber qué colores y modelos se venden bien. Pero el hecho que una camisa azul se venda más que una rosa no significa que sea de mejor calidad. Es cuestión de gusto. Los segmentos de mercado son diferentes.

También existen modas en colores y modelos. **La moda es un fenómeno que causa cambios en los valores subjetivos aunque no existan cambios que correspondan a un valor real.** La altura de las faldas de las jóvenes sube y baja según la moda y se repiten cíclicamente. Por otro lado si observamos el cambio en los componentes electrónicos pasamos del tubo de vacío (bulbo) al transistor y entonces a los circuitos integrados. **Cambio que no obedeció a modas sino a un verdadero valor agregado** en los nuevos componentes, ya que cada uno proporciona al menos la misma utilidad pero con menor pérdida al consumidor (pocas fallas, menor calor disipado, mayor eficiencia, menor espacio, mayor vida útil, menor rango de variación, etc.)

Color, modelo y otras propiedades valuadas subjetivamente sirven para clasificar productos dentro de variedades.



Un producto será de buena calidad si causa pocas pérdidas a la sociedad. No importa cuanto guste un modelo o color de una camisa. Poca gente la comprará si se ensucia fácilmente, encoge, acumula electricidad electrostática o causa irritación en la piel. La utilidad incluye apariencia externa y función lo que determina la variedad de producto que está siendo vendido. Al principio las ventas son determinadas por la variedad y precio. Una camisa debe ser lavada y planchada. Si en una tintorería cuesta \$15 pesos este servicio y si la vida útil de la camisa permite hacerlo hasta 80 veces, entonces el costo de mantenerla llega a alcanzar \$1200. Si una nueva camisa se manufactura de tal manera que se "arrugue" y ensucie de modo tal que solo deba enviarse a la tintorería la mitad de las veces, entonces el consumidor puede ahorrarse \$600. Si el costo extra de hacer la nueva camisa es de \$40, y el nuevo precio es \$100 más alto que el original, entonces el fabricante puede ganar \$60 mientras que el consumidor ganará \$500. Estos no son los únicos beneficios, al reducir a la mitad las lavadas, la cantidad de agua sucia, jabón y ruido producido por las máquinas también se reducirán.

Considere ahora la siguiente cuestión: ¿el tamaño de una camisa está relacionado con la calidad o la variedad?. Las camisas (en Japón) están manufacturadas hasta en 100 tamaños. Los cuellos varían con intervalos de 1 cm y la longitud de la manga cada 2 cm. El tamaño de los intervalos es un problema de normalización. Si una persona no encuentra una camisa en su tamaño exacto es un problema de calidad. Al incrementarse el número de tamaños, el fabricante debe subdividir su mercado en segmentos más pequeños causando con ello una serie de problemas posteriores, puesto que tamaños demasiado grandes o demasiado pequeños no se venden mucho. En suma, **el problema de variedad es proporcionar una amplia selección de colores, modelos y tamaños para satisfacer las necesidades de la gente.**

Decidir cuanta demanda existirá para esos colores y modelos y tamaños a un precio dado es un problema de **planeación del producto**. Decidir como segmentar el mercado diseñando y poniendo precio a las variedades son problemas que involucran a todos los departamentos: **planeación, ventas y diseño**. Un cliente no podrá reclamar al fabricante con base en los modelos, colores y tamaño, puesto que los conoce cuando compra el artículo. Pero si al lavarla se decolora, cae un botón, no coincide la medida real con la especificada, entonces procederá la reclamación y quizá hasta una demanda.

Japón importa café, piedras preciosas y prendas de vestir típicas de Colombia. A una gran cantidad de japoneses les gustan esas prendas. Sin embargo, en su afán de vender más, los colombianos cambiaron sus colores y estilos originales por algo que imitaba lo japonés, no pudiendo mantener la calidad a la que éstos están acostumbrados. Al decolorarse las prendas se presentaron quejas al importador y de ahí a los fabricantes. Cuando se inició la corrección de las fallas ya era demasiado tarde: se había perdido el mercado.

Eso indica que las especificaciones dentro de las variedades no deben cambiar puesto que ello significa un cambio en sus funciones. En tal caso está la decoloración, el encogimiento, la costura, los botones, etc. Estas son fallas funcionales y por consiguiente acusan fallas de calidad. Cuando el consumidor considera que la calidad del producto es inferior a sus expectativas, dejará de comprarlo, y todos los esfuerzos y gastos de desarrollo del producto hasta su producción y comercialización irán a parar a la basura. Muchos problemas de calidad se presentan después de usar el producto. Para impedir el engaño a la gente, una compañía debe desarrollar y producir artículos que sean completamente competitivos en calidad.

El diseño de la calidad en la etapa de *diseño del producto* es particularmente importante, porque aunque la variabilidad puede reducirse en la etapa de *producción*, la deterioración del producto o su inadecuabilidad para el medio ambiente no. Todos estos problemas de calidad pueden ser tratados durante el *diseño de proceso* o en nuestro caso en su *rediseño*.

## 2.4 FACTORES DE CONTROL Y FACTORES DE RUIDO

Los dos tipos de factores indeseables e incontrolables que pueden causar desviación respecto del valor objetivo en una característica funcional de un producto son conocidos como factores de ruido externos e internos. Variables de operación ambiental (tales como temperatura y humedad), son ejemplos de factores de ruido externos. Existen dos categorías de factores de ruido interno. Ellas son :

- Deterioración, tales como el desgaste de partes causadas por fricción y la pérdida de elasticidad de un resorte.
- Imperfecciones del proceso de producción, tales como variaciones en el llenado de envases.

El propósito amplio del sistema de calidad total es producir artículos que sean robustos con respecto a todos los factores de ruido. *Robustez* implica que las características funcionales de los productos no son sensibles a variaciones causadas por factores de ruido.

Así es que para lograr robustez, los esfuerzos del control de calidad deben iniciar en la fase de diseño y continuar a través de las fases de ingeniería, de producción y las operaciones propias de la manufactura.

## 2.5 HERRAMIENTAS QUE SOPORTAN LA OPTIMIZACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD.

Se ha podido apreciar que en el ámbito competitivo actual, el nuevo aseguramiento de la calidad, es impulsado por las exigencias de la normatividad internacional y está orientado a la disminución del tiempo de ciclo y de la variación de los procesos, así como de la mejora continua de los mismos.

La figura 2.6 ilustra la idea central de optimizar, reduciendo al mínimo la variación.

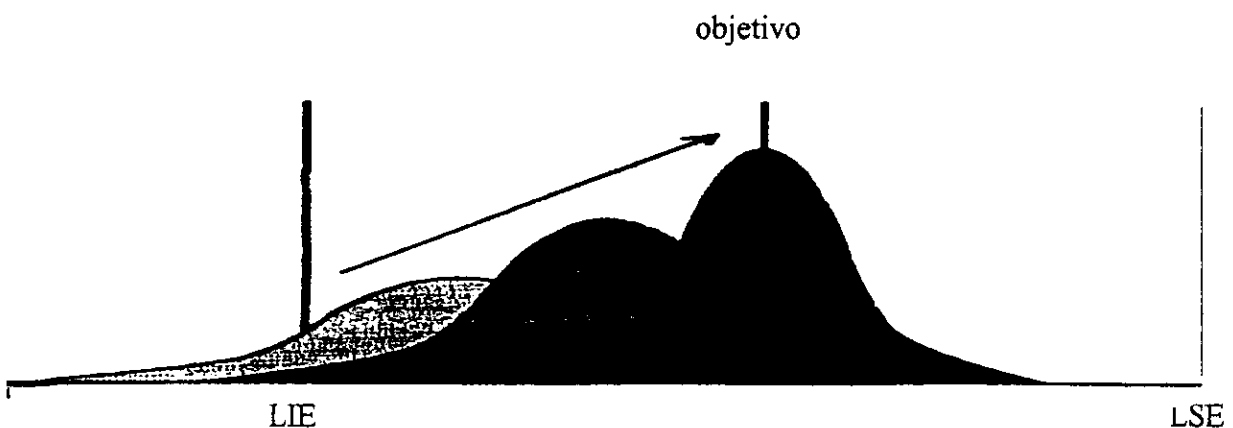


FIGURA 2.6. Optimización y reducción de la variación  
-para una característica de calidad "mejor nominal".

Los problemas pueden diferir si la característica es del tipo “mayor es mejor” o “menor es mejor”.

En los procesos, centro de interés en este trabajo, es en las salidas sobre las cuales se desea realizar la optimización y reducción de la variación, lo cual se alcanza si se logra poner los valores objetivos y sus tolerancias apropiadamente en las entradas.

Un proceso inestable, como se ilustra en la figura 2.7, incrementa sustancialmente la variación .

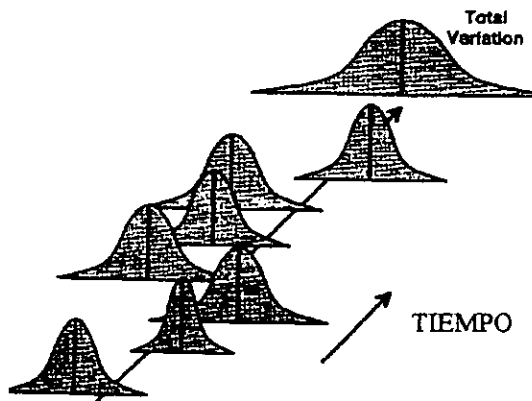


FIGURA 2.7  
Comportamiento de un proceso inestable.

Ya de por sí, un proceso estable tiene asociada una variación total. La figura 2.8 pretende ilustrar esta situación.

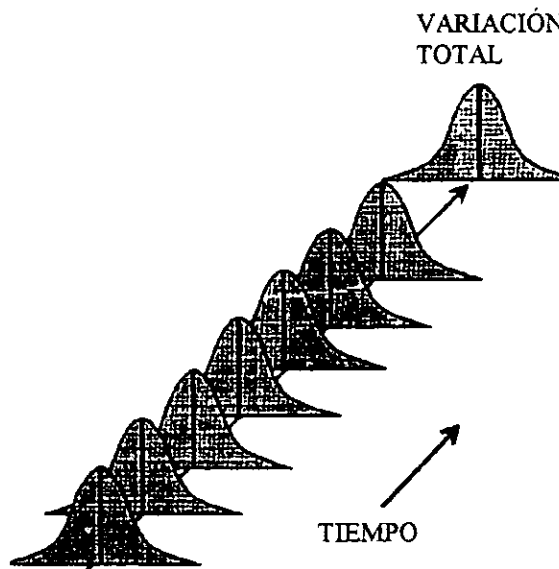


FIGURA 2.8 Comportamiento de un proceso estable.

El problema se hace aún más complejo, cuando el proceso no es capaz de satisfacer las especificaciones del cliente. El porcentaje rechazado es significativamente mayor y en consecuencia se incrementan los costos y, quizá también, la pérdida transferida al cliente.

La siguiente figura 2.9, hace más objetiva esta cuestión.

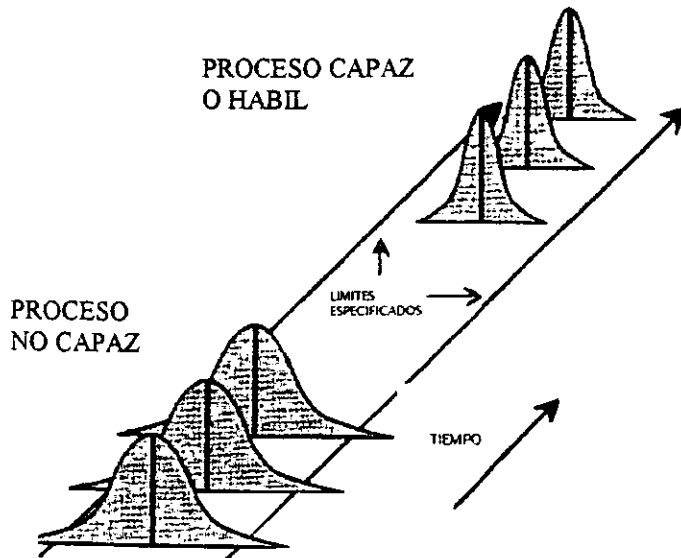


FIGURA 2.9 Comportamiento de un proceso capaz comparado con uno no capaz

La resolución de la problemática asociada a la variación es tema central de todo esfuerzo de mejora. Se dispone de diversas herramientas para lograrlo aún cuando cada una de ellas pueda orientarse a una tarea específica. La reducción de la variabilidad tiene que ver con conceptos contenidos en la nueva versión de la norma ISO 9000, tales como “realización del producto”, “eficacia de los procesos”, “prevenir no conformidades y eliminar sus causas”, “mejorar la eficacia y eficiencia de los procesos”

En la detección, control y reducción de la variabilidad se enfocan diversas herramientas que se han integrado o pretenden integrarse al sector productivo de manera sistemática.

Algunas de ellas son:

### Calidad 6 $\sigma$

Busca establecer las condiciones de modo que para cada característica medible, la tasa de defectos no rebase los 3.4 ppm (partes por millón).

### SPC (Control Estadístico del Proceso)

Se orienta al estudio de estabilidad y capacidad para producir consistentemente productos de calidad.

### Experimentos de “cribado”

Busca identificar las variables de entrada a un proceso que sean críticas y para las cuales deben determinarse valores objetivos y tolerancias.

## Estudio de superficies de respuesta

Busca comprender los efectos de las variables de entrada sobre los resultados. Utiliza técnicas matemáticas y estadísticas para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables y el objetivo es optimizar esa respuesta.

## Análisis de robustez

Establece objetivos y tolerancias para las variables de entrada a un proceso. Centra su aplicación al diseño de parámetros y de tolerancias tanto de un producto como de un proceso.

Con este último punto se relacionan los métodos Taguchi, los cuales comprenden el diseño de parámetros que busca identificar los niveles óptimos de los factores de control en un producto y / o proceso para hacerlos menos sensibles a los factores de ruido.

## 2.6 LA ESTRATEGIA DE GENICHI TAGUCHI

Durante las dos primeras fases del ciclo de vida de un producto, Taguchi propone seguir una estrategia que comprende las siguientes acciones :

1. **Diseño del sistema.**- Comprende diversos aspectos según la parte del ciclo de vida del producto en que nos encontremos. Si estamos en investigación y desarrollo, necesitamos el diseño y construcción de un prototipo, así como la determinación de materiales, partes, componentes y sistema de ensamble. En la fase de ingeniería de producción, es vital la determinación del proceso de manufactura.
2. **Diseño de parámetros.**- En este paso, los niveles (valores) de los factores controlables son seleccionados para minimizar los efectos de los factores de ruido sobre las características funcionales de un producto.
3. **Diseño de tolerancias.**- Si la reducción de variabilidad lograda en el paso anterior es insuficiente, nuevas y más estrechas tolerancias deben ser especificadas en relación a los niveles determinados por el diseño de parámetros. (Un sistema en operación supone la aplicación previa del diseño de parámetros).

Estos tres pasos han sido usados ampliamente en muchas industrias para mejorar la calidad de los productos. Las actividades de control de calidad en la planeación del producto, diseño e ingeniería de producción son conocidas como *control de calidad fuera de línea (off-line)* o **INGENIERIA DE CALIDAD**, mientras que las actividades de control de calidad durante la producción actual es conocida como *control de calidad en línea (on-line)*.

Mientras que la variación entre unidades de producción puede ser controlada en cualquier fase del ciclo de vida del producto, los ruidos externo e interno solo pueden controlarse efectivamente mediante las actividades de la Ingeniería de calidad en la fase de diseño o rediseño del producto.

### 2.6.1 INGENIERIA DE CALIDAD EN EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Como se indicó anteriormente, el diseño del producto tiene el mayor impacto sobre la calidad final del producto. Por ello es esencial considerar todos los aspectos del diseño (incluyendo factores integrados al producto) que afecten la desviación de las características de calidad del producto respecto de su valor objetivo (nominal). Es también necesario considerar

métodos para reducir los factores de ruido indeseables e incontrolables que causen desviación funcional.

Los tres pasos diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias son aplicados en el diseño de un producto como se explica a continuación:

### 2.6.1.1- Diseño del sistema

*Diseñar el sistema significa el desarrollo de un diseño prototipo base que realice las funciones deseadas y requeridas del producto con desviación mínima respecto de los valores objetivos de realización.* Incluye la selección de partes, materiales, componentes y el sistema de ensamble. Por ejemplo el diseño de un circuito eléctrico para un equipo de televisión que convierte una entrada de 100 V corriente alterna a 115 V corriente directa, requiere una investigación para el mejor circuito técnicamente hablando que sea específicamente relevante para este diseño. Podría incluirse un sistema de control automático en el diseño del circuito que mantenga el voltaje deseado de 115 V y entonces podríamos medir continuamente el voltaje de salida del circuito. Si existen desviaciones, el sistema de control automático debe ajustar el parámetro relevante en el circuito. Puede cambiar por ejemplo, el valor de la resistencia de un reóstato tal que la diferencia entre el voltaje medido y el valor objetivo se reduzca a cero.

En síntesis, el diseño del sistema de tal circuito eléctrico, requiere un diseño apropiado.

### 2.6.1.2 Diseño de parámetros.

Aunque el diseño del sistema se haya establecido, el siguiente paso es determinar los niveles óptimos para los parámetros de cada elemento del sistema tal que las desviaciones funcionales del producto sean mínimas. Como ilustración considere la situación del párrafo anterior. Después de la selección de un circuito prototipo en el diseño del sistema, es necesario determinar los niveles óptimos de los parámetros del circuito.

**EJEMPLO 2.1** Considere el ejemplo presentado por Elsayed y Hsiang en su libro "Quality engineering in production system", donde el voltaje suministrado es 100V al circuito prototipo pero solo se obtiene un voltaje de salida de 80 V. Para reducir la diferencia entre el voltaje objetivo y el medido, actualmente debemos ajustar un parámetro usado en el circuito al nivel adecuado (identificamos este parámetro como hFE).

El efecto del parámetro hFE sobre el voltaje de salida se muestra en la figura 2.10:

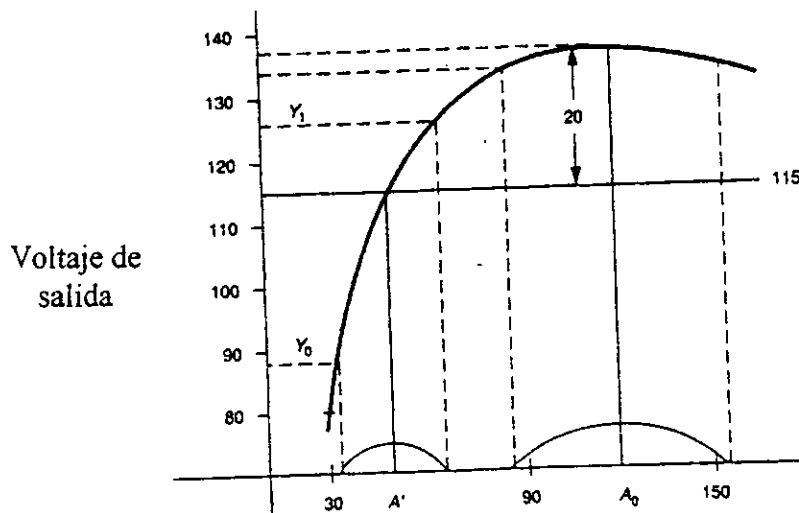


FIGURA 2.10. Efecto del parámetro hFE sobre el voltaje de salida

Como se aprecia en la figura, cuando el nivel del transistor es bajo  $h_{FE} = A'$ , es probable que  $h_{FE}$  varíe en 30% del valor medio, resultando en una variación del voltaje de salida tan grande como el intervalo  $Y_1 - Y_0$ . Por consiguiente el nivel de  $h_{FE}$  debe seleccionarse como  $A_0$  puesto que las variaciones en torno a  $A_0$  tendrán mínimo o ningún efecto en el voltaje de salida.

No obstante al seleccionar  $A_0$ , tenemos una diferencia de 20 V la que debemos eliminar cambiando otro parámetro del circuito (un resistor por ejemplo).

Determinar los niveles óptimos de los parámetros es un proceso fuera de línea y usualmente se realiza utilizando un diseño experimental apropiado. El resultado final de este paso de diseño es determinar la combinación óptima de niveles de parámetros de todos los componentes del prototipo.

### **2.6.1.3 Diseño de tolerancias**

Aunque el diseño de sistemas este completo y los valores de los parámetros de los elementos (componentes) se hayan obtenido, el siguiente paso es determinar la tolerancia de cada parámetro individual (factor) mediante el análisis de pérdida de calidad y costo. En efecto, es necesario definir rangos admisibles para la desviación de los valores de los parámetros. Obviamente, si estrechamos los rangos de desviación, el costo del producto se incrementa como consecuencia de los incrementos en los costos de manufactura. Por otro lado, un rango amplio amplifica la variación funcional del producto respecto del valor objetivo. *El diseño de tolerancias* determina las más económicas tolerancias, las cuales minimizan el costo del producto, dando una desviación tolerable respecto de los valores objetivos.

## **2.6.2 INGENIERIA DE CALIDAD EN EL DISEÑO DE PROCESOS DE PRODUCCION**

Esta etapa del diseño del proceso de producción también presenta tres pasos con el mismo nombre aunque con un enfoque más específico como se presenta a continuación:

### **2.6.2.1. Diseño del sistema**

Está fundamentalmente orientado a determinar los procesos de manufactura requeridos para mover la pieza de trabajo desde el inicio de operaciones hasta su total acabado. Durante este proceso se agrega energía a la pieza ya sea para cambiar su forma, quitar material, o cambiar sus propiedades físicas o de funcionamiento.

El principal objetivo del diseño del sistema es determinar los procesos de manufactura que pueden conformar el producto dentro de los límites establecidos para sus especificaciones y tolerancias y al más bajo costo. Esta función generalmente se realiza por manufactura, producción e ingeniería industrial.

### **2.6.2.2. Diseño de parámetros**

En esta etapa del diseño de procesos de producción, se determinan los niveles de operación de proceso tales que la variación en los parámetros de los productos se minimiza. Ejemplos típicos de variación en estos niveles comprende variación de la temperatura, de la materia prima, de la energía suministrada y de la condición de uso de una herramienta entre otros.

Estas variaciones, conjuntamente con algunos factores de ruido no identificados, pueden causar no conformidad en los procesos de producción resultando productos fuera de especificación o salidas del proceso no uniformes. Esta no uniformidad puede minimizarse determinando los niveles óptimos para los parámetros de los procesos. Los niveles de operación pueden así cambiarse a valores donde los efectos de la variación del proceso sobre el producto sean mínimos. Los parámetros que afectan el desempeño del proceso de producción se establecen durante una “corrida piloto”. Consecuentemente, el diseño del proceso de producción se clasifica como un proceso de control de calidad “fuera de línea” y utilizamos el diseño experimental para determinar los niveles óptimos de los parámetros del proceso.

### **2.6.2.3. Diseño de tolerancias**

Aunque las condiciones de operación óptimas para cada elemento del proceso de producción hayan sido determinadas, se deben determinar los rangos admisibles para cambios en las condiciones de operación y otras variables.

Nuevamente se ratifica que **rangos estrechos de variación permite menor variación y mayor uniformidad de los productos pero a un mayor costo**. Entonces, el objetivo de este paso es encontrar rangos óptimos de las condiciones de operación que minimicen la suma de los costos de variación y costos del producto. Este es ya un problema de retroalimentación del diseño del sistema de control de calidad “en línea”.

## **2.6.3 INGENIERIA DE CALIDAD EN PRODUCCIÓN**

Se refiere al control de calidad “en línea” y trata con las actividades diarias para controlar las condiciones del proceso mediante la observación ya sea de las características del producto o de los parámetros del proceso. Es sabido que todos los procesos “derivarán” si no se controlan. Por consiguiente el propósito del control de calidad “en línea” es producir productos uniformes mediante ajustes del proceso de acuerdo a la información disponible relativa a especificaciones de ambos: producto y proceso.

Una observación es usualmente suficiente para controlar el proceso para cada período. Generalmente usamos el muestreo estadístico. En todo caso existe un error probable. No obstante, sin controlar el proceso no es posible controlar la calidad de un producto. La calidad es función no solamente del diseño, sino también del sistema de control. Estos contenidos son estudiados en la asignatura de *control de calidad* y otras relativas.

### **2.6.4 INGENIERIA DE CALIDAD EN EL SERVICIO AL CLIENTE**

A pesar de lo estrictos que hayan sido los controles aplicados en los pasos de diseño y producción, algunos productos defectuosos “se cuelan” hasta el consumidor. Tales productos pueden crear problemas en procesos subsecuentes o pueden resultar en reclamaciones legales de los consumidores una vez que el producto alcance el mercado. Para estos casos, debe proporcionarse obligatoriamente un servicio post fabricación apropiado, generalmente por el departamento de ventas. Tal servicio puede tomar la forma de reparación o reemplazo de artículos defectuosos, compensación por daños al consumidor, refacciones, etc.



## 2.7 FUNCION DE PERDIDA Y NIVEL DE CALIDAD

En esta parte centraremos la atención en evaluar el nivel de calidad de productos manufacturados.

El concepto de **porcentaje defectuoso** ha sido ampliamente usado como una forma de medir el nivel de calidad. Sin embargo, los lotes que se envían al cliente llevan un porcentaje defectuoso muy pequeño puesto que la mayor parte de los fabricantes inspeccionan su producción para garantizar que solo productos no defectuosos sean embarcados. De esta manera, el consumidor no se ve afectado por la existencia de defectuosos en la línea de producción, excepto por el incremento en los costos. Así la incidencia de productos defectuosos no puede considerarse un problema de calidad pero si un problema de *costos*. ¿Cómo evaluar el nivel de calidad de productos embarcados?

En el pasado, el **porcentaje defectuoso, índice de capacidad de proceso y costos de garantía**, han sido usados para este efecto. Existen fabricantes en los Estados Unidos y Japón, que requieren proveedores de artículos con un índice de capacidad de proceso ( $C_p$ ) de más de 1.00. Sin embargo, no existen bases para determinar cual es el valor óptimo del  $C_p$ . Este índice es una medida pobre del nivel de calidad porque administradores e ingenieros no pueden comprender el significado actual de sus valores, por ejemplo ¿cuál es la mejora lograda cuando  $C_p$  cambia de 0.9 a 1.2? De manera similar, los costos de garantía y los porcentajes defectuosos son entendibles porque son medidas referenciadas a valores monetarios.

Aún así, los costos de garantía son usados para tomar decisiones en el proceso de producción debido a los retrasos, pero no pueden medirse las pérdidas en el segmento de mercado. Necesitamos métodos apropiados para pronosticar la calidad antes de embarcar el producto o durante su producción.

### EJEMPLO 2.2

Considere una comparación entre dos equipos de TV producidos por dos fábricas pertenecientes a la misma compañía. La fábrica A está localizada en Japón y la otra fábrica B está en América. Suponga que la comparación se basa en la definición de color la cual se basa en el balance de color de los equipos. Aunque ambas fábricas usan el mismo diseño, los equipos producidos en América tienen menor calidad y los consumidores prefieren el producto japonés.

La figura 2.11 muestra las diferencias en la característica de calidad elegida. Obsérvese que la distribución de calidad de la TV japonesa (mostrada por la curva fuerte) es aproximadamente una distribución normal con un valor objetivo en el centro; su desviación estándar es aproximadamente  $1/6$  de la tolerancia, la cual es en este caso igual a 10.

En control de calidad, el índice de tolerancia dividido por 6 desviaciones estándar se conoce como *índice de capacidad del proceso*, y se denota por  $C_p$

$$C_p = \frac{\text{Tolerancia}}{6\sigma}$$

La capacidad del proceso del producto

Japonés, por consiguiente es 1 .

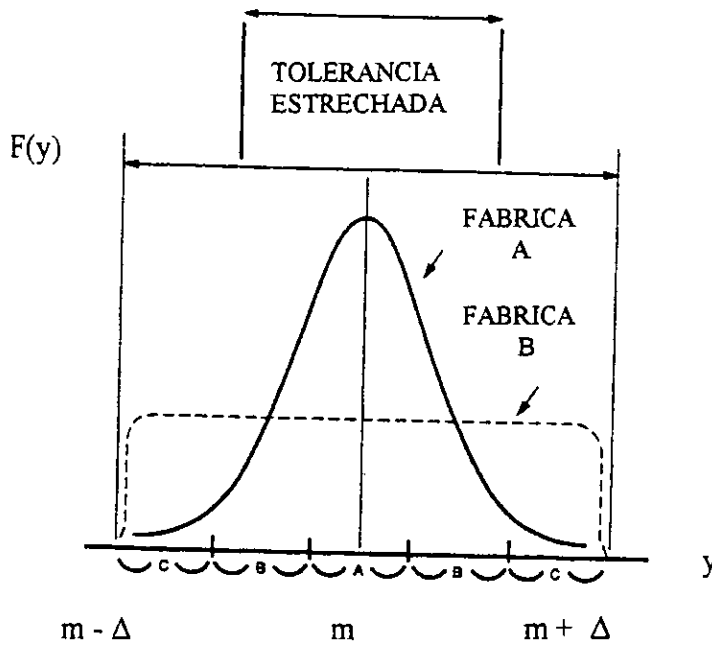


FIGURA 2.11. Distribución de la característica "definición de color"

Por otro lado, la distribución de calidad del producto americano (en la figura 2.11 se representa por línea segmentada) tiene menos productos fuera de especificación que los productos hechos en Japón y es bastante similar a la distribución uniforme para los productos que están dentro de los límites de tolerancia. Puesto que la desviación estándar de la distribución uniforme está dada por  $1 / \sqrt{12}$  de la tolerancia, el índice de capacidad de proceso para estos equipos es:

$$C_p = \frac{\text{Tolerancia}}{6x\left(\frac{1}{\sqrt{12}}\text{Tolerancia}\right)} = 0.577 \quad \text{La cual es menor que la de los procesos en Japón.}$$

Incurrimos en pérdida siempre que la característica de calidad funcional de un producto (denotada por  $y$ ) se desvía de su valor objetivo (nominal) denotado por  $m$ , a pesar de que tan pequeña sea la desviación.

La figura 2.12 muestra una relación simplificada entre pérdida de calidad y la cantidad de desviaciones del valor objetivo. Como se aprecia en la figura, la pérdida de calidad es cero cuando no existe desviación ( $y = m$ ); la pérdida se incrementa cuando el valor de la característica funcional aumenta o disminuye, alejándose de  $m$ .

Cuando el valor de la característica funcional excede uno de los límites  $m + \Delta$  ó  $m - \Delta$  (donde  $\Delta$  se define como la tolerancia y  $2\Delta$  es el ancho de tolerancia) la pérdida de calidad es igual al costo de disposición del producto (de compra o de retrabajo) normalmente denotado por A.

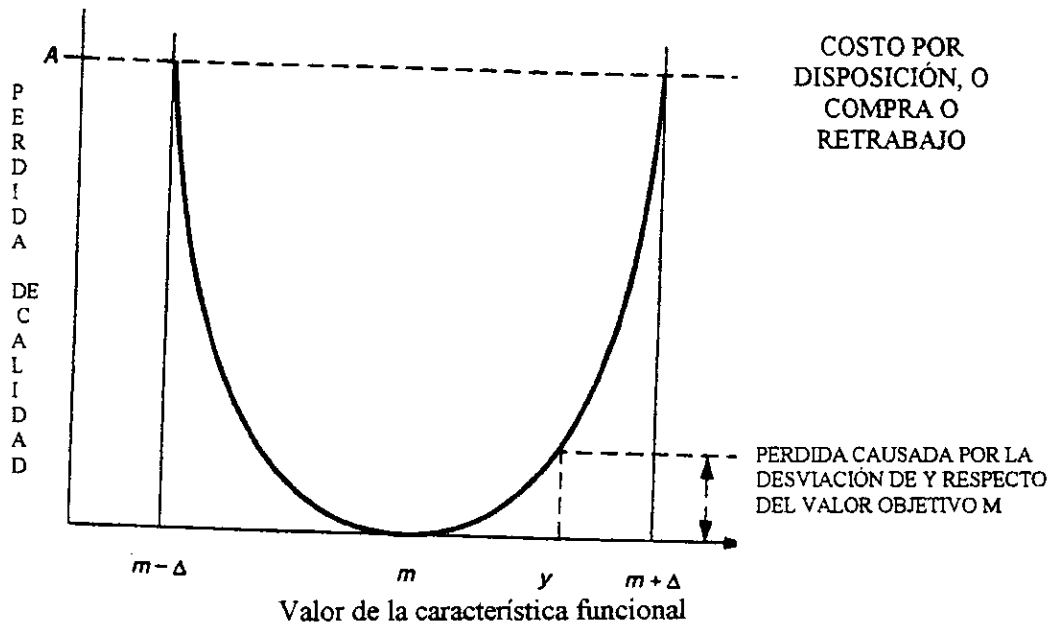


FIGURA 2.12. Relaciones entre pérdida de calidad y desviación del valor objetivo m

### 2.7.1 La función de pérdida. Modelo

Asumimos que la pérdida debida a la variabilidad de una característica de calidad y respecto de su valor objetivo  $m$  es una función de pérdida denotada por  $L(y)$ .

El propósito del desarrollo de productos o procesos es mejorar sus características de desempeño en relación a las necesidades y expectativas del consumidor.

El propósito de la experimentación debe ser reducir y controlar la variación ya sea del producto o del proceso; en consecuencia deben tomarse decisiones relacionadas con los parámetros que afecten su desempeño. La función de pérdida cuantifica la necesidad para entender cual diseño de factores afecta significativamente el promedio y la variación de una de sus características de desempeño. Con un ajuste apropiado de ese promedio, o mediante la reducción de la variación, las pérdidas transferidas a la sociedad son minimizadas.

La expresión para esta función es la siguiente:

$$L(y) = k(y - m)^2$$

Donde  $k$  es una constante de proporcionalidad.

Puesto que la variación es una gran parte de la discusión relativa a calidad, el diseño experimental será la técnica que se seguirá en esta Tesis integrado en un método específico de Taguchi y el ANOVA (análisis de variancia) será el método estadístico usado para interpretar los datos experimentales generados al aplicar dichos métodos y tomar las decisiones necesarias. Este método ANOVA fue desarrollado por Sir Ronald Fisher en 1930 como una forma de interpretar resultados de experimentos agrícolas. ANOVA no es un método complicado y tiene una armoniosa estructura matemática asociado a él.

ANOVA es una herramienta de decisión basada en la estadística para detectar cualquier diferencia en las variables de desempeño promedio de grupos o "items" (artículos) probados. La decisión entonces, más que usar puro juicio, toma en cuenta la variación.

En esta Tesis se aplicará el ANOVA a una muy especial situación, aunque este método de análisis puede ser usado con cualquier conjunto de datos que tengan la misma estructura.

### 2.7.2 Derivación de la función de pérdida

Asumimos que la pérdida debida a las partes defectuosas (por tener que desecharse, repararse o degradarse) es  $A$ . Entonces denotemos la función de pérdida por  $L(y)$  y desarrollémosla en términos de una serie de Taylor en torno al valor objetivo  $m$ .

$$L(y) = L(m + y - m)$$

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!}(y - m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 + \dots$$

Puesto que  $L(y) = 0$  cuando  $y = m$  (por definición, la pérdida de calidad es cero cuando  $y = m$ ), y el valor mínimo de la función se obtiene en este punto (ver la figura 1.3), entonces su primera derivada con respecto a  $m$ ,  $L'(m)$ , es cero. Los primeros dos términos de la ecuación arriba expresada son entonces igual a cero. Si despreciamos los términos con potencias superiores a 2, entonces la expresión se reduce a:

$$L(y) = \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 \quad \text{o'}$$

$$L(y) = k(y - m)^2$$

Donde  $k$  es una constante de proporcionalidad.

El uso del criterio de usar la función de pérdida cuadrática, mínimo error medio cuadrático y mínima desviación media cuadrática ha sido usado amplia y extensivamente en la literatura de estadística y teoría del control (por ejemplo, Athan y Falb, 1966; Box y Jenkins, 1976). Más recientemente, Jessup (1985) discutió la racionalidad que hay detrás del uso de la función de pérdida cuadrática en relación a los valores de mejorar continuamente. El usó varios ejemplos prácticos para mostrar las pérdidas causadas por variación en salidas de procesos y los efectos de diferentes modelos de variación sobre el desempeño de la economía en el largo plazo, equivalentes a las "pérdidas a la sociedad" como se utiliza en esta tesis.

Cuando la desviación de una característica funcional de un producto es una cantidad  $\Delta$  respecto del valor objetivo  $m$ , entonces la pérdida es igual a  $A$ . Por lo anterior:  $A = k \Delta^2$

$$- o' - \quad k = \frac{A}{\Delta^2}$$

En lo que sigue, la función de pérdida es aplicado al equipo de TV citado anteriormente.

### 2.7.3 Aplicaciones de la función de pérdida

EJEMPLO 2.3- Suponga que el costo de reparar una falla en un equipo de TV en la fábrica es de \$2 por unidad. Compare las pérdidas causadas por desviaciones respecto del valor objetivo para dos equipos de TV, uno producido en la fábrica A y el otro en la fábrica B. Recuerde que el rango del intervalo de tolerancia es de  $m - \Delta$  a  $m + \Delta$

Donde  $\Delta = 5$ .

Solución .- Necesitamos determinar primero la constante  $k$ . Puesto que  $\Delta = 5$  y  $A = \$2$ , obtenemos:

$$k = \frac{A}{\Delta^2} = \frac{2.0}{5^2} = 0.08$$

La pérdida esperada causada por desviación en la producción de los equipos de TV en la fábrica A se obtiene como sigue.

$$L = k v^2 \quad (\$/unidad)$$

Donde  $v^2$  es la desviación media cuadrática del valor objetivo  $m$ . Para la fábrica A,  $V = 10/6$ , y

$$L = 0.08 (10/6)^2 = \$0.222 /unidad$$

De manera similar en la fábrica B donde  $v = 10/\sqrt{12}$  tenemos:

$$L = 0.08 (10/\sqrt{12})^2 = \$0.667 / unidad$$

Con estos resultados podemos construir una tabla que indica que las pérdidas causadas por desviación para equipos de TV producidos en la fábrica B son tres veces las pérdidas equivalentes para el mismo tipo de equipo de TV producido en la fábrica A, a pesar de que la fracción defectiva en la fábrica B es cero.

Fabricante	objetivo	Dev. Media Cuadrática $v^2$	Pérdida esperada (por unidad) L	Porcentaje defectivo
Fabrica A (Japón)	m	100/36	\$0.222	0.27%*
Fabrica B (EEUU)	m	100/12	\$0.667	0.00%

\*Esto se obtiene mediante el uso de la distribución normal estándar.

TABLA 2.1 Comparación entre dos fabricantes de equipos de TV

## Uso de la función de pérdida en la evaluación del efecto de la mejora de la calidad.

EJEMPLO 2.4. Suponga que la fábrica A ha mejorado el proceso tal que se obtiene una nueva desviación estándar de  $10/8$ . ¿Cual es la pérdida causada por desviaciones respecto del valor objetivo?

Usando  $k = 0.08$  obtenida en el ejemplo anterior, sustituimos:  $L = k v^2$

$$L = 0.08 \left(\frac{10}{8}\right)^2 = \$0.125$$

La pérdida por unidad de producción debe bajar de \$ 0.222 (proceso corriente) a \$0.125, resultando en \$0.097 de ahorro por unidad.

Veamos como se relaciona la función de pérdida con el índice de capacidad del proceso  $C_p$ . Para el proceso en operación y el proceso mejorado discutido arriba, tenemos:

$$L_1 = k v_1^2 \text{ (proceso actual)} \qquad L_2 = k v_2^2 \text{ (proceso mejorado)}$$

Dividiendo entre si ambas ecuaciones tenemos:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{V_1^2}{V_2^2}$$

$$C_{P1} = \frac{\text{Tolerancia}}{6V_1}$$

$$C_{P2} = \frac{\text{Tolerancia}}{6V_2}$$

Entonces, al sustituir ambas ecuaciones obtenemos lo siguiente:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{C_{P2}^2}{C_{P1}^2}$$

Este resultado implica que las pérdidas causadas por la desviación, son recíprocamente proporcionales al cuadrado de los índices  $C_p$ . Si la pérdida y los índices  $C_p$  se conocen al principio de un proceso, entonces la pérdida después de cambios en la capacidad del mismo, puede calcularse usando el índice  $C_p$  en el período de producción deseado, simplemente substituyendo en la ecuación anterior.

**La función de pérdida para productos similares ( o para un sistema con componentes independientes)**

Productos que tienen funciones similares pueden ser evaluados colectivamente, a pesar de sus tamaños y especificaciones mediante el uso de la función de pérdida.

EJEMPLO 2.5. . Suponga que resistores de k diferentes tipos son proveídos a una planta ensambladora. La calidad de estos resistores puede ser medida por :

$$\text{Pérdida de calidad esperada: } L = \left( \frac{A_1}{\Delta_1^2} V_1^2 + \frac{A_2}{\Delta_2^2} V_2^2 + \dots + \frac{A_k}{\Delta_k^2} V_k^2 \right)$$

- Donde  $2\Delta_i$  (i = 1, 2, 3, ... k) Límite de tolerancia del resistor tipo i
- $A_i$  (i = 1, 2, 3, ... k) Precio(pérdida) por unidad de resistor tipo i
- $V_i^2$  (i = 1, 2, 3, ..... k) Desviación media cuadrática

Cuando un producto tiene varias características de calidad funcionales medibles, la pérdida total causada por desviaciones puede ser estimada usando la siguiente ecuación donde k representa, en este caso, el número de características de calidad que podemos medir del producto.

Pérdida debido a desviaciones 
$$L = \sum_{i=1}^k \frac{A_i}{\Delta_i^2} V_i^2$$

Esta ecuación proporciona un índice de la calidad total del producto porque toma en consideración todas las características de calidad funcionales del producto.

EJEMPLO 2.6. Un fabricante de blocks calibradores requiere que satisfagan cierto estándar de acabado (rugosidad de la superficie) así como cierta longitud. La pérdida causada por acabado inaceptable es de \$50, y la pérdida causada por longitud inaceptable es \$20. Las pérdidas representan el costo de reparación (si es posible) del block defectuoso. Las especificaciones de un block calibrador son :

Longitud	1.00000 ± 0.00010 pulgadas
Rugosidad de superficie	0.00020 μm o menos (m = 0) superficie perfecta

Se tomaron las siguientes medidas de longitud:

1.000010	1.000020	0.999990	0.999995	1.000010
1.000005	1.000020	1.000000	0.999998	0.999990

También fueron tomadas las siguientes medidas de rugosidad

0.00010	0.00020	0.00015	0.00005	0.00003
0.00010	0.00006	0.00018	0.00010	0.00020

Cuáles son las pérdidas totales esperadas debido a las desviaciones?

SOLUCIÓN: Las pérdidas esperadas causadas por las desviaciones en la longitud (L1) son:

$$L_1 = \frac{A_1}{\Delta_1^2} V_1^2 \quad \text{Se sabe que } A_1 = \$20 \text{ y } \Delta_1 = 0.00010$$

$$V_1^2 = \frac{1}{10} [(1.000010 - 1.000000)^2 + (1.000020 - 1.000000)^2 + \dots + (0.999990 - 1.000000)^2] = 1.2 \times 10^{-10}$$

Donde V1 es el estimador de la desviación media cuadrática.

$$L_1 = \frac{20}{(0.00010)^2} \times 1.2 \times 10^{-10} = \$ 0.24$$

La pérdida causada por las desviaciones de la rugosidad de la superficie (L2) es:

$$L_2 = \frac{A_2}{\Delta_2^2} V_2^2 \quad \text{Se sabe que } A_2 = \$ 50 ; \quad \Delta_2 = 0.00020$$

$$V_2^2 = \frac{1}{10} [(0.00010)^2 + (0.00020)^2 + \dots + (0.00020)^2] = 1.7 \times 10^{-8}$$

$$L_2 = \frac{50}{(0.00020)^2} \times 1.7 \times 10^{-8} = \$ 21.2$$

Pérdida total esperada = L1 + L2 = \$ 21.44 /unidad

### La función de pérdida y la justificación de la mejora

La función de pérdida puede también usarse para justificar mejoras de los procesos, como se ilustra en el siguiente ejemplo:

**EJEMPLO 2.7.** Suponga que la fábrica A desea mejorar la calidad de sus equipos de TV reduciendo desviaciones del valor objetivo tal que la nueva desviación estándar sea de 10/8. Esta mejora puede ser alcanzada tecnológicamente con un costo adicional de \$0.05 por unidad de producción. Debe la fábrica mejorar su proceso? (suponga que no se realiza inspección).



SOLUCIÓN: La pérdida total por unidad en el proceso actual es:

$$L = k v^2 = 0.08 (10/6)^2 = \$0.222$$

La pérdida total por unidad después de mejorar el proceso es:

$$L = 0.08(10/8)^2 = \$0.125$$

El costo adicional de mejora = \$0.05 / unidad; entonces sumando ambos tenemos \$0.175

La ganancia neta resultante de la mejora en la capacidad del proceso, se obtiene al restar este valor de la pérdida del proceso actual y es igual a \$0.047 por unidad de producción.

Si la tasa de producción de la fábrica es de 100,000 unidades por mes, entonces el ahorro esperado será de \$4700 al mes o de \$56,400 anualmente.

¿ Cual será el costo adicional de mejora para que sea indistinta una u otra decisión?

Observaciones:

Se ha tratado de mostrar la relación existente entre la reducción de la variabilidad y la calidad. Asimismo, se presentó la estrategia de Genichi Taguchi relacionada con la ingeniería de calidad señalando la relación existente entre las etapas del ciclo de vida de un producto y las partes de esta estrategia como son el diseño del sistema, el diseño de parámetros y el diseño de tolerancias, realzando las bondades de la función de pérdida en la evaluación de acciones de mejoramiento de la calidad.

En el siguiente capítulo, se presenta la parte del marco teórico que comprende el diseño de parámetros y el diseño de tolerancias que es la parte de la estrategia de Genichi Taguchi que se trata en esta tesis.

## **CAPITULO 3**

# **ESTRATEGIA DE LA INGENIERIA DE CALIDAD ORIENTADA A LA MEJORA DE PRODUCTOS Y PROCESOS**

**MARCO TEORICO**  
SEGUNDA PARTE

## CAPITULO 3

# ESTRATEGIA DE LA INGENIERIA DE CALIDAD ORIENTADA A LA MEJORA DE PRODUCTOS Y PROCESOS.

En este capítulo se complementa el marco teórico al presentar el esquema que se aplicó en diversas situaciones donde se buscó mejorar la calidad a través del diseño de parámetros como parte de la estrategia de Taguchi. En la **sección 3.1** se presenta una introducción a los diseños experimentales más comunes para, en la **sección 3.2**, justificar el uso de los diseños factoriales fraccionales ortogonales como una estrategia de prueba eficiente; ya en la **sección 3.3** se detalla la metodología seguida en el proceso de diseño de parámetros señalando particularidades de los distintos tipos de características de calidad y explicando cada uno de los pasos de este esquema, ejemplificando en lo posible, para mantener un enfoque académico. Para Concluir este capítulo, en la **sección 3.4** se presentan los fundamentos del diseño de tolerancias centrando la atención en su determinación para distintas condiciones del proceso de manufactura, demostrando que las tolerancias son afectadas muy poco por la habilidad del mismo para satisfacer las especificaciones de los distintos parámetros que conforman las características de calidad de los productos.

### 3.1 ESTRATEGIAS DE PRUEBA TÍPICAS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.

Los ingenieros y científicos están más frecuentemente enfrentados a dos situaciones de desarrollo de productos o procesos. Los términos producto y proceso pueden ser usados indistintamente en lo que sigue. Una primera situación de desarrollo es encontrar el nivel de un parámetro que mejore alguna característica de desempeño a un valor óptimo o al menos aceptable.

Una segunda situación es para encontrar una menos costoso diseño alternativo, o materiales o método que proporcione un desempeño equivalente.

Dependiendo de la situación en que se encuentre el experimentador, será la estrategia que puede usar. El primer problema donde se necesita mejorar el desempeño, es la más común de las situaciones.

Cuando se investiga para realizar un diseño equivalente mejorado, la persona generalmente corre alguna prueba, observa algún desempeño del producto y toma una decisión para usar o rechazar el nuevo diseño. Es la calidad de esta decisión que puede ser mejorada al elegir cual estrategia de prueba debe ser utilizada; en otras palabras, se trata de evitar el error de usar un diseño inferior o no usar un diseño aceptable.

Hoy en día, se utilizan a menudo algunas estrategias de prueba sin que el experimentador este consciente de la eficiencia propia de dichas estrategias.

Los experimentadores recurren a las siguientes aproximaciones:

El plan de prueba más común es evaluar el efecto de un parámetro sobre el desempeño de un producto. Una progresión típica de esta aproximación, cuando el primer parámetro seleccionado no lo afecta, es evaluar el efecto de varios parámetros sobre el desempeño del producto pero uno a la vez. Una situación verdaderamente crítica para el experimentador es evaluar el efecto de varios parámetros sobre el desempeño pero todos al mismo tiempo.

Para hacer esto de una manera estadística apropiada, debe hacerse un número válido de elementos de prueba bajo cada tratamiento para estructurar la muestra. Dos bajo cada condición no es lo más apropiado. Muchos ingenieros no están familiarizados con los métodos estadísticos para determinar el tamaño apropiado de muestra, pero existen libros de estadística que pueden ayudar en esa determinación.

Si el primer factor seleccionado falla para producir los resultados esperados, el personal usualmente recurre a la prueba de algún otro factor, y el programa de prueba resultante debe aparecer como se presenta en la tabla 3.1

Tratamiento	FACTOR Y NIVEL					Resultados -de la prueba	
	No	A	B	C	D		
	1	1	1	1	1	*	*
	2	2	1	1	1	*	*
	3	1	2	1	1	*	*
	4	1	1	2	1	*	*
	5	1	1	1	2	*	*

Tabla 3.1 Varios factores uno a la vez

En términos genéricos, el experimentador tiene bajo observación 4 diferentes factores evaluados uno a la vez. Puede verse en la tabla 3.1 que el primer tratamiento es la condición base de referencia. Así, el resultado del tratamiento 2 puede compararse con los resultados del tratamiento 1 para estimar el efecto del factor A sobre el desempeño del producto. Los resultados del tratamiento 3 pueden compararse con los del tratamiento 1 para estimar el efecto del factor B también sobre el desempeño del producto y así sucesivamente. Cada nivel de factor es cambiado uno cada vez manteniendo los demás constantes. Esta es la aproximación científica tradicional para experimentación usada y enseñada muy a menudo hoy en día en las clases de química y física de escuelas de nivel medio superior y aún superior.

La tercera y más urgente situación se encuentra cuando el experimentador comprende y cambia varios factores todos al mismo tiempo esperando que al menos uno de los cambios mejore la situación suficientemente. Nuevamente podemos ver en la tabla 3.2 que el primer tratamiento representa la condición base de referencia. El promedio de los datos obtenidos bajo el tratamiento 1 puede compararse con el promedio de los datos obtenidos bajo el tratamiento 2 para determinar los efectos combinados de todos los factores.

Tratamiento	FACTOR Y NIVEL DEL FACTOR					Resultados de la prueba
	No	A	B	C	D	
	1	1	1	1	1	* *
	2	2	2	2	2	* *

TABLA 3.2 Varios factores todos al mismo tiempo.

Todos estos métodos tienen algún tipo de limitación (es).

### 3.1.1 EXPERIMENTO DE UN FACTOR

El experimento de un solo factor, evalúa el efecto de un parámetro sobre el desempeño del producto mientras se mantienen constante las demás condiciones. Si ocurre que existe una interacción del factor estudiado con algún otro factor, entonces esta interacción no es posible observarla. También en el experimento de un solo factor, no se usan los datos de una manera efectiva. Si el tamaño de muestra válido para cada nivel fuera 4, el ANOVA para tal experimento debe aparecer como en la tabla 3.3. De aquí, un grado de libertad está asociado con el factor A y 6 grados de libertad están asociados con el error (factores desconocidos). En un sentido estadístico, a más grados de libertad asociados a un factor, mayor es la información que se conoce acerca de los efectos de ese factor.

Factor	Tabla sumaria	
	SS	v(grados de libertad)
A	xx	1
E	xx	6
T	xx	7

TABLA 3.3 ANOVA parcial del experimento de un solo factor.

En este ejemplo sabemos algo acerca del efecto del factor A, pero con mayor cantidad de información sabemos más acerca del error. ¿Esta información que problemas nos permite resolver? Esto debe dar ventaja al experimentador para negociar alguno de los grados de libertad asociados al error; por ejemplo, cambiar grados de libertad del error por grados de libertad para más factores mientras no se incremente el número total de pruebas.

Parece que con la estrategia de prueba correcta existen posibilidades de evaluar hasta 7 diferentes factores con solamente 8 pruebas negociando todos los grados de libertad del error.

### 3.1.2 VARIOS FACTORES UNO A LA VEZ

La limitación principal de varios factores uno a la vez, es que ninguna interacción entre los factores estudiados puede observarse. También, ésta estrategia hace uso limitado de los datos de la prueba cuando evalúa los efectos del factor. De los 10 datos puntuales representados (ver tabla 3.1), solo dos son usados para comparar contra otros dos, los 6

datos remanentes son temporalmente ignorados. Si hacemos un intento para usar todos los datos puntuales, entonces el experimento no será ortogonal. **Ortogonalidad significa que los factores pueden ser evaluados independientemente uno de otro, el efecto de un factor no afecta la estimación del efecto de otro factor. Proveer de ortogonalidad al experimento es balancearlo: un número igual de muestras bajo las diversas condiciones de los tratamientos.**

### **3.1.3 VARIOS FACTORES TODOS AL MISMO TIEMPO**

Esta situación imposibilita la separación de los efectos principales de los factores y deja solamente los efectos de cualquier interacción que no es identificable. Algunos factores pueden hacer una contribución positiva y otros una negativa, pero no existe ninguna sugerencia de este hecho.

¿Cómo se puede evitar la utilización de datos de prueba y no ortogonalidad de esta situación? ¿Cómo pueden estimarse las interacciones y mantener un experimento ortogonal?

El uso de experimentos factoriales completos es una posibilidad. El uso de algún estratégico arreglo ortogonal como el que se trata en esta Tesis, es otro.

## **3.2 MEJOR ESTRATEGIA DE PRUEBA**

En álgebra matricial, existen algunas relaciones matemáticas que son válidas para un experimento que es ortogonal, pero el punto de vista más práctico de esto es observar el balance de los tratamientos dentro del experimento.

Con frecuencia, una investigación de ingeniería típica puede involucrar inicialmente 5 o más factores.

Si un experimento factorial completo con 7 factores fuera usado en esta situación, entonces deberían realizarse un total de 128 pruebas. Este tipo de experimento estimaría todos los efectos principales de los factores y todas las posibles interacciones, es ortogonal para uno u otro factor. Sin embargo, el tiempo y las limitaciones financieras hacen prohibitivo el uso de un experimento factorial completo.

¿Cómo puede un ingeniero eficientemente (económicamente) investigar este diseño de factores?

### **3.2.1 ESTRATEGIAS DE PRUEBA EFICIENTES**

Los Estudiosos de la estadística ha desarrollado más eficientes planes de prueba, los cuales son llamados experimentos factoriales fraccionados (FFE's por sus siglas en inglés).

Este tipo de experimento usa solo una porción del total de las combinaciones posibles para estimar los efectos de los factores principales y algunas, no todas, de las interacciones.

Taguchi ha desarrollado una familia de matrices FFE las cuales pueden utilizarse en varias situaciones y que se pretende utilizar en esta Tesis a situaciones específicas de la empresa mexicana.

### 3.2.2 ARREGLOS FACTORIALES FRACCIONADOS ORTOGONALES

Se considera la siguiente situación (enfoque didáctico) para establecer una relación entre una tabla ANOVA y los arreglos ortogonales buscando una mejor estrategia de prueba:

En una factoría fabrican pistones de aluminio “fundido” para motores recíprocos. Existe un problema al final del proceso el cual consiste en cómo alcanzar la dureza apropiada para un producto en particular. La dureza de los pistones se midió en la escala Rockwell B. Los Ingenieros están interesados en el efecto del contenido de cobre y magnesio en la fundición sobre la dureza.

De acuerdo a especificaciones, el contenido de cobre debe ser de 3.5 a 4.5 % mientras que el de magnesio puede ser de 1.2 a 1.8 %. Podemos correr un experimento para evaluar estos factores y condiciones simultáneamente, usando la siguiente simbología:

A = % contenido de cobre	A <sub>1</sub> = 3.5	A <sub>2</sub> = 4.5
B = % contenido de magnesio	B <sub>1</sub> = 1.2	B <sub>2</sub> = 1.8

Suponga que las 4 diferentes mezclas de constituyentes metálicos se prepararon, se vaciaron y se midió su dureza resultante. Es decir, realizamos un experimento factorial completo Dos partes son seleccionadas aleatoriamente de cada “bache” de fundición y se mide su dureza. Los resultados pueden representarse en la siguiente tabla:

Prueba No	Factor y nivel del factor		Datos de prueba y	
	A	B	(R <sub>B</sub> )	
1	1	1	76	78
2	1	2	77	78
3	2	1	73	74
4	2	2	79	80

TABLA 3.4 Experimento factorial completo

Podemos ver que el experimento factorial completo en este caso es también ortogonal. Existe un número igual de datos puntuales de prueba en cada nivel bajo cada factor. Nótese que bajo el nivel A<sub>1</sub>, el factor B tiene dos datos puntuales bajo la condición B<sub>1</sub> y dos bajo la condición B<sub>2</sub>. Lo mismo es verdad bajo el nivel A<sub>2</sub>. La misma situación balanceada se da cuando observamos el experimento bajo los dos niveles de B. En esta condición balanceada, el factor A no influye en la estimación del efecto del factor B y viceversa. En álgebra matricial, existen algunas relaciones matemáticas que son válidas para un experimento que es ortogonal, pero el punto de vista más práctico de esto es observar el balance de los tratamientos dentro del experimento.

Uno puede ver que todas las combinaciones posibles de los dos factores y los dos niveles se representan en la tabla 3.4. Usando esta información, los efectos de los factores y las interacciones pueden estimarse. Un experimento factorial completo es aceptable cuando solamente unos pocos factores están siendo investigados, pero no es muy aceptable cuando existen muchos factores. Si se usa un experimento factorial completo, existen al menos  $2^f$  posibles combinaciones que deben ser probadas (f es el número de factores cada uno en dos niveles). Con frecuencia, una investigación de ingeniería típica puede involucrar inicialmente 5 o más factores.

Un ejemplo real (enfoque didáctico) que enfrenta una planta fabricante de motores, es investigar el problema de fugas en bombas de agua, lo que comprende hasta 7 factores los cuales se listan en la tabla 3.5 indicando sus niveles.

FACTOR	Nivel 1	Nivel 2
A Diseño de cubierta frontal	Producción	Nueva
B Diseño de juntas	Producción	Nueva
C Apriete de tornillos frente	Bajo	Alto
D Cubierta de juntas	No	Si
E Acabado interno de la bomba	Aspero	Suave
F Apriete tornillos traseros	Bajo	Alto
G Modo de apriete	Frente hacia atrás	Sentido inverso

TABLA 3.5 Fugas en bombas de agua. Factores y niveles.

Si un experimento factorial completo fuera usado en esta situación, entonces deben ser realizadas un total de 128 pruebas ( $2^7$ ). Este tipo de experimento, cuya arreglo genérico es mostrado en la figura 3-1, estima todos los efectos principales de los factores y todas las posibles interacciones, es ortogonal para uno u otro factor. Sin embargo, el tiempo y las limitaciones financieras hacen prohibitivo el uso de un experimento factorial completo. ¿Cómo puede un ingeniero eficientemente (económicamente) investigar este diseño de factores?



			A <sub>1</sub>								A <sub>2</sub>							
			B <sub>1</sub>				B <sub>2</sub>				B <sub>1</sub>				B			
			C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>	
			D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
E <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>																
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>																
E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>																
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>																

FIGURA 3.1 Experimento factorial completo

En las figuras 3.2 A ,B y C se muestran los FFE fraccionados a la mitad, la cuarta y la octava parte respecto de la situación presentada anteriormente donde se requerían en total 128 pruebas.

			A <sub>1</sub>								A <sub>2</sub>							
			B <sub>1</sub>				B <sub>2</sub>				B <sub>1</sub>				B			
			C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>	
			D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
E <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	■			■							■			■		
		G <sub>2</sub>		■			■							■			■	
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>	■				■							■			■	
E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>	■				■						■			■		
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>	■				■							■			■	

FIGURA 3.2 A Experimento Factorial Fraccionado a 1/2

			A <sub>1</sub>								A <sub>2</sub>							
			B <sub>1</sub>				B <sub>2</sub>				B <sub>1</sub>				B			
			C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>	
			D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
E <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	■			■							■			■		
		G <sub>2</sub>																
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>	■				■							■			■	
E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>																
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																
		G <sub>2</sub>	■				■							■			■	

FIGURA 3.2 B Experimento Factorial Fraccionado a 1/4

			A <sub>1</sub>								A <sub>2</sub>												
			B <sub>1</sub>				B <sub>2</sub>				B <sub>1</sub>				B <sub>2</sub>								
			C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>						
			D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>					
E <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	■												■								
		G <sub>2</sub>				■																■	
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>							■						■								■
		G <sub>2</sub>							■						■								
E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>																					
		G <sub>2</sub>								■					■								
	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>																					■
		G <sub>2</sub>	■																			■	

FIGURA 3.2 C Experimento Factorial Fraccionado a 1/8

Se seleccionan ciertos tratamientos como condición para mantener la ortogonalidad entre los distintos factores y las interacciones. Es obvio que el FFE a la octava parte con solo 16 combinaciones de prueba es mucho más atractivo para el experimentador desde el punto de vista de tiempo y costo.

Taguchi ha desarrollado una familia de matrices FFE las cuales pueden utilizarse en varias situaciones. Las de uso más práctico se presentan al final de este trabajo como ANEXO 1.

En las condiciones presentadas en el experimento que se ha diseñado para atender las fugas de agua de las bombas, una posible matriz que se puede utilizar corresponde a un arreglo ortogonal de 8 pruebas, la cual se puede etiquetar como una matriz L<sub>8</sub>. La figura 3.3 muestra una matriz de este tipo con dos niveles en cada factor.

Tratamiento No	Columna No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

FIGURA 3.3 Matriz para un arreglo ortogonal L<sub>8</sub>

Actualmente este es un FFE correspondiente a 1/16 del experimento completo. Se pueden observar 7 columnas en este arreglo, similar a un arreglo que vimos al principio (varios factores uno a la vez), en el cual se asigna un factor a cada columna. En este punto,

no debe sorprendernos que las 8 pruebas proporcionen un total de 7 grados de libertad para el experimento completo, asignados a 7 columnas de 2 niveles, con un grado de libertad para cada columna.

El arreglo ortogonal permite negociar todos los grados de libertad del error por grados de libertad de los factores y proporciona las combinaciones particulares de prueba según convenga para la estrategia implantada. Cuando a todas las columnas se les ha asignado un factor este arreglo es conocido como un diseño saturado. Los niveles para la prueba particular son designados por 1's y 2's como se hizo antes.

Es importante enfatizar que, a diferencia del método de análisis clásico, la Ingeniería de Calidad trata las interacciones (cuando no se consideran verdaderamente significativas), como equivalentes a ruido, proporcionando condiciones óptimas y buena reproducibilidad de un experimento.

Aunque pueden darse excepciones, en general no se enfatiza la búsqueda de interacciones entre factores controlables, el énfasis se hace en la búsqueda de interacciones entre factores controlables y factores de ruido y, curiosamente, no se necesita identificar estas interacciones específicas, sino que al variar de una manera balanceada los factores de ruido durante la experimentación, podemos seleccionar los niveles adecuados para los factores controlables a través del análisis. Así, pueden diferenciarse:

- a) Los factores o parámetros que no tienen una influencia significativa sobre la característica de calidad objetivo y que podemos cambiar para reducir el costo.
- b) Aquellos parámetros que se emplean para ajustar la media de la característica de calidad objetivo a su valor nominal, debido a la gran influencia que tienen sobre dicha media, pero no afectan su variación.
- c) Los parámetros que al controlarlos, nos permiten colocar la variación en un nivel mínimo.

Es fácil ver que todas las columnas proporcionan 4 pruebas para el primer nivel del factor y 4 para el segundo nivel. Esta es una de las características que proporciona la ortogonalidad en todas las columnas (factores). El poder real al usar un arreglo ortogonal (OA) es su habilidad para evaluar varios factores con un mínimo de pruebas. Este es considerado un experimento eficiente puesto que se obtiene mucha información con solo unas pocas pruebas.

Los OAs fueron una invención matemática establecida por el matemático francés Jacques Hadamard desde 1897. La utilidad de estos arreglos no fueron explorados hasta la segunda guerra mundial por Plackett y Burman, estadísticos británicos, quienes emplearon los arreglos saturados citados anteriormente.

Las matrices Hadamard son matemáticamente idénticas a las matrices Taguchi; las columnas y filas son rearmadas. La asignación de factores a un FFE saturado no es difícil; a todas las columnas le es asignado un factor. Sin embargo, los experimentos que no están completamente saturados pueden ser más complicados en su diseño.

### **3.3 METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL DISEÑO, CONDUCCIÓN Y ANÁLISIS DE UN EXPERIMENTO MEDIANTE LA INGENIERIA DE CALIDAD: DISEÑO DE PARAMETROS**

Dentro de los objetivos considerados al realizar este trabajo, ocupa un lugar relevante la actividad académica, por lo que el contenido final de este pequeño esfuerzo, se orienta a dotar de una herramienta práctica fundada en la experimentación planeada, a quienes enfrentan problemas de variabilidad y oportunidades de mejora de calidad en productos y procesos, de tal forma, que se incremente substancialmente el número de gente que utiliza estos métodos. Por ello, se presenta un esquema metodológico cuya estructura ha sido probada en la mejora de productos y procesos de empresas tan pequeñas como una panadería, donde el producto sujeto a estudio fue la telera y su característica de calidad su consistencia y aceptación en el gusto del consumidor, hasta la calidad de un tipo de neumático en una fábrica de naturaleza transnacional.

Los pasos principales de este esquema son:

1. Selección del producto o proceso a ser mejorado.
2. Conocimiento y análisis del proceso de producción
3. Identificación de la característica de calidad, su relación con la función de pérdida, sus especificaciones y su método de medición.
4. Selección de factores y/ o interacciones a ser evaluadas.
5. Selección del número de niveles para los factores
6. Selección de un arreglo ortogonal apropiado.
7. Asignación de factores y/o interacciones a columnas.
8. Conducción de la prueba.
9. Análisis de resultados.
10. Confirmación del experimento.

Se presenta a continuación un resumen de cada paso tratando de mostrar la relevancia del mismo en el desarrollo de un buen experimento.

#### **3.3.1. SELECCIÓN DEL PRODUCTO (O PROCESO) A SER MEJORADO.**

Debe partirse de los objetivos estratégicos relacionados con la calidad tomando como directriz la política de calidad de la organización. Con esta base, deberá elegirse si habrá de diseñarse o rediseñarse un producto o proceso, tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada opción: costos, recursos, tiempo, personal, etc. Deberá considerarse el impacto sobre los objetivos, el grado de complejidad, las relaciones con otros productos o procesos, así como la realimentación de los clientes y otra información disponible, como reclamaciones, inspecciones de salidas del proceso, tanto de administradores como de trabajadores.

### 3.3.2. CONOCIMIENTO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.

Es conveniente desarrollar un "conocimiento profundo" y actualizado del proceso. La estructuración de un equipo de trabajo que tenga información sobre él, proporcionará una base fuerte para desarrollar ese conocimiento que será vital en el éxito del estudio. Un diagrama de flujo puede ser un gran auxiliar, aunque empresas como Placosa Plastovin SA de CV, ubicada en CIVAC Cuernavaca, Mor; utiliza "Hojas de Operación Estándar" y "Hojas Técnicas de Fabricación" que permiten una gran objetividad en el análisis específico de los procesos. La Ingeniería Industrial proporciona otras herramientas tales como los diagramas de operaciones, diagramas hombre - máquina, etc. Deberá utilizarse aquella herramienta que más se adapte a la descripción real del proceso. Con ellas pueden disiparse dudas tales como ¿Es este el actual proceso? ¿Pueden identificarse oportunidades para mejora, ejemplo: complejidad, desperdicio, etc.?

¿Existen mejoras obvias al proceso que pueden hacerse? ¿ Existen estándares para el proceso?

### 3.3.3 IDENTIFICACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE CALIDAD, SU RELACIÓN CON LA FUNCIÓN DE PERDIDA, SUS ESPECIFICACIONES Y SU MÉTODO DE MEDICIÓN.

El Ing. Ezequiel Eduardo Ruiz Muñiz, especialista en CEP (Control Estadístico del Proceso) en FORD MOTOR CO., presentó en el III CONGRESO DE METROLOGIA Y CONTROL DE CALIDAD el tema: "función de perdida y sus aplicaciones" vinculándola con las diferentes características de calidad.

Al tratar lo referente a este tema, se analiza la "función de perdida" desarrollada por el Dr. G. Taguchi, la cual esta enfocada a evaluar el daño monetario que se causa a la sociedad al embarcar productos, los cuales no satisfacen completamente las necesidades de los consumidores. Esto es aplicable en todos los procesos de manufactura, ya que para cualquier característica dada, se tiene un valor nominal o ideal, el cual deberían de tener todos los productos, pero es de antemano sabido que este objetivo no puede cumplirse ya que todo proceso está sujeto a variación, generando por tanto artículos que mejor cumplen lo que el cliente requiere.

Es importante saber que existen tres tipos de "funciones de perdida" para evaluar lo anterior, asociadas al tipo de característica de calidad que se trate. Estos son: Características cuyo valor nominal es el mejor (p.ej: diámetros), características que el valor mayor es el mejor (p. ej: resistencia a la tracción) y por ultimo, características que lo deseable es el valor menor (p.ej: excentricidades).

Mediante el manejo de estas ecuaciones se puede evaluar el efecto o daño causado a la sociedad debido a la dispersión que existe entre los valores de cualquier característica.

### 3.3.3.1 Descripción de la Función de Pérdida

De acuerdo a como se mencionó en el párrafo anterior, es de antemano conocido el que en cualquier proceso de manufactura / servicio que se desarrolle, se tendrá presente el factor conocido como "variación", afectando ésta a todas las partes o productos, analizado esto desde el aspecto de manufactura. Para determinar que tan adecuado o no puede resultar para el cliente un producto, se tienen definidos unos límites o fronteras conocidos como "Límites de Especificación", comparando cada artículo contra éstos, se determinará si éste satisface lo que el cliente requiere. Si esto no sucede, el cliente sufrirá una pérdida económica.

Viendo el enfoque anterior, esquemáticamente quedara como en la figura 3. 4:

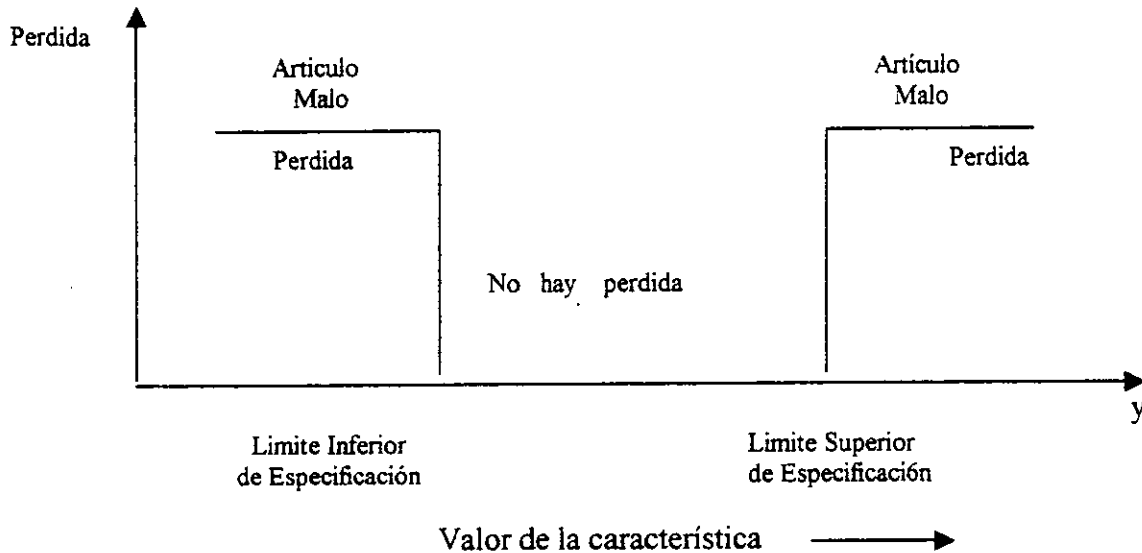


FIGURA 3.4 Interpretación de Pérdida

Analizando la grafica anterior, podríamos decir que todos los artículos que se encuentran dentro de los límites o fronteras, satisfacen igualmente las necesidades del consumidor y que los que se encuentran fuera de ellos no satisfacen estas necesidades, pero ¿Que tan diferentes pueden ser dos artículos si se encuentran pegados a un límite de especificación, pero uno de ellos estando en el lado favorable (artículo bueno) y el otro en el lado desfavorable (artículo malo)?

Contestando la interrogante anterior, se puede decir que estos artículos no son tan diferentes y que el grado de satisfacción del cliente con uno u otro artículo, no variará significativamente.

Lo antes descrito nos demuestra el enfoque del Dr. Taguchi hacia la Calidad de los Productos, el cual menciona que mientras más se apeguen los artículos o productos a un determinado valor identificado como "meta", mejor se estarán satisfaciendo las necesidades de los consumidores.

Interpretando esto gráficamente, en la figura 3.5 se tiene:

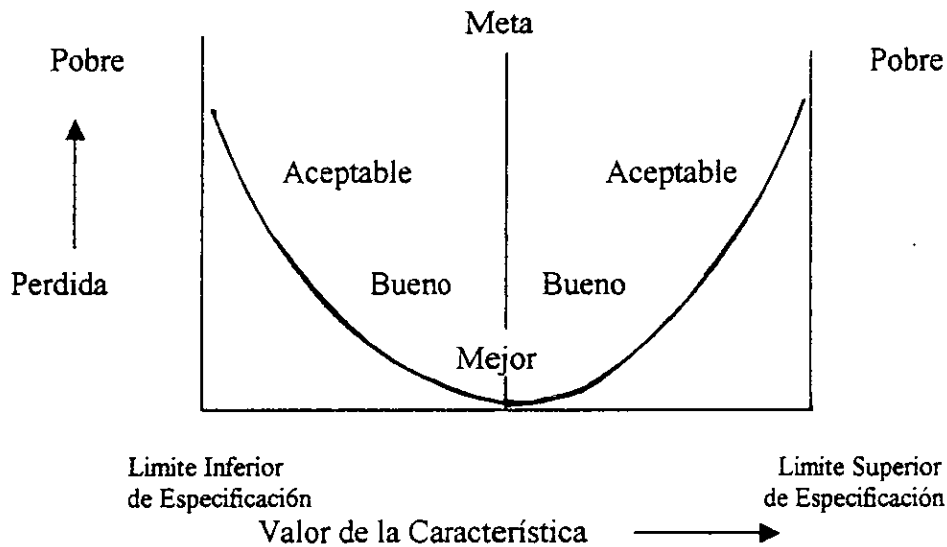


FIGURA 3.5 Interpretación de pérdida

Ahora como punto importante sería definir ¿cuál es, el valor de ese límite o frontera? y ¿Cuál es la definición más acertada de la palabra calidad y Calidad del Producto?

A continuación se presentan algunos conceptos que pueden dar respuesta a alguna de estas interrogantes:

- Límite de Especificación:

Es el punto en el cual la pérdida, si el producto es embarcado al cliente, es equivalente al costo de la mejor acción tomada si este fuera rechazado.

- Calidad.

Es la pérdida ocasionada a la sociedad a partir de que el producto es embarcado.

- Calidad del producto:

Es la uniformidad del Producto o componente alrededor de la "meta" o valor ideal, no la conformancia de este contra las especificaciones.

### 3.3.3.2 Tipos de características de calidad

Cabe citar, que no siempre se tienen características como la enunciada en la gráfica anterior, sino que habrá de otros tipos. Debe tenerse en cuenta, que la característica de calidad es la ventana a través de la cual se está en condiciones de observar el proceso. En forma general la clasificación es la siguiente:

- Características cuyo valor nominal es el mejor
- Características que el valor mayor es el mejor
- Características que el valor menor es el mejor
- Atributos
- Dinámicas

Los puntos siguientes se referirán a cada una de ellas.

#### **I. Características cuyo valor nominal es el mejor:**

Este tipo de características son aquellas en las cuales se tiene un valor "ideal" y tanto valores mayores como menores a este, no son tan adecuados (Tal es el caso de diámetros, longitudes, distancias, espesores, etc.)

La ecuación de Función de pérdida para ésta característica esta dada por:

$$L(y) = k(y-m)^2 \text{ ----- ( 3.1 )}$$

Donde:

$L(y)$  = Perdida en "pesos" cuando la característica de Calidad tiene el valor "y"

y = El valor de la característica de Calidad (p.ej: longitud, ancho, acabado superficial, etc.)

m = meta o valor ideal de la característica "y"

k = Constante

Características de la función de calidad:

- a) Cuadrática (parabólica)
- b) Mínima cuando  $y = m$

Se incrementa cuando "y" diverge de la meta o valor ideal .

Graficando lo anterior se tiene la figura 3.6



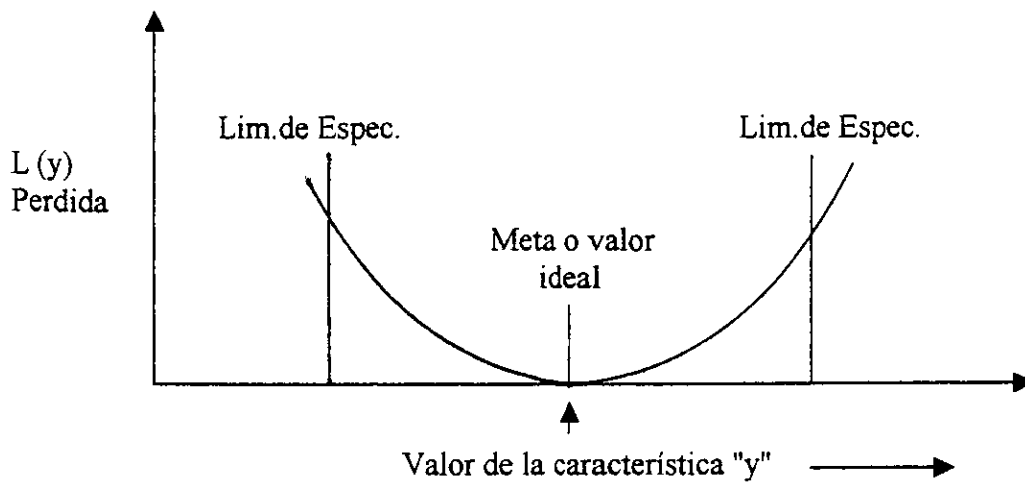


FIGURA 3.6 Función de pérdida para "nominal es mejor"

Ahora cambiando el termino "limite de especificación" por el de "tolerancia del cliente" tendremos:

$$m \pm \Delta o$$

Lo cual representa los valores máximo y mínimo que si un producto sobrepasa, la mayoría de los clientes opinan que se presenta la falla y el producto deberá ser reemplazado, reparado, etc; ocasionando un costo  $A_o$ .

De donde:

$$L(y) = k (y - m)^2$$

Si  $y = m + \Delta o$

$$A_o = k (m + \Delta o - m)^2 \quad \text{de donde} \quad k = A_o / \Delta o^2 \text{-----} (3.2)$$

Con este valor de "k", el cual es constante para una característica determinada de calidad con un valor ideal u objetivo "m", se define completamente la curva de función de pérdida de acuerdo a como se indica a continuación en la figura 3.7.

$$L(y) = A_o / \Delta o^2 (y - m)^2$$

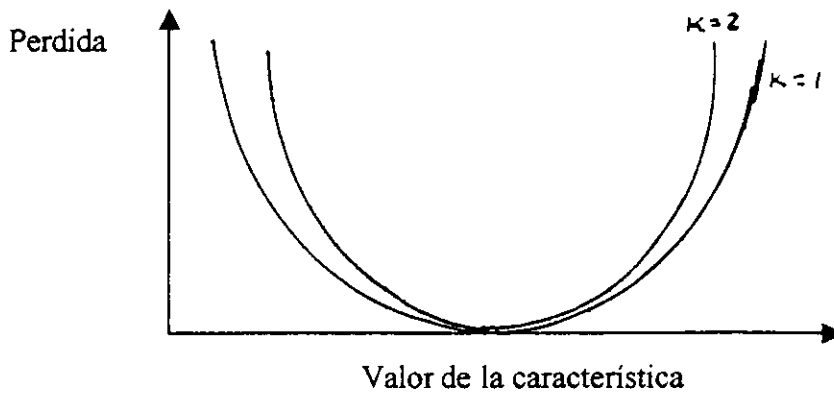


FIGURA 3.7. Curva de la función de pérdida.

Cuando se tienen varios productos

$$L(y) = k \{ (y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots + (y_n - m)^2 \} / n \text{ ----- (3.3)}$$

Como la media de la Desviación cuadrática es:

$$\text{MDC} = 1/n \{ (y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + \dots + (y_n - m)^2 \} \text{ ----- (3.4)}$$

$$\text{MDC} = \sigma^2 + (\bar{y} - m)^2$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar de la característica analizada

$\bar{y}$  = Promedio de la característica analizada

Finalmente :

$$L(y) = k(\text{MDC}) \text{ o también } L(y) = k \{ \sigma^2 + (\bar{y} - m)^2 \} \text{ ----- (3.5)}$$

## II. Características que el valor menor es el mejor

Este tipo de características son aquellas en las cuales se tiene un valor máximo determinado y todas las que se encuentren por abajo de él son mucho mejores, tal es el caso de excentricidades acabados de superficie (en la mayoría de los casos), etc

La ecuación de Función de Perdida para estas características está dada por:

$$L(y) = k y^2 \text{ ----- (3.6)}$$

Donde:

$L(y)$  = Perdida en "pesos" cuando la característica de calidad tiene el valor "y"

y = valor de la característica de calidad

k = constante.

Características de la función de calidad

- a) Cuadrática
- b) Mínima cuando  $y = 0$
- c) Decrece a medida que "y" disminuya

La figura 3.8 muestra el comportamiento de esta función.

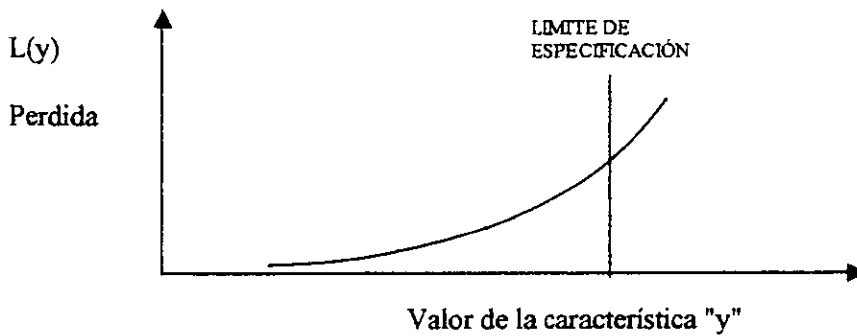


FIGURA 3.8. Grafica de la función de pérdida para Características "menor es mejor"

Si la pérdida " $L(y_0)$ " en cualquier punto  $y = y_0$  es conocida, el valor de "k" puede calcularse de:

$$k = \frac{L(y_0)}{y_0^2} \text{-----} (3.7)$$

Tomando  $\Delta_0$  como el punto a partir del cual los problemas se presentan en el campo con la pérdida  $A_0$  correspondiente:

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \text{-----} (3.8)$$

Si se tienen varios productos

$$L(y) = k \left\{ (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2) \right\} \frac{1}{n} \text{-----} (3.9)$$

Como la media de la desviación cuadrática es

$$\text{MDC} = \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2) \text{-----} (3.10)$$

$$\text{MDC} = \sigma^2 + \bar{y}^2$$

Donde :

$\sigma$  = Desviación estándar de la característica analizada

$\bar{y}$  = promedio de la característica analizada

$$L(y) = k (\text{MDC}) \text{-----} (3.11)$$

$$L(y) = k \{ \sigma^2 + \bar{y}^2 \} \text{-----} (3.12)$$

### III.- Características que el valor mayor es el mejor.

Este tipo de características son aquellas en las cuales se tiene un valor mínimo determinado y todos los que se encuentran por encima de él son mucho mejores, tal es el caso de las resistencias de materiales.

La ecuación de función de pérdida para esta característica está dada por:

$$L(y) = \frac{k}{y^2} \text{-----} (3.13)$$

Donde:

$L(y)$  = Pérdida en pesos cuando la característica de calidad tiene el valor  $y$

$y$  = El valor de la característica de calidad

$k$  = Constante

#### Características de la función de calidad

- a) Cuadrática
- b) Mínima cuando  $y \rightarrow \infty$
- c) Decrece a medida que  $y$  aumenta

La figura 3.9 presenta la forma de la función de pérdida para este tipo de variables.

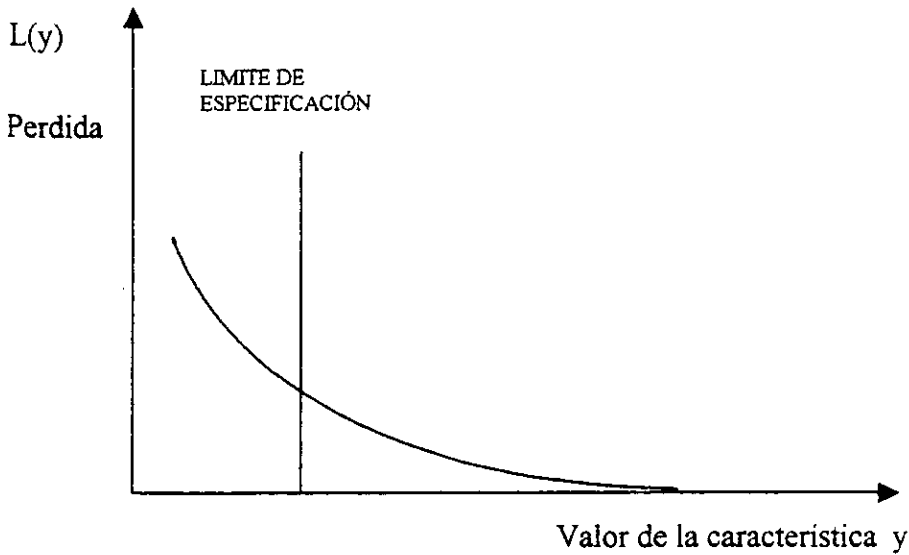


FIGURA 3.9 Grafica de la característica de calidad "mayor es mejor".

Si la pérdida de  $L(y_0)$  en cualquier punto  $y = y_0$  es conocida, el valor del coeficiente  $k$ , se puede encontrar mediante:

$$k = y_0^2 \times L(y_0)$$

El punto  $y_0$  se puede tomar como  $\Delta_0$  a partir del cual los problemas se empiezan a presentar en el campo, siendo  $A_0$  la pérdida correspondiente.

$$k = \Delta_0^2 \times A_0 \text{ ----- (3.14)}$$

Si se tienen varios productos,

$$L(y) = k \left\{ \frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right\} \frac{1}{n} \text{ ----- (3.15)}$$

Como la media de la desviación cuadrática es :

$$\text{MDC} = \frac{1}{n} \left\{ \frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right\} \text{ ----- (3.16)}$$

$$\text{MDC} = \frac{1}{\bar{y}} \left\{ 1 + 3 \frac{\sigma^2}{\bar{y}} \right\}$$

Donde :

$\sigma$  = Desviación estándar de la característica analizada.

$\bar{y}$  = Promedio de la característica analizada.

$$L(y) = k (\text{MDC}) \text{-----} (3.17)$$

$$L(y) = k \left[ \frac{1}{\bar{y}} \left\{ 1 + 3 \frac{\sigma^2}{\bar{y}} \right\} \right] \text{-----} (3.18)$$

#### IV Atributos

Los tres tipos de características de calidad previos, tratan con datos variables continuos que pueden asumir un número infinito de valores en un rango dado. La discriminación entre cualesquiera de dos resultados experimentales depende solamente de la precisión del sistema de medición. En esta categoría caen temperatura, presión, tasas de flujo, eficiencia, potencia, peso, longitud, dureza, etc;

Los datos denominados “atributos” tienen una forma discontinua que pueden asumir solamente valores discretos tales como “bueno” o “malo”; “defectuoso” o “no defectuoso” etc; aunque para propósito de análisis pueda etiquetarse uno de los resultados con el número “0” y el otro con el “1”.

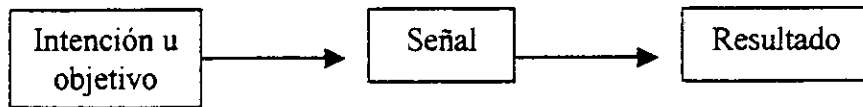
Generalmente dado que se manejan solo dos clases de “atributos” la discriminación que se puede hacer con ellos es mucho menor que la realizada con datos variables. Esto incrementa necesariamente el tamaño muestra utilizado en el diseño experimental sobre datos “atributos” si se desea una información equivalente si los datos fuesen “variables”.

En consecuencia a lo anterior, siempre que sea posible se recomienda utilizar datos variables debido al considerable ahorro al utilizar muestras pequeñas.

#### V Dinámicas

Dado una intención u objetivo, una variable de control (factor señal) debe cambiarse para alcanzarlo. Cuando existen muchas posibilidades, el factor señal debe ser cambiado varias veces en una cantidad tal que permita lograr el objetivo. Esta es la razón del concepto “dinámico”.

El siguiente modelo pretende ilustrar el comportamiento de este tipo de características:



Como quedó asentado en la introducción, este tipo de variables no será considerado para efectos de este trabajo.

### 3.3.4 Selección de factores o interacciones a evaluar.

La determinación de qué factores se van a investigar, depende de las características de desempeño del producto o del proceso o respuestas de interés. El consumidor quien eventualmente usa un producto, espera o necesita alguna función específica del producto. Si durante el estado de desarrollo de un producto la función no es proporcionada, las características de desempeño tendrán que ser mejoradas durante su manufactura.

Usualmente se usan varios métodos para determinar cuales factores se incluirán en el experimento inicial. Estos son :

- Tormenta de ideas.
- Diagramas de flujo (especialmente para procesos)
- Diagramas causa - efecto.

La tormenta de ideas es una actividad que permite conjuntar a un grupo de gente asociada con el problema particular y solicitar su consejo relacionado a la investigación. Aquí es muy importante traer expertos en productos y procesos así como gente estadísticamente orientada para discutir los factores y la estructura del experimento.

Los diagramas de flujo son particularmente usados en la determinación de los factores que afectan los resultados del proceso. Los flujogramas, agregan alguna estructura al proceso pensado y entonces pueden evitar la omisión de factores importantes. Un ejemplo de un diagrama de flujo para un problema de fundición involucra los pasos que se muestran en la figura 3.10. Los factores sugeridos para el diagrama de flujo son:

Vaciado de la colada	Temperatura del metal. Velocidad de vaciado. Química del metal.
Enfriado en molde	Tiempo en el molde. Temperatura ambiente del molde.
Agitación de la colada	Intensidad de la vibración. Tiempo de vibración.
Enfriamiento en aire	Temperatura ambiente Tasa de flujo de aire
Inyección	Intensidad de la inyección Tiempo de la inyección

El problema observado al final del proceso de fundición fue que un porcentaje de la colada estaba agrietada en varios sitios. Los factores que se incluyen en un experimento deben ser aquellos que se piensa son relevantes al problema de fracturas en la colada.

Todos los factores que se piensa tienen influencia en el desempeño de una característica funcional deben incluirse en un ciclo inicial de experimentación. Es mejor tener muchos factores en pocos niveles para iniciar la experimentación. El propósito de este primer estado de la experimentación es determinar y eliminar aquellos factores que no sean relevantes y encontrar aquellos pocos (Pareto) que si lo sean y contribuyan a resolver el problema de un producto o mejoren su calidad.

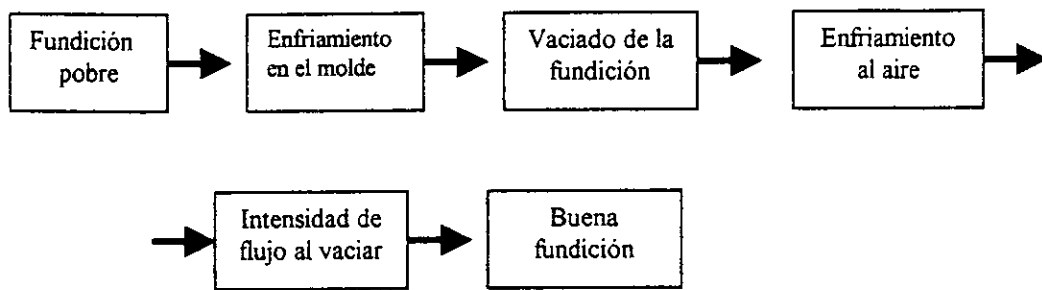


FIGURA 3.10 Diagrama de flujo del proceso de fundición

El diagrama Causa - Efecto inicia con el efecto básico que nos interesa investigar y se desarrolla hacia las causas que pueden ser las que lo originan. Causas primarias, secundarias y hasta terciarias son ramificadas partiendo del tronco principal del "árbol de efectos". El ciclo de mejoramiento continuo exige encontrar la(s) causa(s) raíz. La figura 3.11 se utiliza para representar el problema de fundición antes descrito.





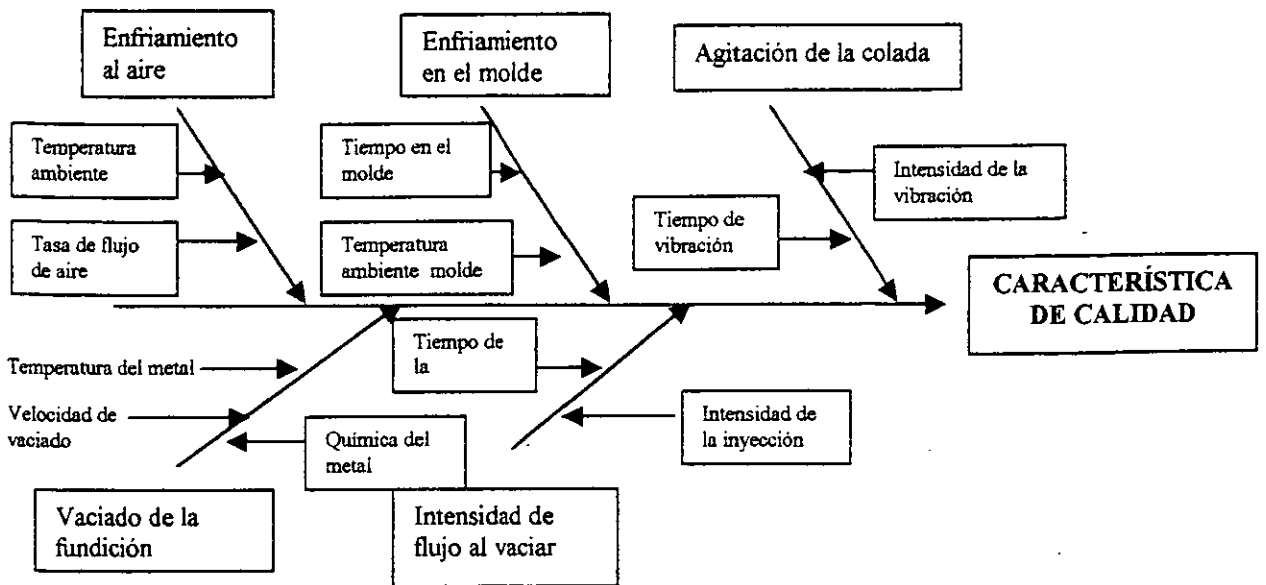


FIGURA 3.11- Diagrama causa - efecto para el proceso de fundición

Otra vez, la selección de factores que deben incluirse en el experimento, depende de que tanto puedan intervenir como causales de las fracturas en la fundición. Después de seleccionar los factores, cualquier interacción que sea de interés debe anotarse. En los casos presentados en esta tesis, se aplica la reproducibilidad, es decir, se repite cada tratamiento por dos o más veces según las facilidades para este efecto y el costo asociado, reduciendo así la posibilidad de confundir los efectos interactivos con los efectos principales, al mismo tiempo que soslayamos la introducción de un arreglo ortogonal externo, que al menos de manera experimental y transitoria, exige controlar los factores de ruido, lo que de alguna manera complica la experimentación al tener que obtener datos con la combinación de niveles de ambos: factores de control y de ruido lo cual va en contra del objetivo central de este trabajo. Se necesita no tanto enfatizar la selección de los factores, sino más bien respetar la estructura propia del diseño experimental, el cual es un conocimiento universal aplicable a un amplio rango de productos y procesos. Al integrar la estrategia de Taguchi, se logran resultados efectivos de mejora.

El siguiente ejemplo propone los arreglos interno para los factores controlables A, B, y C ; y externo para factores de ruido R, S y T; con dos niveles cada uno.

			Arreglo ortogonal externo			
			Factores de ruido			
			R	S	T	
Arreglo ortogonal interno			1	1	2	2
Factores controlables			1	2	1	2
A	B	C	1	2	2	1
1	1	1	Y11	Y12	Y13	Y14
1	2	2	Y21	Y22	Y23	Y24
2	1	2	Y31	Y32	Y33	Y34
2	2	1	Y41	Y42	Y43	Y44

### 3.3.5.- Selección del número de niveles

Una ronda inicial de experimentación debe involucrar muchos factores de pocos niveles; dos son recomendados para minimizar el tamaño del experimento inicial.

Recuérdese que el número de grados de libertad para un factor es el número de niveles menos uno; incrementando el número de niveles para un factor, incrementamos el total de grados de libertad para el experimento, el cual es una función directa del número total de pruebas. Un grado de libertad para cada factor, minimiza el número total de pruebas. La ronda inicial de experimentación, debe eliminar muchos factores en discusión y los pocos remanentes pueden entonces investigarse con niveles múltiples sin causar una excesiva inflación en el tamaño del experimento al incrementar costos o tiempo. La experiencia en los casos en que se aplicó la estrategia de Taguchi para presentar este trabajo, demuestran que con dos niveles se obtienen resultados si no óptimos, si benéficos para los procesos en que se experimentó.

Se debe tener presente que existen dos clases de parámetros que pueden influir en la respuesta de un producto, parámetros continuos y parámetros discretos. Los primeros pueden asumir cualquier valor en un rango dado, dependiendo de la precisión del instrumento de medición. Temperatura, velocidad, presión, son ejemplos de este tipo de parámetros, mientras que los discretos pueden asumir solo valores particulares, tales como “apagado” - “encendido”, material A, B o C; número de cilindro de máquina 1, 2, 3 o 4.

Si se usan parámetros continuos, entonces el experimento inicial debe ser en dos niveles solamente; usando la extrapolación o interpolación para predecir otros niveles. En cambio si usamos parámetros discretos, la extrapolación y la interpolación pueden no tener sentido.

Por ejemplo, es posible el uso en la prueba de tres diferentes materiales en un proceso y no existe forma para interpolar o extrapolar para predecir resultados de un cuarto material. Si estamos estudiando parámetros discretos, entonces se pueden requerir más de dos niveles para el experimento inicial.

### 3.3.6 Selección de un arreglo ortogonal

La selección de cual arreglo ortogonal se usará depende de dos aspectos :

1. El número de factores e interacciones de interés.
2. El número de niveles para los factores de interés.

Estos dos aspectos determinan el total de grados de libertad requeridos para el experimento completo. Recordemos que los grados de libertad para cada factor es el número de niveles menos uno.

$$V_A = k_A - 1 \dots \dots \dots (3.19)$$

Los grados de libertad para una interacción es el producto de los grados de libertad de los factores interactuantes.

$$V_{A \times B} = (V_A) (V_B) \dots \dots \dots (3.20)$$

Los mínimos grados de libertad requeridos en el experimento es la suma de todos los grados de libertad tanto de los factores como de las interacciones.

**Arreglos ortogonales** (OA<sub>s</sub>, por sus siglas en inglés). Se anexan al término de esta unidad una clase básica de arreglos ortogonales: Los que contienen arreglos de dos niveles, en los cuáles centraremos este trabajo, nominados L<sub>4</sub>, L<sub>8</sub>, L<sub>12</sub>, L<sub>16</sub> y L<sub>32</sub>.

El número en la designación de los arreglos indica el número de pruebas o tratamientos en el arreglo; por ejemplo un L<sub>16</sub> tiene 16 pruebas o tratamientos. El total de grados de libertad disponible en un OA es igual al número de pruebas menos uno.

$$V_{LN} = N - 1 \dots \dots (3.21)$$

**Selección de un OA.**- Cuando un particular OA es seleccionado para un experimento debe satisfacerse la siguiente ecuación :

$$V_{LN} > V \text{ requerido para factores e interacciones}$$

El número de niveles usado en los factores debe corresponder con los niveles del OA; sean estos 2 o 3 niveles. Si se diera el caso de que algún factor fuera de 2 niveles y otro de 3, entonces los factores que tengan más frecuencia (respecto de sus niveles) indicará la clase de OA a utilizar. Esta situación requiere una modificación al proceso de asignación fuera de las aspiraciones de este trabajo.

Una vez que la decisión se hace entre un OA de dos o de tres niveles, entonces el número de tratamientos o pruebas para esa clase de arreglo debe proveer un total adecuado de grados de libertad. Muchas veces los grados de libertad requeridos caerán entre los grados de libertad correspondientes a dos clases de OAs. Debe seleccionarse el más grande de ellos.

Ocasionalmente, las interacciones a evaluarse requerirán el uso de un mayor OA. Por ejemplo, si se desean 4 efectos principales y dos interacciones, AxB y CxD, entonces no será apropiado aplicar un L<sub>8</sub> puesto que puede causar confusión entre las respuestas a las interacciones. La gráfica lineal requerida para esta prueba debe presentarse como dos líneas paralelas, pero la gráfica lineal de un L<sub>8</sub> no está estructurada de esta manera. Una gráfica lineal L<sub>16</sub> tipo (e) (ver anexo 1) debe ser la más apropiada si las interacciones AxB y CxD deben estar separadas.

Una vez que el arreglo ortogonal ha sido seleccionado, los factores y las interacciones pueden asignarse a las diferentes columnas.

### **3.3.7. Asignación de factores e interacciones.**

Antes de entrar a detallar algunos métodos para hacer la asignación de los factores y las interacciones, se presenta una propiedad de los arreglos ortogonales. Estos arreglos tienen varias columnas disponibles para la asignación de factores y algunas columnas subsecuentemente pueden estimar los efectos de interacciones entre estos factores.

Demostración de columnas de interacción. El más simple OA es un L<sub>4</sub>, el cual tiene el arreglo mostrado en la tabla 3.6. Un experimento de 2 factores puede adaptarse al OA L<sub>4</sub>. El factor A puede asignarse a la columna 1 y el factor B a la columna 2. La primera prueba o tratamiento entonces representa la condición A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> cuyos resultados son 6 y 8. La prueba 2 representa la condición A<sub>1</sub>B<sub>2</sub> cuyos resultados son 7 y 8 como podemos observar en dicha tabla donde se presenta el experimento completo.

Prueba No	Factores			Datos y (RB* - 70)
	A	B	Columna No	
	1	2	3	
1	1	1	1	6 8
2	1	2	2	7 8
3	2	1	2	3 4
4	2	2	1	9 10

\* Grados codificados de dureza Rockwell, grado B.

TABLA 3.6 Arreglo ortogonal L<sub>4</sub> con datos de fundición

### ANOVA del arreglo ortogonal L<sub>4</sub> de Taguchi.

Típicamente los OAs son analizados de la misma manera que en otros experimentos con diferente estructura. Para el ejemplo representado en la tabla 3.6 tenemos:

$$SST = 40.875$$

$$SS_A = 1.125$$

$$SS_B = 21.125$$

$$SS_{A \times B} = 15.125$$

$$Sse = 3.5$$

Los correspondientes cálculos se presentan a continuación con base en los datos codificados de la tabla 3.6 presentados de manera sumaria como sigue:

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	Total
B <sub>1</sub>	6,8	3,4	21
B <sub>2</sub>	7,8	9,10	34
Total	29	26	Gran Total 55

De aquí tenemos los siguientes valores:

$$A_1 = 29 \quad B_1 = 21 \quad T = 55$$

$$A_2 = 26 \quad B_2 = 34$$

$$n_{A_1} = 4 \quad n_{B_1} = 4 \quad N = 8$$

$$n_{A_2} = 4 \quad n_{B_2} = 4$$

La variación total es :

$$SS_T = \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \dots \dots \dots (3.22)$$

Sustituyendo:

$$SS_T = 6^2 + 8^2 + 3^2 + \dots + 9^2 + 10^2 - \frac{55^2}{8} = 40.875$$

La variación debido al factor A puede calcularse de dos formas: general y simplificada. La formula general para cualquier número de niveles del factor A es :

$$SS_A = \left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} = \frac{A_1^2}{n_{A_1}} + \frac{A_2^2}{n_{A_2}} + \dots + \frac{A_k^2}{n_{A_k}} - \frac{T^2}{N} \dots (3.23)$$

Para solamente dos niveles:

$$SS_A = \frac{A_1^2}{n_{A_1}} + \frac{A_2^2}{n_{A_2}} - \frac{T^2}{N} = \frac{29^2}{4} + \frac{26^2}{4} - \frac{55^2}{8} = 1.125$$

Nótese que en este cálculo, la suma de los numeradores de los términos positivos (sin considerar el exponente) es igual al numerador del término negativo. De manera similar, la suma de los denominadores de los términos positivos es igual al denominador del termino negativo. Es decir:

$$29 + 26 = 55 \quad \text{y} \quad 4 + 4 = 8$$

Si estas condiciones se satisfacen, particularmente cuando el experimento solo considera dos niveles y los tamaños de muestra son iguales, la ecuación general puede simplificarse a la siguiente formula especial:

$$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N} \dots \dots \dots (3.24)$$

Sustituyendo:

$$SS_A = \frac{(29 - 26)^2}{8} = \frac{3^2}{8} = 1.125 \text{ resultado igual al obtenido con la formula (3.23)}$$

De manera similar la variación debido al factor B es :

$$SS_B = \frac{(B_1 - B_2)^2}{N} = \frac{(21 - 34)^2}{8} = 21.125$$

Cuando la variación debido al factor A se calculó los datos se organizaron de la siguiente forma, donde cada valor es obtenido de 4 observaciones.

A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
29	26

De manera similar para calcular la variación del factor B se organizaron como sigue:

B <sub>1</sub>	21
B <sub>2</sub>	34

Ahora, para calcular la variación debida a la interacción de los factores A y B, los datos se organizarán de la siguiente forma:

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
B <sub>1</sub>	14	7
B <sub>2</sub>	15	19

Donde 2 observaciones simples contribuyen aditivamente para cada total.

También se dispone de dos métodos para calcular la variación debida a la interacción: uno general para cualquier número de niveles de los factores y uno específico para solamente factores con 2 niveles.

**Fórmula general.** Sea  $(AxB)_i$  la suma de datos bajo la  $i$ -ésima condición de las combinaciones posibles de A y B. Sea también  $c$  el número de posibles combinaciones que originan interacciones entre los factores y sea  $n_{(AxB)_i}$  el número de observaciones simples bajo esta condición. Entonces:

$$SS_{AxB} = \left[ \sum_{i=1}^c \left( \frac{(AxB)_i^2}{n_{AxB_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \dots \dots \dots (3.25)$$

Para el ejemplo que se ha estado analizando tenemos:

$$A_1B_1 = (AxB)_1 = 14$$

$$A_2B_1 = (AxB)_2 = 7$$

$$A_1B_2 = (AxB)_3 = 15$$

$$A_2B_2 = (AxB)_4 = 19 \quad c = 4$$

Sustituyendo:

$$SS_{AxB} = 14^2/2 + 7^2/2 + 15^2/2 + 19^2/2 - 55^2/8 - 1.125 - 21.125 = 15.125$$

Se observa que cuando las diversas combinaciones son sumadas, elevadas al cuadrado y divididas por el número de datos puntuales para cada combinación, el valor resultante también incluye los efectos de los factores principales, los cuales deben ser restados. Cuando los efectos interactivos son calculados usando la fórmula general, todas las interacciones de orden inferior y los efectos de los factores deben ser restados.

**Fórmula específica:** Para la obtención de los efectos principales de los factores A y B, los datos fueron sumados verticalmente para obtener el efecto del factor A y horizontalmente para obtener el efecto del factor B como quedó asentado en las tablas correspondientes.

En un experimento de dos factores en dos niveles, puede obtenerse el efecto de la interacción mediante una de las sumas de sus diagonales, a saber:

$$A_1 B_1 + A_2 B_2 = \underline{AxB_1}$$

$$A_1 B_2 + A_2 B_1 = \underline{AxB_2}$$

Puesto que se realiza una comparación de dos grupos, puede aplicarse la fórmula específica:

$$SS_{AxB} = \frac{(AxB_1 - AxB_2)^2}{N} \dots\dots\dots (3.26)$$

Sustituyendo:

$$SS_{AxB} = \frac{(33 - 22)^2}{8} = 15.125$$

Note que este método incluye el efecto interactivo solamente. Las interacciones de orden inferior y los efectos principales de los factores no necesitan ser restados.

El más fácil método para calcular la variación debida al error experimental en este caso y aún en ANOVAs más complejos utiliza la expresión:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AxB} + SS_e \dots\dots\dots (3.27)$$

De donde:

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \dots\dots\dots (3.28)$$

Sustituyendo datos del ejemplo:

$$SS_e = 40.875 - 1.125 - 21.125 - 15.125 = 3.500$$

En los casos presentados en el capítulo 4, para el objetivo de hacer lo más accesible la aplicación de los métodos Taguchi, se usarán en lo posible las fórmulas simplificadas presentadas anteriormente.

Como quedó explicado anteriormente, el ANOVA para un OA se realiza mediante el calculo de la suma de cuadrados para cada columna. Así para el factor A tenemos:

$$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N}$$

A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> son las sumas de los datos asociados con el primer y segundo nivel del factor A respectivamente. Así:

$$A_1 = 6 + 8 + 7 + 8 = 29$$

$$A_2 = 3 + 4 + 9 + 10 = 26$$

$$SS_A = 1/8 (29 - 26)^2 = 1.125$$

La suma de cuadrados para B, columna 2, se calcula de la misma manera

$$B_1 = 6 + 8 + 3 + 4 = 21$$

$$B_2 = 7 + 8 + 9 + 10 = 34$$

$$SS_B = 1/8 (21 - 34)^2 = 21.125$$

Obsérvese que la suma de cuadrados para la columna 3 es :

$$SS_3 = 1/8 (33 - 22)^2 = 15.125$$

Note que este valor es igual al que se obtuvo para  $SS_{A \times B}$  en el experimento factorial completo lo cual no es una coincidencia sino más bien es una propiedad de los OAs. El cálculo es una demostración, no una prueba, de que la tercer columna representa la interacción de los factores asignados a la primera y segunda columna. En la siguiente sección se presentará un par de herramientas para asignar factores e interacciones a las columnas del OA.

El valor de  $SS_T$  también se puede obtener de la expresión:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{(y_{..})^2}{ab} \dots \dots \dots (3.29)$$

La cual es equivalente a la expresión (3.22) y solo cambia la notación.

$$SST = (6^2 + 8^2 + \dots + 9^2 + 10^2) - \frac{(55)^2}{8} = 40.875$$

El OA  $L_4$  tiene dos factores asignados lo cual es equivalente al experimento factorial completo y su ANOVA es equivalente al ANOVA de dos vías porque una de sus columnas en OA representa la interacción de las otras dos columnas.

**Localización de columnas de interacción.**- Taguchi proporciona dos herramientas para ayudar en la asignación de factores e interacciones al arreglo ortogonal.

1. Gráficas lineales
2. Tablas triangulares

Cada OA tiene un conjunto particular de gráficas lineales y tabla triangular asociada con él. La gráfica lineal indica varias columnas a las cuales pueden asignarse los factores y las columnas siguientes evalúan la interacción de esos factores. En el ejemplo de fundición presentado anteriormente se demuestra que la interacción de un factor asignado a la columna 1 y el factor asignado en la columna 2 se evalúa en la columna 3. Las tablas triangulares contienen todas las posibles interacciones entre factores (columnas). También, estas gráficas lineales y tablas triangulares se incluyen al final de este trabajo en el ANEXO 1 para cada arreglo OA de dos niveles.



**Gráficas lineales (OAs dos niveles).** El más simple OA, un  $L_4$ , tiene una gráfica lineal que aparece en la figura 3.12. Recuerde que el OA  $L_4$  tiene 4 pruebas y tres columnas. La gráfica lineal indica que el factor A puede asignarse a la columna 1, el factor B a la columna 2 y la interacción  $A \times B$  por consiguiente en la columna 3. Los puntos representan una columna disponible para un factor en dos niveles el cual tiene un grado de libertad. La línea representa una columna en la cual se evaluará la interacción de los factores asignados a los respectivos puntos. La interacción tiene también un grado de libertad en este caso.

La siguiente gráfica lineal corresponde a un OA  $L_8$ . Existen dos gráficas lineales indicando distintos modos de asignar los diferentes factores y varias interacciones a las distintas columnas. Por ejemplo en la gráfica lineal tipo b, los factores A, B, C y D pueden asignarse a las columnas 1, 2, 4 y 7 respectivamente. Esto coloca la interacción  $A \times B$  en la columna 3, la  $A \times C$  en la columna 5 y la  $A \times D$  en la columna 6. La otra gráfica lineal proporciona un arreglo alternativo con otras asignaciones de las interacciones.

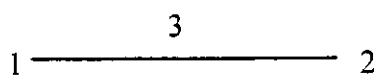


FIGURA 3.12 Gráfica lineal  $L_4$

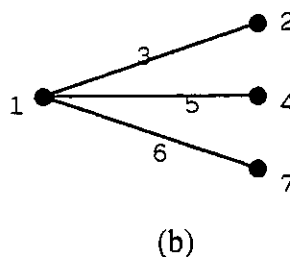
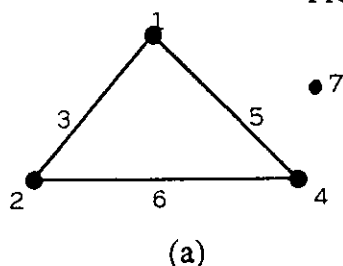


FIGURA 3.13 Gráfica lineal  $L_8$

### Tablas triangulares (OAs dos niveles)

Las tablas triangulares listan todas las posibles interacciones que pueden existir para un arreglo ortogonal dado. Una tabla triangular  $L_4$  se muestra en la tabla 3.7. El primer factor asignado a un OA puede actualmente colocarse en cualquier columna, la columna dos por ejemplo. El segundo factor puede asignarse a cualquier otra columna, la columna 3 por ejemplo. Si el factor A es asignado a la columna 2 y el factor B a la columna 3, la tabla triangular indica que la interacción  $A \times B$  debe estar en la columna 1 como se muestra en la tabla 3.8. La tabla triangular muestra que las tres columnas son mutuamente interactivas; 1 y 2 interactúan con 3; 2 y 3 interactúan con 1; y 1 y 3 interactúan con 2. Cualquier asignación de factores A y B es matemática y estadísticamente equivalente. Todas las gráficas lineales y tablas triangulares para OAs en dos niveles funcionan de esta misma manera. Note que la más pequeña gráfica lineal y tabla triangular, son solo una fracción de gráficas lineales y tablas triangulares mayores.

Columna	2	3
1	3	2
2		1

TABLA 3.7 Tabla triangular  $L_4$

		A	AxB
	Columna	2	3
B	1	3	2
	2		1

TABLA 3.8 Tabla triangular  $L_4$  con factores asignados

De manera similar, existen gráficas lineales y tablas triangulares para arreglos ortogonales con factores en 3 niveles. Por salirse del propósito de estos apuntes que como se ha dicho desde el principio pretenden ser para aplicación práctica y también para un curso introductorio, no se presentan, y en su caso se deja al alumno su consulta en las referencias bibliográficas.

Los puntos que hacen falta, de este esquema previamente presentado, a saber: la conducción del experimento, el análisis de los resultados experimentales y la confirmación del experimento, se enfatizarán en el capítulo siguiente al aplicar la metodología de Taguchi a casos reales. De hecho, la diferencia respecto del diseño de experimentos que conocemos es mínima.

### 3.4 EL DISEÑO DE TOLERANCIAS

En esta parte se considera la situación en que el sistema está diseñado completamente y que se han obtenido los valores óptimos de los parámetros de los elementos (componentes). En estas condiciones, el paso siguiente es determinar las tolerancias de cada parámetro si la reducción de la variación que se logra por medio del diseño de parámetros no es suficiente, es decir, debe definirse el rango permisible de desviación en el valor de los parámetros que influyen de manera sustancial sobre la variación de rendimiento. Se sabe que un intervalo estrecho hará más caro el producto debido al incremento en los costos del proceso de manufactura, por otro lado, el ampliar el intervalo impactará en las funciones del producto.

En este paso se pretende determinar la más económica tolerancia, aquella que minimiza el costo del producto para desviaciones tolerables respecto de los valores objetivos, considerando no solo los costos del proveedor que con frecuencia incluyen la compra de nuevos materiales, componentes y maquinaria de mejor calidad, sino además aquellos en puede llegar a incurrir el cliente o usuario del producto.

### 3.4.1 LIMITES FUNCIONALES Y TOLERANCIAS

Considérese el problema de colocar una hoja de vidrio dentro del marco de una ventana o en un automóvil. Ambos, la hoja de vidrio y el marco tienen dimensiones especificadas y tolerancias. Aquí se supone que las dimensiones del marco son nominales y se centra el esfuerzo en determinar las tolerancias para la hoja de vidrio. Las dimensiones de cada marco son diferentes, pero necesitamos considerar solamente el valor nominal dado por el punto LD<sub>50</sub> (punto en el cual el 50% de los consumidores con diferentes tolerancias no comprarán).

Supóngase que las dimensiones de la hoja de vidrio puede variar. Si está demasiado grande la hoja no ajustará en la ventana y si es demasiado pequeña se hundirá y seguramente se romperá. Sea  $m_1$  la dimensión en que la hoja caería y  $m_2$  la que la hace demasiado grande. Existen dimensiones como estas tanto en lo ancho como en lo alto, pero por simplicidad este análisis se refiere exclusivamente a lo ancho. Sea  $m$  la media de  $m_1$  y  $m_2$ , y  $\Delta_0$  la mitad de la diferencia entre ellas.

$$\text{O sea: } m = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \quad \text{----- (3.30)}$$

$$\Delta_0 = \frac{1}{2}(m_2 - m_1) \quad \text{----- (3.31)}$$

El rango de tolerancia del consumidor para el ancho de esta hoja de vidrio es por consiguiente  $m \pm \Delta_0$  ----- (3.32)

Aunque  $\pm \Delta_0$  es la tolerancia para el usuario de la hoja de vidrio, no debe ser la misma que la tolerancia observada por el fabricante, quien corta las hojas, o el detallista que las vende.

Esto se debe a que la pérdida que ocurre cuando la hoja de vidrio es comprada y trasladada al sitio donde se instalará y no ajusta a la ventana, implica un nuevo corte o la compra de otra hoja de diferente tamaño. Pérdida que incluye el costo del transporte del detallista al lugar de instalación y regresar nuevamente. La hoja de vidrio puede costar solo \$300.00 el transporte viaje redondo puede llegar a superar significativamente esta cantidad.

Sea  $y$  el ancho de la hoja de vidrio y sea  $L(y)$  la función de pérdida la cual quedó expresada como:

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad \text{----- (3.33)}$$

donde  $m$  es el valor más deseable o valor objetivo.

Cuando la dimensión está en el valor ideal  $m$ , la pérdida  $L(m)$  es cero

Sea  $A_0$  la pérdida promedio en que se incurre si la hoja de vidrio sale demasiado ancha y tiene que ser recortada o demasiado angosta que sea inservible. Esta pérdida  $A_0$  ocurre cuando

$(y - m)$  es  $\Delta_0$ , tal que el coeficiente  $k$  puede ser estimado como sigue:

$$k = A_0 / \Delta_0^2 \quad \text{----- (3.34)}$$

La tolerancia  $\Delta$  de la hoja de vidrio puede determinarse si conocemos la pérdida A en que se incurre en el lugar donde la hoja de vidrio es cortada, cuando no se hace conforme a la tolerancia. Con estos datos, sustituyendo A y k en al función de pérdida, tenemos:

$$L(y) = (A_0/\Delta_0^2) (y - m)^2 \text{ -----(3.35)}$$

Sustituyendo A en el lado izquierdo y resolviendo para  $\Delta = |y - m|$ ; tenemos:

$$A = A_0/\Delta_0^2 \times \Delta^2 \text{ ----- (3.36)}$$

De donde despejando tenemos:

$$\Delta = \sqrt{A/A_0} \times \Delta_0 \text{ -----(3.37)}$$

Con esto, supóngase que la pérdida  $A_0 = \$1500$  en que se incurre cuando la hoja de vidrio se regresa por tener dimensiones erróneas desde el sitio de instalación, sea asimismo el rango de tolerancia  $\Delta_0 = 3$  mm y sea A de \$300, costos adicionales que debería hacer el fabricante para asegurar que la hoja de vidrio satisfacen las especificaciones. En estas condiciones la tolerancia está dada como sigue:

$$\Delta = \sqrt{300/1500} \times 3 = 1.34 \text{ mm} \text{ -----(3.38)}$$

Obsérvese que esta tolerancia del fabricante es más estricta que la del cliente. O sea que mientras que las especificaciones del cliente son  $m \pm 3$  mm, las del fabricante son  $m \pm 1.34$  mm.

### 3.4.2 LA TOLERANCIA Y EL NIVEL REAL DEL PROCESO

Suponga ahora que las dimensiones actuales de un conjunto de hojas de vidrio cortadas en la fábrica son las siguientes( desviaciones respecto del valor objetivo):

0.3, 0.6, -0.5, -0.2, 0.0, 1.0, 1.2, 0.8, -0.6, 0.9, 0.0, 0.2, 0.8, 1.1, -0.5, -0.2, 0.0, 0.3, 0.8, 1.3

Para encontrar la pérdida debido a la variabilidad, encontramos la desviación media cuadrática MSD respecto del valor objetivo y sustituimos dentro de la función de pérdida.

$$\sigma^2 = 1/20 ( 0.3^2 + 0.6^2 + \dots + 1.3^2 ) = 0.4795 \text{ mm}^2 \text{ ----- (3.39)}$$

Usando este promedio en la formula 4.6 tenemos :

$$L(y) = A_0/\Delta_0^2 \times \text{MSD} = 1500/3^2 \times 0.4795 = \$79.9 \text{ -----(3.40)}$$

La dimensión promedio de estas hojas de vidrio es 0.365, ligeramente sobre el lado mayor. Esta situación puede evaluarse construyendo una tabla ANOVA. Como se ha usado, S (suma de cuadrados) denota variación y f grados de libertad.

Puesto que:

$$S_T = 0.3^2 + 0.6^2 + \dots + 1.3^2 = 9.59 \quad (f = 20) \dots \dots \dots (3.41)$$

$$S_m = \frac{1}{20} (0.3 + 0.6 + \dots + 1.3)^2 = \frac{7.3^2}{20} = 2.66 \quad (f = 1) \dots \dots \dots (3.42)$$

$$S_e = S_T - S_m = 9.59 - 2.66 = 6.93 \quad (f = 19) \dots \dots \dots (3.43)$$

Entonces la tabla ANOVA se presenta como sigue:

Fuente	f	S	V	F <sub>0</sub>	S'	p (%)
M	1	2.66	2.66	7.29	2.295	23.9
e	19	6.93	0.365		7.295	76.1
T	20	9.59	0.4795		9.590	100.0

Esta tabla indica que el valor medio es demasiado grande en relación al valor medio del intervalo de tolerancia (valor objetivo), resultando en una variancia incrementada, un costo también incrementado debido a la variabilidad. Frecuentemente es un asunto técnicamente simple ajustar el valor medio al valor objetivo. Si se hace esto, la variancia  $\sigma^2$  debe ser aproximadamente igual a la variancia del error experimental  $V_e$  en la tabla. El valor de la función de pérdida entonces es :

$L(y) = 166.7 \times 0.365 = \$60.8$  en comparación con el resultado de la fórmula 4.11, esto es una mejora de la calidad por hoja de vidrio de :

$$79.9 - 60.8 = \$19.1$$

Si se producen 100 000 hojas de vidrio por mes, la mejora de la calidad mensual alcanzará la cantidad de \$1.91 millones.

El esfuerzo para ajustar el valor medio al valor objetivo no requiere ninguna herramienta especial. Todo lo que requiere es el uso de una regla para comparar el valor real del producto con el valor objetivo de vez en vez, o aplicar el CEP para efectuar de manera continua un monitoreo del mismo.

Si el intervalo de ajuste base para hacer la comparación es cambiado, entonces ambos, la media y la variancia pueden ser cambiados. Esto es una cuestión del ciclo de calibración, elemento fundamental de la metrología en el control de calidad. En cada caso deben obtenerse datos suficientes y construir una tabla ANOVA similar a la presentada anteriormente, calcular entonces la función de pérdida y entonces decidir el ciclo de calibración óptimo.

### 3.4.3 CAPACIDAD DE PROCESO INADECUADA

Se ha estudiado la colocación de tolerancias en especificaciones de productos, y se encontró que son necesarios 3 parámetros. En lo que sigue, por conveniencia, se suponen tolerancias simétricas. (los cálculos se realizan de manera similar cuando son asimétricas).

Estos 3 parámetros son:

$\Delta_0$  = Tolerancia del consumidor

$A_0$  = Costo a la sociedad (al menos al consumidor) cuando la tolerancia se excede

$A$  = Costo del fabricante cuando el producto es rechazado (en planta)

Se considera necesaria una explicación más detallada del parámetro  $A$ . Si  $A$  se conoce, entonces la tolerancia del fabricante (la que se establece en los dibujos o formulaciones)  $\Delta$ , está dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta = \sqrt{A/A_0} \times \Delta_0 \text{ ----- (3.44)}$$

Con el valor de  $A$  surgen ciertas dificultades cuando la capacidad del proceso es inadecuada. Sin reparar en la tolerancia, si un artículo no conforme puede ser retrabajado y recuperarlo satisfactoriamente a un costo promedio  $A$ , entonces  $A$  es el costo de recuperación y puede ser así utilizado en la fórmula 3.26. En algunos casos sin embargo, los artículos que no satisfacen los límites de tolerancia  $\Delta$  tienen que ser desechados, de modo que se da la situación de que la nueva pieza que se fabrique para sustituir a la rechazada, sea también rechazada.

Sea  $q$  la proporción de artículos que satisfacen una tolerancia dada  $\Delta$ , tal que  $q$  es a la vez función del valor de  $\Delta$ . Si la tasa de productos satisfactorios es solamente el 50% para un cierto valor de  $\Delta$ , entonces existe solamente un 50% de oportunidad que el artículo fabricado para reemplazo sea aceptado. El costo de hacer un artículo no conforme entonces se duplica de  $A$ , a

2A. En general, en un proceso donde los productos no conformes deben ser convertidos en desecho, la tolerancia  $\Delta$ , indicada en los dibujos o en las formulaciones, es la solución a la siguiente ecuación:

$$\Delta = \sqrt{\frac{A/q}{A_0}} \times \Delta_0$$

Puesto que  $q$  es función de  $\Delta$ , podemos poner  $q(\Delta)$ , por lo que la ecuación 4.16 se convierte en no lineal.

Si el valor de la característica de calidad,  $y$ , esta normalmente distribuida con media  $m$  coincidiendo con el valor objetivo y desviación estándar  $\sigma$ ; entonces  $q(\Delta)$  esta dada por la siguiente expresión:

$$q(\Delta) = \int_{m-\Delta}^{m+\Delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(y-m)^2} dy \text{ ..... (3.45)}$$

Estandarizando con  $t = (y - m) / \sigma$  obtenemos:

$$q(\Delta) = \int_{-\frac{\Delta}{\sigma}}^{+\frac{\Delta}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \text{------(3.46)}$$

La tolerancia  $\Delta$  es por consiguiente la solución de la siguiente ecuación:

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0 \cdot xq(\Delta)}} \times \Delta_0 \quad \text{..... (3.47)}$$

POR EJEMPLO, suponga que los límites de tolerancia de un consumidor particular, están dados por  $m \pm 200$  ( $\mu\text{m}$ ), y si la perdida  $A_0$  que le es causada por exceder los límites de tolerancia es \$8000, el costo de fabricación del artículo (y por consiguiente la perdida en caso de ser rechazado antes de ser embarcado en planta) es de \$300, y si la desviación estándar del proceso de fabricación es de 40 ( $\mu\text{m}$ ), entonces de acuerdo con la formula 4.15, la tolerancia  $\Delta$  que debe aparecer en los dibujos del fabricante es :

$$\Delta = \sqrt{A/A_0} \times \Delta_0 = \sqrt{\frac{300}{8000}} \times 200 = 39 (\mu\text{m}) \quad \text{------(3.48)}$$

Si la tolerancia en los dibujos  $\Delta$  es 39  $\mu\text{m}$ , entonces, puesto que la desviación estándar de la característica de calidad es 40  $\mu\text{m}$ , se habrán de producir algunos artículos fuera de especificación. Si el consumidor es una planta ensambladora y el proveedor no tiene un monopolio, el consumidor probablemente será inflexible a mantener el valor de sus tolerancias. Por consiguiente, el proveedor deberá hacer esfuerzos por mejorar la capacidad del proceso. Aquí sin embargo, se analiza la situación donde las tolerancias se fijan para productos vendidos a consumidores en general. Sustituyendo el valor de la desviación estándar en la ecuación 4.17, tenemos:

$$q(\Delta) = \int_{-\frac{\Delta}{40}}^{+\frac{\Delta}{40}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \text{------(3.49)}$$

Puesto que  $\Delta$  es desconocida,  $q(\Delta)$  es también desconocida. Un método bueno para obtener la tolerancia  $\Delta$  es por aproximaciones sucesivas. Primero se usa la formula 4.15 para encontrar una primera aproximación de  $\Delta$  como se hizo en la expresión 4.19. La primera aproximación a  $q(\Delta)$  es por consiguiente:

$$q(39) = \int_{-39}^{39} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \dots\dots\dots(3.50)$$

La integral sobre el lado derecho será abreviada F(39/40).

F(t) denota la integral de la distribución normal estandarizada entre los límites  $\pm t$ ; valores que son encontrados en la tabla correspondiente. De esa tabla, tenemos:

$$q(\Delta) = F(0.975) = 0.670$$

Podemos sustituir este resultado en la ecuación 4.18 y obtener una segunda aproximación

$$\Delta = \sqrt{\frac{300}{8000 \times 0.670}} \times 200 = 47.3$$

Entonces una segunda aproximación de q( $\Delta$ ), es decir  $q(\Delta) = F(47.3/40) = F(1.185) = 0.762$

Volvemos a sustituir en la ecuación 4.18, obtenemos una tercer aproximación a  $\Delta$ .

$$\Delta = \sqrt{\frac{300}{8000 \times 0.762}} \times 200 = 44.4$$

Esta tercera aproximación a q( $\Delta$ ) es entonces :  $q(\Delta) = F(44.4/40) = F(1.11) = 0.733$

La cuarta aproximación a  $\Delta$  es entonces :

$$\Delta = \sqrt{\frac{300}{8000 \times 0.733}} \times 200 = 45.2$$

Si se terminan los cálculos de aproximaciones sucesivas en este punto, el valor de la tolerancia es:  $\Delta = 45.2 \mu\text{m}$

Comparando este resultado con el valor original de  $\Delta = 39 \mu\text{m}$ , observamos que este valor es solo un poco más amplio, o sea que la diferencia no es significativa. Aún con esta nueva tolerancia el porcentaje defectuoso será :

$$1 - F(45.2/40) = 1 - 0.7416 = 0.267 = 26.7 \%$$

**Esto significa que es fundamentalmente incorrecto colocar las amplitudes de las tolerancias basándose en consideraciones de capacidad del proceso. Una recomendación empírica es que si la tasa esperada de defectuosos es menor al 20%, la tolerancia podría determinarse por la fórmula 4.15 y si la tasa de defectuosos excede 20 %, el problema principal es mejorar la capacidad del proceso.**

Por consiguiente no necesitamos considerar la capacidad del proceso al calcular una tolerancia, pero necesitamos considerar la pérdida A en que se incurre cuando se rebasan los límites de dicha tolerancia.



### 3.4.4 INSPECCION DESTRUCTIVA

Considérese la situación de colocar tolerancias para características de calidad tales como dureza, vida útil, esfuerzo a la tensión, esfuerzo a la compresión, punto de fusión, etc; que solamente pueden medirse destruyendo el artículo. Muchos de estos artículos tienen especificaciones unilaterales y otros tantos o más las tienen bilaterales ya sea por seguridad u otras razones. Se considera el caso de poner especificaciones bilaterales a la dureza de un artículo con valor objetivo  $m$ .

Quinientas unidades del artículo son producidas por hora, 8 horas diarias. 250 días del año. Ocurrirán problemas después de embarcar al producto si la dureza del mismo es demasiado grande o demasiado pequeña. Sea la tolerancia  $\Delta o = \pm 15$  Rw (Grados Rockwell). La pérdida una vez que se ha embarcado  $Ao$  causada por exceder esta tolerancia es \$60 000 mientras que la pérdida causada si el artículo defectuoso se detecta en la fábrica y no se embarca es \$500.

Dada una adecuada capacidad del proceso, la tolerancia indicada en los planos puede encontrarse como sigue:

$$\Delta = \sqrt{A/Ao} \times \Delta o = \sqrt{\frac{500}{60000}} \times 15 = 1.36 \text{ Rw} \quad \text{-----(3.51)}$$

De acuerdo con esto, la tolerancia sobre los planos de fábrica debe ser  $m \pm 1.36$  sobre la escala de dureza Rocwell. Obsérvese que el rango de tolerancia es de  $2(1.36) = 2.72$ .

La fábrica intentará controlar la dureza manteniendo el proceso de producción en operación normal. Un mal funcionamiento del proceso puede causar que la dureza varíe fuera de los límites de la especificación, por lo cual si esto ocurre eventualmente, podemos utilizar la formula 4.15 para determinar las tolerancias en tal situación.

¿Qué hacer si se producen defectuosos aún cuando el proceso es normal?

La respuesta dada anteriormente fue que si la capacidad del proceso de sus competidores es adecuado y el del fabricante no lo es, éste estará fuera del mercado y sus productos no se venderán. Pero ¿Qué si todos los fabricantes del mismo producto tienen en sus procesos una fracción significativa de defectuosos?

Suponga que en la fábrica se tienen mediciones de dureza de 10 artículos expresados en términos de desviaciones del valor objetivo: 1.8, -3.1, 0.0, 2.5, 1.0, 1.8, -1.6, 3.2, 2.4, -2.0

La variancia  $\sigma^2$  se estima como sigue:

$$\text{MSD} \rightarrow \sigma^2 = 1/10 [ (1.8)^2 + (-3.1)^2 + \dots + (-2.0)^2 ] = 4.59 \dots (3.52)$$

El coeficiente  $k$  de la función de pérdida es:  $k = Ao/ \Delta o^2 = 60000/ 15^2 = 266.75$

De aquí la pérdida del cliente debido a la variabilidad de la dureza es:

$$L = 266.7 \times 4.59 = \$ 1\,224 / \text{pieza} \dots\dots\dots (3.53)$$

Este valor es mucho mayor que el costo de fábrica de \$500, pero eso no significa necesariamente que los productos de esta compañía no encontrarán consumidores. Esto solamente significa que en la calidad presentada por la variabilidad de la dureza, existe una pérdida que es mucho mayor que el costo de producción. Para la empresa esta situación es indicativa de que el proceso de producción debe ser puesto bajo control dentro de la tolerancia de 1.36, si ello puede hacerse a un costo de \$500 o más pequeño por artículo.

De hecho la necesidad urgente es mejorar el proceso tal que produzca solo muy pocos defectuosos bajo condiciones normales de operación. Esto es una tarea para control de calidad fuera de la línea en la fábrica, problema que debe ser tratado por el staff de ingeniería. La calidad aún de características que requieren pruebas destructivas, puede ser controlada y los procesos de producción pueden mejorarse. **Es injusto comprometerse con tolerancias que no pueden satisfacerse con la capacidad de proceso establecida, es mejor estimar el costo de aumentar la capacidad de proceso y requerir un ajuste de precio.**

Otra forma de mejorar la calidad es mediante la inspección al 100%. Este proceso puede pensarse como parte del proceso de producción con el nombre de "cribado" (traducción asignada al término "screening"). **Cuando el costo de mejorar la capacidad del proceso es superior que el costo de la inspección al 100%, las compañías dejan su proceso como está y simplemente "limpian" su producción de todos los defectuosos mediante la inspección al 100%. Similarmente, en casos de inspección destructiva, una compañía podría decidir que aunque su proceso genere demasiados defectuosos aún cuando esté operando normalmente, la mejora de su proceso podría ser más costoso que las pérdidas causadas por embarcar toda su producción (defectuosos incluidos).**

Realizar comparaciones entre el costo de mejorar y las pérdidas de embarcar defectuosos como en este caso pueden resultar inexactas, puesto que aún productos dentro de los límites de especificación causan una pérdida si se desvían de su valor objetivo. Supóngase por ejemplo, que mejorar el proceso comprende un costo anual de 180 millones de pesos (interés, depreciación costos de corridas de prueba, etc.), pero debe reducir la desviación estándar de la dureza a una cuarta parte del rango de tolerancia, es decir  $\frac{1}{4}$  (2.72). (rango de tolerancia es equivalente al valor de tolerancia total o amplitud de tolerancia).

El costo por unidad debe ser:

$$\text{Incremento del costo anual} / \text{Volumen de producción anual} = \frac{180,000,000}{500 \times 8 \times 250} = \$180 / \text{pieza} \dots\dots (3.54)$$

En estas condiciones, la pérdida se reduce a:

$$L = 266.7 \times (1/4 \cdot 2.72) = \$123 \dots\dots\dots (3.55)$$

La mejora en calidad es entonces:  $\$1224 - \$123 = \$1101$

Puesto que esta mejora de la calidad es alcanzada a un costo unitario de \$180, la ganancia de la mejora es:

$$1101 - 180 = \$921 \quad \text{-----} (3.56)$$

En términos anuales, esta ganancia es  $921 \times 500 \times 8 \times 250 = \$921$  millones

Si el índice de capacidad del proceso  $C_p$  (el rango de tolerancia dividido entre 6 veces la desviación estándar) puede llevarse a ser  $C_p = 1$  a un costo anual de \$500 millones, la pérdida de calidad  $L$  debe ser:

$$L = 266.7 \times (1/6 \cdot 2.72)^2 = \$54.80 \quad \text{-----} (3.57)$$

El costo incrementado debe ser  $\frac{500,000,000}{500 \times 8 \times 250} = \$500 \quad \text{-----} (3.58)$

Esta vez la mejora de la calidad es  $1224 - 54.80 = \$1169.2$

Balanceada contra un incremento en costo de \$500, la ganancia es :

$$1169.2 - 500 = \$669.2 \quad \text{-----} (3.59)$$

Esto es menor que la ganancia en la ecuación 4.27 que era de \$921. Estos cálculos pueden ser tabulados como sigue :

TABLA 4.2. COSTOS DE PRODUCCION Y NIVEL DE CALIDAD

Método	Costo Y	Variancia $\sigma^2$	$L = 266.75 \sigma^2$	Perdida total
Presente	500	4.59	1224	1724
Propuesto (1)	680	0.4624	123	803
Propuesto (2)	1000	0.2055	54.80	1054.80

Puede observarse en la tabla anterior que en los casos analizados, la pérdida es más pequeña con el método propuesto (1). Esta es por consiguiente la solución óptima.

Con inspección destructiva no puede usarse "limpieza" o "cribado" para mejorar la calidad.

Si el método presente es reemplazado por el método propuesto (1), el costo aumenta en \$180, pues pasa de \$500 a \$680. Con un valor de \$680 para el parámetro  $A$  en la fórmula de la tolerancia, la tolerancia  $\Delta = \sqrt{\frac{680}{60000}} \times 15 = 1.596$  que es ligeramente mayor que la tolerancia de 1.36. En cualquier caso tengamos presente que la tolerancia es afectada muy poco por la capacidad del proceso.

## CAPITULO 4

# **PRESENTACIÓN DE CASOS DE APLICACIÓN.**

## CAPITULO 4

### PRESENTACIÓN DE CASOS DE APLICACIÓN.

Expertos en estadística incluido Edward Deming, afirman que la variabilidad es inherente a los procesos independientemente de la rama industrial o de servicios que se trate. Efectivamente, se puede comprobar con observaciones simples que en cada etapa de los procesos, aún en estado estable de control estadístico, los valores de las características de calidad presentan desviaciones en mayor o menor grado respectó de su valor objetivo. La historia de cada empresa en sus gráficos de control así lo demuestra. Esta situación requiere esfuerzos cada vez mayores para evitar la producción de “*scrap*”, el cual es tan variado y en ocasiones en tal cantidad, que la economía de las empresas se ve seriamente amenazada

Este capítulo concierne probablemente a la mayor contribución a la metodología de la calidad que el Dr. Genichi Taguchi haya hecho: la aplicación del diseño de parámetros.

En efecto, acercamientos experimentales previos consideraban a todos los factores como causas de variación. Si esas causas pueden ser bien controladas o eliminadas, entonces la variación del producto o proceso debe ser reducida y por consiguiente, la calidad debe ser mejorada. Taguchi introdujo un nuevo enfoque a éste método para tratar la variabilidad que nominó “diseño de parámetros”, el cual se usa para mejorar la calidad sin necesidad de controlar o eliminar las causas de la variación, lo cual podría ser muy costoso comparado con la aproximación lograda con este nuevo enfoque.

Las aplicaciones que se presentan en este capítulo, han sido seleccionadas por su objetividad. La primera de ellas, es un ejemplo clásico expuesto en congresos internacionales, mientras otros son casos de estudio efectuados con la ayuda de pasantes de la carrera de ingeniería industrial del Instituto Tecnológico de Zacatepec, los cuales fueron realizados en procesos de empresas de la región, en donde se ha aplicado con éxito esta metodología lo mismo a la porosidad de piezas de cerámica, resistencia de tubos de albañal, limpieza de arroz en su beneficio, hasta inclusive productos de empresas familiares como son rompopo, chocolate, piezas de fibra de vidrio, pan (telera), yogurt, etc; en todos los casos con un grado de éxito tal que permitió evidentemente un mejoramiento del proceso reflejado en la calidad del producto. Si bien es cierto, que en ocasiones los procesos son complejos y están constituidos por una serie de microprocesos, también es cierto que al aplicar de manera práctica y simplificada esta metodología, puede irse mejorando paulatinamente la organización cumpliendo la filosofía del mejoramiento continuo que comprende “mejoras continuas substanciales y sostenibles”.

Por ello, los casos presentados fueron realizados con el esquema práctico comprendido en ésta tesis y fueron basados en la filosofía de Taguchi sujetos a los considerandos listados mas adelante. Los resultados permiten validar como verdaderas las hipótesis de trabajo  $H_3$  y  $H_4$  lo que abre la posibilidad de continuar con nuevas aplicaciones, que si bien es cierto no garantizan el óptimo global, si contribuyen al mejoramiento efectivo de la calidad en las empresas que han sido sujetas a experimentación.

Es en esta parte donde seguramente se enfrentará la mayor discrepancia por parte de los expertos en relación al enfoque seguido, toda vez que la forma de realizar estas aplicaciones no considera el fundamento científico de manera amplia y estricta. Sin embargo, como quedó señalado en el párrafo anterior, se presentan a su buen juicio los siguientes :

#### CONSIDERANDOS:

- I. Cada aplicación realizada bajo el enfoque simplificado que se usa en los casos presentados, considera el diseño experimental. En consecuencia de acuerdo con Douglas C. Montgomery en su libro "Diseño y Análisis de Experimentos" "es posible considerar a la experimentación parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos".

Continúa "el diseño experimental es un medio de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura"

- II. Dentro de la ESTRATEGIA DE LA INGENIERÍA DE CALIDAD presentado por el M. en I: Rubén Téllez Sánchez en su Mecanograma titulado INGENIERIA DE CALIDAD, en la parte de conceptos cita: "el resultado del análisis no necesita ser el óptimo (validez estadística o nivel óptimo) pero si se requiere que sea mejor y rápido ( cincuenta por ciento de resultados en diez días es más rentable que noventa por ciento de resultados en doscientos días).

"Mejoras incrementales pequeñas sobre un gran número de productos y procesos tiene efectos acumulativos superiores que grandes mejoras sobre problemas conocidos"

- III. La utilización de experimentos factoriales fraccionales ortogonales, comprende el hecho de que "ciertos efectos no pueden ser estimados separadamente" así lo hace notar Amitava Mitra en su libro "FUNDAMENTALS OF THE QUALITY CONTROL IMPROVEMENT", pp501 - 507; 1993, sin embargo demuestra que en este tipo de experimentos "estrictamente hablando, representan (algún factor) los efectos combinados de otros factores y sus alias". O también es cierto que "en una replicación

fraccional cada contraste tiene uno o más contrastes como un “alias” entendidos los “alias” como factores o contrastes equivalentes entre si.

Tal situación permite ser más discriminativo en las interacciones. De hecho, los autores coinciden que las interacciones de orden superior (3 ó mas factores) deben considerarse no relevantes. Así, “es posible que en un arreglo  $L_8$  los efectos principales de un factor sean confundidos con interacciones de dos vías. Esto puede conducir a conclusiones inexactas”....., “solamente si los efectos de las interacciones son insignificantes, serán válidas las conclusiones extraídas sobre los efectos principales”.

Esta es una de las principales premisas sobre la que se fundamentan estos ejemplos.

IV. Los ejemplos aquí presentados, o son conocidos por haber sido difundidos en eventos internacionales, o han sido aplicados con éxito en las empresas indicadas. En todo caso, el modelo aplicado presenta una serie de pasos que comprende las recomendaciones de la mayor parte de los expertos cuando se usa el diseño experimental en la mejora de la calidad. Estos pasos son también citados por Amitava Mitra (*opus cit.*) y consisten en :

- Selección de los factores e identificación apropiada de los niveles de experimentación.
- Colección de datos.
- Análisis de datos.
- Determinación de parámetros óptimos.
- Corrida de prueba para verificar la validez de los parámetros óptimos en el proceso.
- Implementación del nuevo proceso.

V. En su libro “TAGUCHI TECHNIQUES FOR QUALITY ENGINEERING”, p.p 176 – 177, 1988; Phillip J. Ross dice “ la razón S/N (señal - ruido) es tratada como una respuesta de la variación dentro de un tratamiento cuando los factores de ruido están presentes. Si es utilizado un arreglo externo, la variación de ruido es forzada en un experimento, sin este arreglo, con puras repeticiones, no lo es”.. ..... continúa.... “Un ANOVA estándar puede hacerse con los valores de S/N identificando factores significantes para incrementar el valor promedio de S/N y subsecuentemente reducir la variación”. .... “El enfoque fundamental del diseño de parámetros es seleccionar los niveles de parámetros controlables a valores de baja respuesta haciéndolos insensibles a la variación ocasionada por los factores de ruido”.

A continuación se presenta una serie de ejemplos que pretenden ser didácticos y que permiten ilustrar la aplicación del diseño de parámetros en la forma práctica que se ha citado.

Habrá de observarse:

- a) Que se ha aplicado la metodología del diseño experimental.
- b) Que en cada aplicación, se ha utilizado el valor máximo de la razón señal / ruido, con sus bondades de ser medible y presentar aditividad, además de que incorpora tendencia central y variabilidad en la misma respuesta. Siendo  $S/N$  el recíproco de la varianza del error, al tomar el valor máximo como base de decisión, se obtiene la combinación de niveles de los factores que tienen la mínima varianza del error.
- c) Que en ninguno de los ejemplos se consideran las posibles interacciones del orden que sea.

En efecto, no se enfatiza la búsqueda de interacciones entre factores controlables, el énfasis se hace en la búsqueda de interacciones entre factores controlables y factores de ruido, pues ésta es la clave para lograr robustez en contra de las variaciones provocadas por factores de ruido y, curiosamente, no se necesita identificar estas interacciones de manera específica, sino que al variar de una manera balanceada los factores de ruido durante la experimentación, podemos seleccionar los niveles adecuados para los factores controlables a través del análisis.

Así obtenemos los parámetros que pueden reducir el costo sin afectar la calidad, que son los que no tienen ninguna influencia significativa sobre la media y variabilidad de la característica de calidad objetivo, los parámetros que afectan solamente la media de la característica objetivo en relación a su especificación, que son los que tienen una gran influencia sobre dicha media pero no afectan su variación, los parámetros que nos permiten colocar la variación en un nivel mínimo a través de su control y también, aquellos parámetros que influyen simultáneamente en ambos: media y variabilidad de la característica de calidad objetivo.



- d) Que el número de factores de posible relevancia, no supera el número quince.
- e) Que solo son analizados los factores en dos de sus posibles niveles.
- f) Que la influencia de un sistema de factores de ruido no ha sido considerado explícitamente pues no se ha utilizado un arreglo externo.
- g) Que no ha sido indispensable el uso de software dado el contexto industrial al que particularmente se dirige este trabajo. No obstante, en el Anexo 2 se describe y ejemplifica el uso de un programa particularmente diseñado para la aplicación de los métodos Taguchi.
- h) Que en todos los casos hubo mejora en la calidad.

## CASO 1

MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA CUBIERTA EXTRUIDA EN TERMOPLASTICO DEL CABLE DE UN VELOCIMETRO MECANICO AUTOMOTRIZ.\*

CARACTERISTICA DE CALIDAD: "MIENTRAS MENOR MEJOR"

\* Este caso fue presentado por Jim Quinlan de Flex Products, Inc., en el III Congreso de Metrología y Control de Calidad efectuado en Noviembre de 1987 en la Ciudad de México D.F. organizado por el IMP, Mitutoyo y la Dirección General de Normas.

## 1. PRODUCTO SOMETIDO A PRUEBA

El producto sometido a ensayo en este experimento es la cubierta extruída en termoplástico del cable del velocímetro, mostrado en la figura 4.1. Este producto es utilizado para cubrir el cable de los velocímetros mecánicos en automóviles. El producto consiste de un forro interior de polipropileno extruído, una capa de alambre entrelazado (malla) y un forro coextruído.

Este producto había sido producido por más de quince años, primeramente manufacturado por productos Flex, cuyos ingenieros realizaron este experimento en Midvale Ohio; el forro bajo prueba ha sido producido por una división de la Corporación General Motors.

Esa división había efectuado mucha experimentación para factores uno a la vez, con altos costos y resultados decepcionantes.

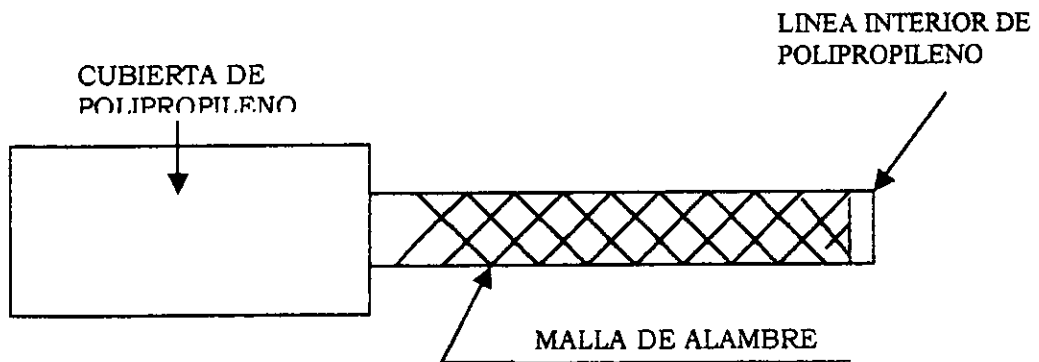
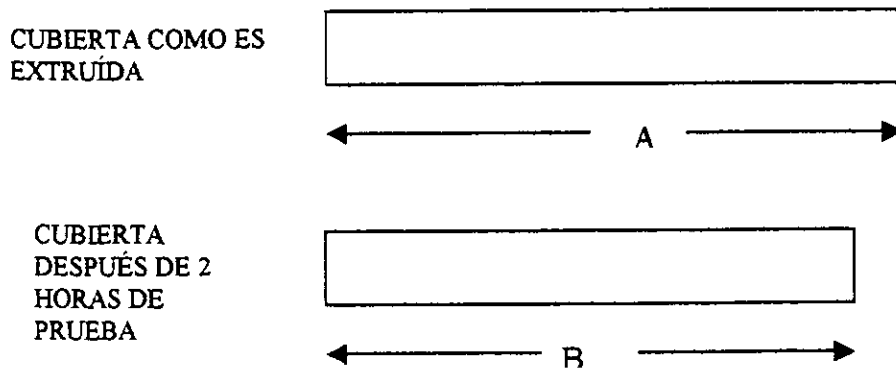


FIGURA 4.1.1 Cubierta extruída en termoplástico para cable de velocímetro mecánico

## 2. CARACTERISTICA DE CALIDAD

La característica de calidad de interés es el encogimiento posterior a la extrusión del forro. El excesivo encogimiento puede causar ruido en el ensamble, el cual ha sido uno de los grandes problemas al integrarse con velocímetros mecánicos. El encogimiento posterior a la extrusión se presenta aproximadamente a las dos horas de la prueba de calentamiento (Heat Soak test), como se muestra en la FIGURA 4.1.2.

El porcentaje de encogimiento se obtiene por la medición de un forro que ha sido acondicionado apropiadamente, colocando el forro por dos horas en medio de una corriente de aire caliente, después de lo cual se mide su longitud. La longitud final es entonces restada de la longitud original y entonces multiplicamos por 100 para obtener el resultado en por ciento. La longitud aproximada de las muestras es 600 mm.



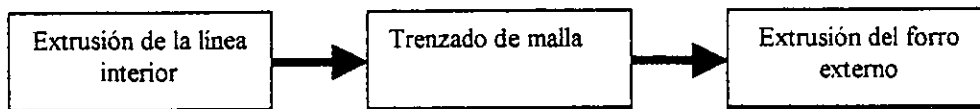
**FIGURA 4.1.2** Característica de calidad :porcentaje de encogimiento después de 2 horas de la prueba de calentamiento.

$$\% \text{ Encogimiento} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

### 3. EL PROCESO

El proceso de producción para este producto es:

- (1) Extruida la línea interior de polipropileno, se enfría y se enrolla,
- (2) Desenrollando la línea interior (polipropileno) se coloca el alambre trenzado sobre ella y se vuelve a enrollar y
- (3) Desenrollando el ensamble previo se extruye el forro sobre él y entonces se hace el corte del producto a su longitud final.



**FIGURA 4.1.3** Diagrama de bloques del proceso

Hay tres operaciones separadas. Muchos de los esfuerzos para reducir el encogimiento posterior a la extrusión, fueron dirigidos a la operación final debido a que las características especificadas en los dibujos de ingeniería se definían en esta operación. En adición, en las discusiones concernientes al encogimiento pos-extrusión, la operación final pareció la operación más lógica en la cual existirían los efectos más significativos para el encogimiento.

#### 4. IDENTIFICACION Y SELECCIÓN DE FACTORES CAUSALES DE ENCOGIMIENTO.

##### EL DIAGRAMA CAUSA Y EFECTO PARA EL EXPERIMENTO.

En el diseño preliminar del experimento, los diagramas de causa y efecto son la manera más útil de generar una lista de los factores para la prueba.

Los diagramas causa - efecto, ayudan más a estructurar las ideas que los métodos de tormenta de ideas tradicionales.

La Fig. 4.1.4 en la pagina siguiente es una versión abreviada del diagrama causa – efecto real.

En este experimento, se obtuvo la opinión de los usuarios, del personal de producción, del personal de calidad y de los ingenieros involucrados en el producto y en el proceso para desarrollar una lista de factores que podrían contribuir al encogimiento. **Obteniendo los datos de todas las personas informadas, la probabilidad de efectuar un experimento exitoso se incrementa significativamente.**

Este gran diagrama de factores potenciales fue entonces reducido a los 15 más idóneos por un proceso de consenso.

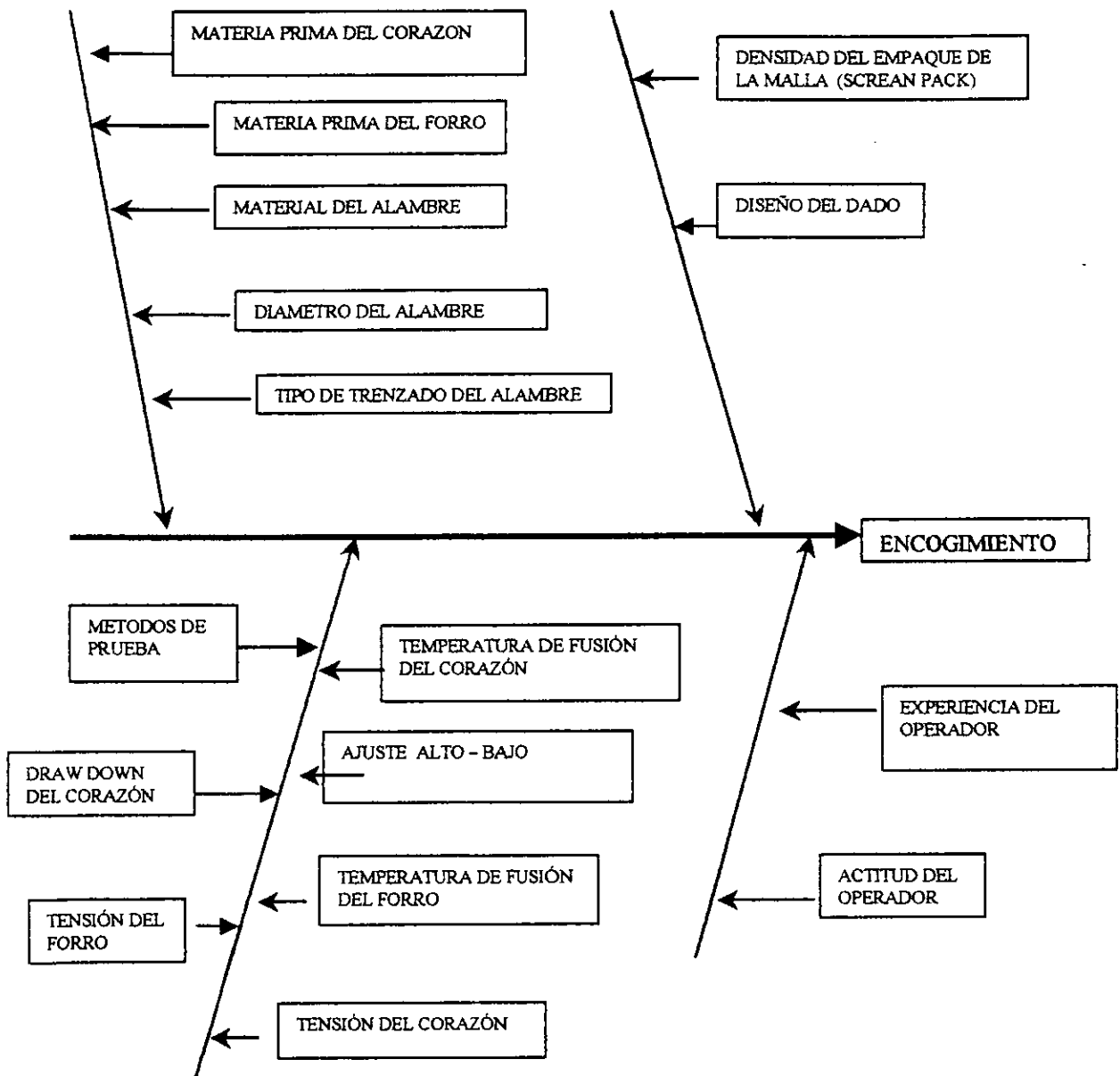


FIGURA. 4.1.4 DIAGRAMA CAUSA – EFECTO PARA EL EXPERIMENTO

## 5. LISTADO DE FACTORES

El resultado final fue una lista de quince factores en dos niveles mostrados en la TABLA 4.1.1. Nótese que cuatro factores conciernen al primer paso del proceso de producción, los tres siguientes conciernen al trenzado del alambre y los ocho siguientes conciernen con el proceso de forrado.

Unos cuantos de esos factores conciernen a las características específicas de diseño. El diámetro exterior del corazón, el tipo de trenzado del alambre, el diámetro del alambre y la materia prima del forro son todos diseñados específicamente para el producto.

Los niveles de los factores fueron seleccionados por personal familiarizado con el proceso.

Este grupo fue esencialmente el mismo que participó en el diagrama causa - efecto con la excepción de los clientes, quienes no fueron incluidos.

Operación No.		Lista de Factores	Nivel 1	Nivel 2
1	Proceso del corazón.	A. Diámetro exterior del corazón. B. Dado para el corazón. C. Material del corazón. D. Velocidad de la línea del corazón	A <sub>1</sub> = Actual B <sub>1</sub> = Actual C <sub>1</sub> = Actual D <sub>1</sub> = Actual	A <sub>2</sub> = Cambiado B <sub>2</sub> = Cambiado C <sub>2</sub> = Cambiado D <sub>2</sub> = 80% de la actual.
2	Trenzado del alambre	E. Tipo de trenzado del alambre. F. Tensión del trenzado. G. Diámetro del alambre	E <sub>1</sub> = Actual F <sub>1</sub> = Actual G <sub>1</sub> = Más pequeña	E <sub>2</sub> = Cambiado F <sub>2</sub> = Cambiado G <sub>2</sub> = Actual.
3	Proceso de forrado	H. Tensión del corazón I. Temperatura del corazón J. Material del forro. K. Tipo de dado para el forro. L. Temperatura de Fusión. M. Screen Pack (tipo de malla) N. Método de enfriamiento. O. Velocidad de la línea.	H <sub>1</sub> = Actual I <sub>1</sub> = Ambiente J <sub>1</sub> = Actual K <sub>1</sub> = Actual L <sub>1</sub> = Actual M <sub>1</sub> = Actual N <sub>1</sub> = Actual O <sub>1</sub> = Actual	H <sub>2</sub> = Mayor I <sub>2</sub> = Precalentado J <sub>2</sub> = Cambiado K <sub>2</sub> = Cambiado. L <sub>2</sub> = Más fría. M <sub>2</sub> = Más densa. N <sub>2</sub> = Cambiado. O <sub>2</sub> = 70% del existente

TABLA 4.1.1 LISTA DE FACTORES

## 6. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS UTILIZANDO UN ARREGLO L<sub>16</sub> ORTOGONAL.

La FIGURA 4.1.6 muestra el arreglo L<sub>16</sub> el cual permite probar hasta 15 factores en dos niveles. En esta figura también aparecen los valores de la razón señal / ruido calculados como se explica más adelante. Por supuesto en este tipo de diseño se corre el riesgo de confundir los efectos interactivos con los efectos factoriales. La eliminación total de este riesgo solamente es posible si todas las 32768 combinaciones de los factores fueran ensayadas. Para minimizar el riesgo, el experimento debe ensayarse por reproducibilidad.

En vista de que un mínimo de 3,000 pies de producto terminado fue la cantidad más pequeña que pudo manufacturarse para una combinación dada de factores, 48,000 pies del producto fueron sometidos a este experimento.

El experimento en sí mismo fue complicado en su ejecución a través de la planta de extrusión. En un esfuerzo por minimizar la confusión, se dieron hojas de sumario para cada operación a los supervisores y a los operadores. Esas hojas enlistaban la combinación de los factores y las órdenes de producción, **las cuales se hicieron al azar en la medida de lo posible.**

Aún con el uso de hojas de sumario, la ejecución del experimento no fue fácil. La administración y los operadores de producción merecen mucho del crédito por el éxito de éste experimento.

Después, muestras al azar fueron seleccionadas, de cada muestra de 3,000 pies, se ejecutaron entonces cuatro pruebas de calentamiento por separado. Fue efectuada una prueba por día, calculándose y ejecutándose el encogimiento.

## 7. RAZÓN DE LA SEÑAL / RUIDO

El Dr. Taguchi ha extendido el concepto de audio de la señal de ruido a la experimentación con variables múltiples. Las fórmulas para señal de ruido permiten que el experimentador **pueda siempre seleccionar el valor más alto para optimizar el experimento.** Por esto, el método de calcular la razón de la señal / ruido difiere dependiendo del tipo de característica de calidad de interés. Si es deseable una respuesta de gran amplitud o una respuesta de amplitud pequeña, se usará su correspondiente fórmula.

En casos como éste en donde la cantidad de encogimiento "*si es pequeña es mejor*", la fórmula es mostrada en la Fig. 4.1.5. En este caso, una reducción en su variabilidad mejorara la situación. La Figura muestra el mejoramiento en la razón de la señal de ruido cuando cada una de esas características se mejora.

**FIGURA 4.1.5 COMPORTAMIENTO DE LA RAZÓN SEÑAL RUIDO CUANDO LA RESPUESTA ES: MAS PEQUEÑA MEJOR**

Formula : 
$$S/N = -10 * \text{Log} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

Ejemplos:

caso	Media	S	Y1	Y2	Y3	Y4	S/N
1	0.50	0.050	0.56	0.44	0.54	0.46	5.94
2	0.15	0.050	0.21	0.09	0.19	0.11	16.00
3	0.15	0.008	0.15	0.16	0.14	0.15	16.47



Se concluye que es mejor un mismo promedio como el del caso 2 pero menor variabilidad como el del caso 3, a lo cual se asocia el mayor valor de señal / ruido.

Presentada la formula para características de calidad “menor es mejor” se presenta el cálculo del valor de la razón señal / ruido para el primer tratamiento.

Los valores de  $y_i$  son :  $y_1 = 0.49$  ;  $y_2 = 0.54$  ;  $y_3 = 0.46$  ;  $y_4 = 0.45$

Sustituyendo:

$$S/N = -10 * \text{Log} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] = -10 \text{ Log } \frac{1}{4} (0.49^2 + 0.54^2 + 0.46^2 + 0.45^2)$$

$$S/N = -10 \text{ Log } \frac{1}{4} (0.9458) = -10 \text{ Log } 0.23645 = -10 ( -0.62626) = 6.2626$$

De manera similar se realiza el cálculo del resto de las razones para cada tratamiento o corrida experimental presentadas en la figura 4.1.6

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	TEST1	TEST2	TEST3	TEST4	RAZÓN S/N	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.49..	0.54..	0.46..	0.45..	6.26	
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	....	0.55..	0.60..	0.57..	0.58..	4.80
1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	....	0.07..	0.09..	0.11..	0.08..	21.04
1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	....	0.16..	0.16..	0.19..	0.19..	15.11
1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	....	0.13..	0.22..	0.20..	0.23..	14.03
1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	....	0.16..	0.17..	0.13..	0.12..	16.69
1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	....	0.24..	0.22..	0.19..	0.25..	12.91
1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	....	0.13..	0.19..	0.19..	0.19..	15.05
2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	....	0.08..	0.10..	0.14..	0.18..	17.67
2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	....	0.07..	0.04..	0.19..	0.18..	17.27
2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	....	0.48..	0.49..	0.44..	0.41..	6.82
2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	....	0.54..	0.53..	0.53..	0.54..	5.43
2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	....	0.13..	0.17..	0.21..	0.17..	15.27
2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	....	0.28..	0.26..	0.26..	0.30..	11.20
2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	....	0.34..	0.32..	0.30..	0.41..	9.24
2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	....	0.58..	0.62..	0.59..	0.54..	4.68
TOTAL 193.47																				

FIGURA 4.1.6 Disposición utilizando un arreglo ortogonal L<sub>16</sub>.

## LOS TOTALES PARA CADA NIVEL DE FACTORES

El primer paso en el análisis de un experimento multivariable es sumar todos los resultados contenidos en un nivel de un factor y compararlos con el otro nivel del factor. Si el nivel uno del factor A, por ejemplo, decrece en el promedio de encogimiento o reduce sustancialmente su variabilidad, entonces la razón de la señal de ruido para  $A_1$  sería más grande que para  $A_2$  (como se presenta en éste ejemplo).

Debido a que el experimento fue efectuado utilizando un arreglo ortogonal, el total para cada nivel de factor contiene ocho razones de señales de ruido. Por definición, para ambos niveles de un factor dado, las correspondientes sumas de su señal ruido igualan el total de los resultados experimentales, por ejemplo  $A_1 + A_2$  es igual a 193.47.

Se realiza el calculo de los valores  $A_1$  y  $A_2$  a manera de ejemplo.

$$A_1 = 6.26 + 4.80 + 21.04 + 15.11 + 14.03 + 16.69 + 12.91 + 15.05 = 105.89$$

$$A_2 = 17.67 + 17.27 + 6.82 + 5.43 + 15.27 + 11.20 + 9.24 + 4.68 = 87.58$$

$$\text{Obsérvese que } A_1 + A_2 = 105.89 + 87.58 = 193.47$$

Revisando los números en la tabla 4.1.2, un tanteo para el efecto de cada factor puede obtenerse notando la diferencia en las señales de ruido totales para los distintos niveles del factor dado.

A una diferencia más grande entre el nivel 1 y el nivel 2 de un factor, corresponde un mayor efecto del factor en los resultados.

**TABLA 4.1.2 SEÑAL RUIDO PARA CADA FACTOR EN CADA NIVEL**

$A_1 = 105.88$	$E_1 = 67.96$	$I_1 = 92.82$	$M_1 = 94.97$
$A_2 = 87.59$	$E_2 = 125.51$	$I_2 = 100.64$	$M_2 = 98.50$
$B_1 = 94.40$	$F_1 = 87.89$	$J_1 = 99.40$	$N_1 = 94.51$
$B_2 = 99.07$	$F_2 = 105.58$	$J_2 = 94.07$	$N_2 = 98.96$
$C_1 = 87.61$	$G_1 = 77.74$	$K_1 = 106.25$	$O_1 = 95.01$
$C_2 = 105.86$	$G_2 = 115.73$	$K_2 = 87.22$	$O_2 = 98.46$
$D_1 = 103.19$	$H_1 = 103.24$	$L_1 = 93.50$	
$D_2 = 90.28$	$H_2 = 90.22$	$L_2 = 99.97$	

**MIENTRAS MAYOR SEA LA DIFERENCIA ENTRE LOS NIVELES TOTALES DE CADA FACTOR, MAYOR ES SU SIGNIFICANCIA**

## TABLA DE ANALISIS DE VARIANCA

La TABLA 4.1.3 es la tabla ANOVA para el experimento. El análisis se efectúa anotando las fuentes de variación en la columna del lado izquierdo, las cuales son por supuesto, los quince factores bajo prueba en el experimento. La columna denominada S, es la suma de los cuadrados para el factor. La columna denominada V es la media de la suma de cuadrados, por ejemplo la suma de cuadrados para el factor divididos por los grados de libertad del factor. La columna denominada F es el resultado de la prueba tradicional de Fisher para significancia; y un asterisco denota si el factor fue relevante a un determinado nivel de significancia ( comúnmente 95 ó 99 por ciento).

TABLA 4.1.3 ANALISIS DE VARIANZA

FUENTE	gl	s	V	F	s'	(%)
A	1	20.9128	20.9128	11.87*	19.1513	4.6
B	(1)	(1.3612)	1.3612	integrado	---	---
C	1	20.8282	20.8282	11.82*	19.0667	4.6
D	1	10.4171	10.4171	5.91*	8.6556	2.1
E	1	207.0275	207.0275	117.53**	205.2660	49.5
F	1	19.5625	19.5625	11.11*	17.8010	4.3
G	1	90.1788	90.1788	51.19**	88.4173	21.3
H	1	10.5963	10.5963	6.02*	8.8348	2.1
I	(1)	(3.8226)	3.8226	integrado	---	---
J	(1)	(1.7765)	1.7765	integrado	---	---
K	1	22.6350	22.6350	12.85**	20.8736	5.0
L	(1)	(2.6146)	2.6146	integrado	---	---
M	(1)	(0.7782)	0.7782	integrado	---	---
N	(1)	(1.2355)	1.2355	integrado	---	---
O	(1)	(0.7418)	0.7418	integrado	---	---
e	7	12.3304	1.7614	integrado	26.4222	6.4
T	15	414.4886	---	---	414.4886	100.0

\* Significativo al 95% de confianza.  $F(0.05, 1, 7) = 5.59$

\*\* Significativo al 99% de confianza  $F(0.01, 1, 7) = 12.25$

Nótese que varios grados de libertad, (varios efectos factoriales en este caso), han sido integrados para la estimación del error. Esta estimación de varianza, o media de la suma de cuadrados para el error, es utilizada como denominador de la prueba F.

La primer columna de la tabla de izquierda a derecha es la de fuentes de variación y contiene los 15 factores que se están analizando, más un renglón extra para analizar el error experimental (que se trabaja posteriormente) y otro para los totales.

La segunda columna encabezada gl contiene los grados de libertad para cada factor, los cuales se calculan como el número de niveles del factor menos uno.

La siguiente columna rotulada S, contiene las sumas de cuadrados o variaciones para cada factor que nos indican el efecto puro de cada factor.

En este trabajo se sugiere utilizar la formula simplificada justificada en la parte teórica de este trabajo.

Así el efecto puro del factor A está dado por :

$$S_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{n} = \frac{(105.89 - 87.58)^2}{16} = 20.9535$$

Esta aplicación en la practica reduce considerablemente el tiempo de cálculo.

Si se desean calcular estos valores mediante la fórmula general, es necesario calcular primero el factor de corrección, que es igual a la razón del cuadrado de la suma total de las razones S/R entre el número total de razones S/R; en este ejemplo es :

$$F_c = \frac{193.47^2}{16} = 2339.4151$$

La variación de cada factor se calcula como la suma de los cuadrados de los totales de razones S/R de cada uno de sus niveles, dividida por el número total de unidades en un nivel, y restando a todo esto el factor de corrección; así para el factor A se tiene:

$$S_A = \frac{A_1^2 + A_2^2}{n} - F_c = \frac{105.89^2 + 87.58^2}{8} - 2339.4151 = 20.9535$$

Los efectos principales o variaciones de los demás factores se calculan de manera análoga; la variación total o suma total de cuadrados se calcula sumando el cuadrado de cada razón S/R y restando el factor de corrección, en el ejemplo:

$$S_T = 6.26^2 + 4.80^2 + \dots + 9.24^2 + 4.68^2 - 2339.4151 = 414.7458$$

.. o bien, sumando las variaciones de todos los factores.

Para trabajar con el error experimental, se conjuntan o unen los factores que tienen los valores más pequeños (a criterio) en la columna S, en este caso 7 factores; la suma de dichos valores es asignada al error experimental como su suma de cuadrados o variación, y la suma de sus grados de libertad como los grados de libertad del error, para este ejemplo:

$$S_e = S_B + S_I + S_J + S_L + S_M + S_N + S_O = 12.3516 \quad \text{y gl} = 7$$

Se puede calcular la varianza del error  $V_e = \frac{S_e}{gl_e} = \frac{12.3516}{7} = 1.7645^*$

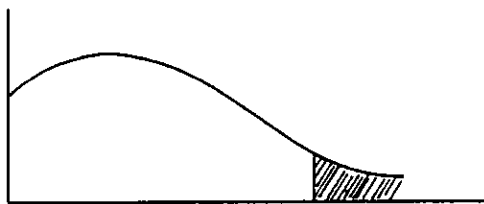
\*Valores aproximados.

Ahora es posible calcular la columna rotulada F para cada factor con efecto significativo (no fue integrado al error), dividiendo su correspondiente valor de V entre la varianza del error  $V_e$ .

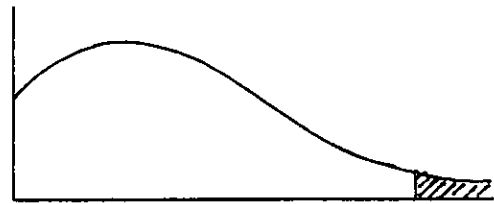
Así, para el factor A se tiene :

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} = \frac{20.9535}{1.7645} = 11.87$$

El resto de valores de F son calculados similarmente. Estos valores son comparados con los valores obtenidos de la tabla de la distribución F de la prueba de Fisher, con los grados de libertad 1 y 7 correspondientes al numerador y denominador respectivamente en este cociente. Se utilizan más comúnmente 3 niveles de significancia: 0.01; 0.05 y 0.10 según el criterio del experimentador.



$$F_{(0.05; 1, 7)} = 5.59$$



$$F_{(0.01; 1, 7)} = 12.25$$

Para este caso,  $F_{(0.05; 1, 7)} = 5.59$  mientras que  $F_{(0.01; 1, 7)} = 12.25$  lo que al ser comparados con los valores de F de cada factor, nos indican que:

Los factores E, G y K son significativos tanto al 1% como al 5 % de significancia puesto que sus valores F son mayores a los valores críticos. En cambio los factores A, C, D, F y H solo son significativos al 5 % de significancia.

La columna denominada  $S'$  es el efecto puro de cada factor. Ya que todo diseño de experimentos multivariables considera que el error es asignado igualmente sobre todos los grados de libertad dentro del experimento, cada efecto significativo contiene una cantidad de error que debe eliminarse  $V_e = 1.7645$ .

Para el factor A, el valor de  $S'_A = 20.9128 - 1.7645 = 19.1513$

El error se adiciona a la variación total (%) dentro del experimento la cual permanece constante e igual en este caso a 414.4886. La columna final es el valor de  $S'$  para cada valor significativo dividido por la variación total Estándar multiplicada por 100. Esta columna indica el por ciento de contribución a la varianza de cada factor.

Para el factor A se tiene :

$$(\%)_A = \frac{19.1513}{414.4886} \times 100 = 4.6$$

De esta tabla es fácil visualizar que los factores E y G son los más importantes en términos de encogimiento. Estos dos factores contabilizan más del 70 % de la varianza experimental.

## 10. LA GRAFICA DE EFECTOS SIGNIFICANTES.

Para obtener una idea clara de los resultados experimentales, se grafica el efecto de cada factor significativo, [ver figuras 4.1.7 (a) y (b)], los factores se arreglan de tal manera que los más significativos están a la izquierda. Esas gráficas indican lo que fue observado en la tabla de resultados sumarios - la mayor diferencia entre niveles, indica el mayor efecto-.

Los puntos son calculados tomando los totales para cada nivel de factor mostrado en la Tabla 4.1.2 y dividiendo el número de observaciones simples en ese total para obtener un efecto promedio. En el caso de  $E_1$  por ejemplo, el efecto promedio es 67.96 dividido por 8, dando 8.5 db\*. El promedio experimental de 12.1 db\* es obtenido dividiendo el total para el experimento (193.47) por el número de puntos (16).

Ya que una más alta razón de señal ruido es más deseable, puede verse que el mejor nivel de los factores sometidos a prueba estaba siendo usado en cinco de los ocho casos significantes. El factor más significativo de cualquier manera, fue especificado -erróneamente- en los planos de ingeniería en un nivel indeseable.

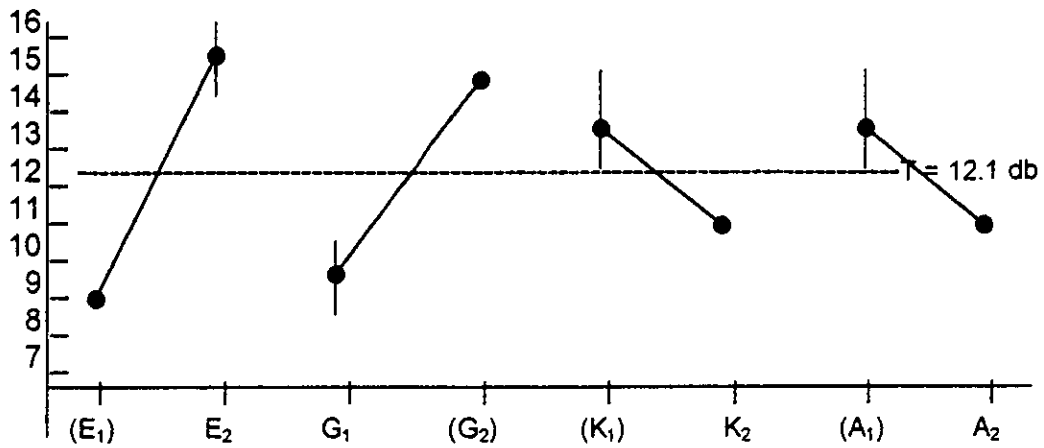


FIGURA 4.1.7. (a) : Gráfica de efectos significantes de los 4 factores con mayor significancia. Aquellos entre paréntesis representan la condición existente.

\* La abreviación db está asociada con la unidad de medida decibeles propia para ruido acústico, por lo que su uso no se acota dentro de la normatividad ISO, particularmente en el Sistema Internacional de Unidades.

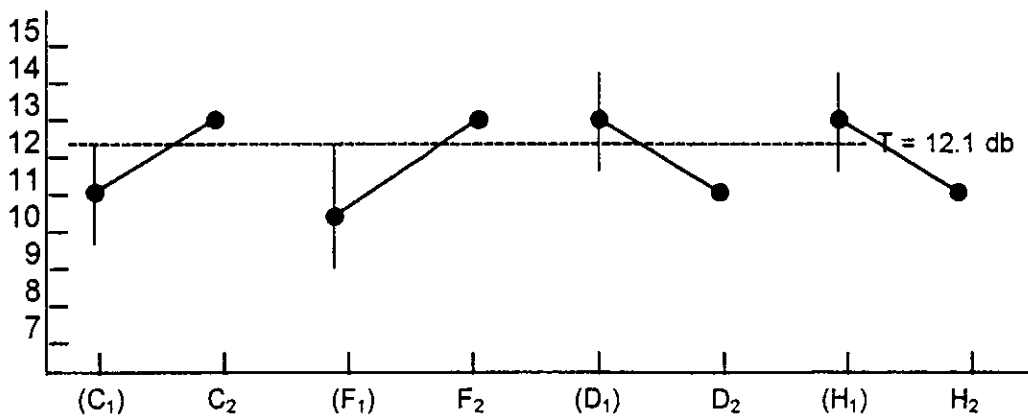


FIGURA 4.1.7 (b) : Gráfica de efectos significantes de los 4 factores con menor significancia. Aquellos entre paréntesis representan la condición existente.

## 11. CONDICIONES ACTUALES FRENTE A CONDICIONES OPTIMAS.

Si cada factor fuera seleccionado para la mejor relación de señal a ruido, ¿cuál sería el efecto en el encogimiento después de la extrusión cuando lo medimos por las dos horas de prueba? Y debido a que la condición de producción real no fue ensayada en este experimento, ¿qué hace que nuestra predicción del acortamiento sea como si se hubiera hecho en una corrida corriente?

Estas preguntas pueden contestarse mediante dos procesos. Primero, utilizando una fórmula simple para la predicción a partir de los resultados experimentales. Por supuesto se ha considerado que cada factor es independiente por ejemplo; si no existe interacción significativa, los efectos factoriales son considerados independientes.

Segundo, mediante una corrida de confirmación. En este trabajo se recomienda la corrida de confirmación, dado que la predicción es una mera estimación estadística.

Nótese que el término óptimo refleja solamente los niveles óptimos de los factores tal como se definió en este experimento.

FIGURA 4.1.8 CALCULO DE LA RELACION S/N ACTUAL FRENTE A LA S/N PROMEDIO ÓPTIMA.

<b>1.- ACTUAL: = A<sub>1</sub> C<sub>1</sub> D<sub>1</sub> E<sub>1</sub> F<sub>1</sub> G<sub>1</sub> H<sub>1</sub> K<sub>1</sub></b>	
$\hat{U} = A_1 + C_1 + D_1 + E_1 + F_1 + G_1 + H_1 + K_1 - 7 * T$	
$\hat{U} = 13.24 + 10.95 + 12.90 + 8.50 + 10.99 + 14.47 + 12.91 + 13.28 - 84.64$	
$\hat{U} = 12.60$ De aquí podemos calcular	$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 = 0.054954$
Con base en la variabilidad promedio estimada para el error calculamos el intervalo de estimación al 95 % obteniendo 8.42 a 16.78	
<b>2.- OPTIMO: = A<sub>1</sub> C<sub>2</sub> D<sub>1</sub> E<sub>2</sub> F<sub>2</sub> G<sub>2</sub> H<sub>1</sub> K<sub>1</sub></b>	
$\hat{U} = A_1 + C_2 + D_1 + E_2 + F_2 + G_2 + H_1 + K_1 - 7 * T$	
$\hat{U} = 13.24 + 13.23 + 12.90 + 15.69 + 13.20 + 14.47 + 12.91 + 13.28 - 84.64$	
$\hat{U} = 24.28$	De aquí $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 = 0.0037$ De manera
similar al caso anterior, podemos calcular el intervalo del 95% de la verdadera señal ruido promedio obteniendo:	
20.1 a 28.46	



Un intervalo de confianza del 95% se muestra sobre ambas estimaciones.

Este rango otra vez refleja la estimación del error dentro del experimento y los grados de libertad sobre los cuales la estimación de esa media esta basada. El término de la suma de cuadrados dividida por el número de muestra (a la derecha en ambos casos) es calculada desde la media estimada como buena. Por supuesto, esto es básicamente una estimación del cuadrado promedio más el cuadrado de la desviación estándar, esto será utilizada más tarde en la discusión de la función de perdida. Esta es la razón principal para que en este trabajo se sugiera la comprobación de los resultados mediante la corrida de confirmación en todos los casos presentados posteriormente.

## 12. RESULTADOS REALES FRENTE A LA PREDICCIÓN.

Para probar los resultados de nuestro experimento, se hizo una comparación entre los resultados reales y las predicciones. Si la comparación no se hace dentro del intervalo de 90% de confianza, el resultado experimental podría ser sospechoso. Factores significantes ocultos se podrían presentar, la ejecución del experimento se deterioraría o podrían presentarse fuertes efectos interactivos. Como puede verse en la Fig. 4.1.9, el experimento sucesivamente predijo la relación real señal / ruido de ambos procesos tanto el actual como el de condiciones óptimas.

FIGURA 4.1.9: RESULTADOS REALES EN EL PROCESO

	$\bar{X}$	S	S/N	Rango de predicción
Antes	0.26	0.05	11.64	8.42/16.78
Después	0.05	0.025	25.05	20.10/28.46

Los efectos que esto ha tenido sobre el encogimiento después de la extrusión, pueden verse en la Figura 4.1.10. Esta mejora dramática, podría decirse, solamente fue alcanzada cambiando uno de los criterios de diseño del producto.

Los esfuerzos de las cartas de control han sido arduamente aplicados a este proceso y sin ellas no se hubiera tenido éxito en la reducción del promedio del acortamiento después de la extrusión en la cantidad mostrada.

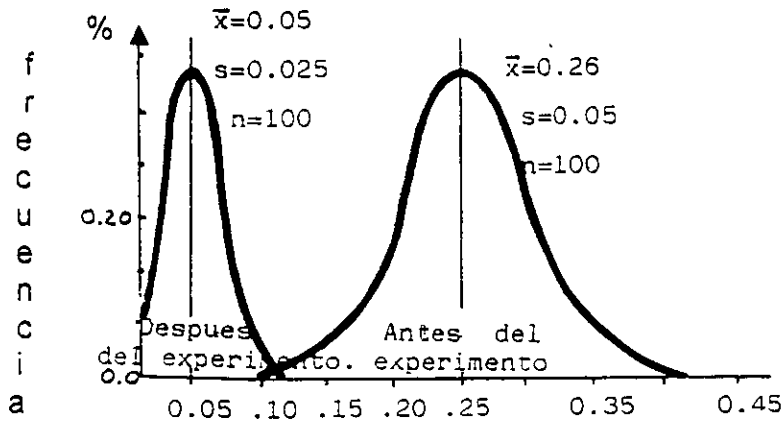


FIGURA 4.1.10 Resultados antes y después del experimento.

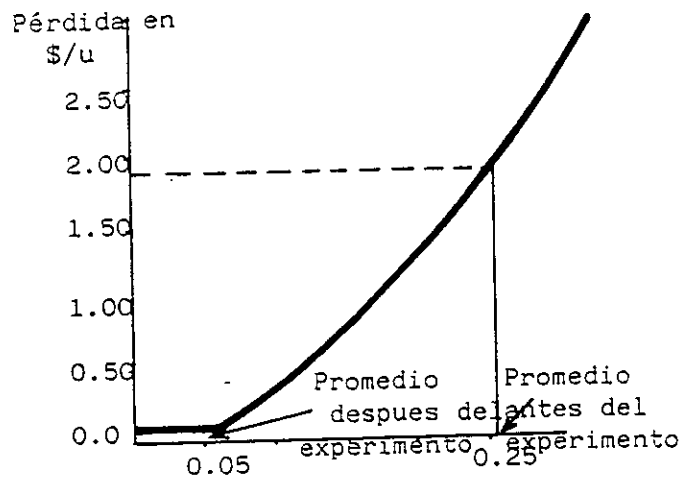


FIGURA 4.1.11 Función de pérdida.

### 13. FUNCION DE PERDIDA

Uno de los conceptos del Dr. Taguchi que lentamente ha ido ganando aceptación, es el de la función pérdida. Ya que la calidad es definida por el Dr. Taguchi como la pérdida que un producto causa a la sociedad, ambos costos el del consumidor y el del productor deben considerarse. En la mayoría de los casos el más bajo costo del productor conduce al más alto costo del consumidor y la suma de esos dos costos a la sociedad puede ser aproximada por  $L = K\sigma^2$ .

Con el uso de esta fórmula la reducción (lograda) en la variabilidad será también una cantidad ganada. Esta fórmula es utilizada para calcular la ganancia de la sociedad causada por la mejora de un proceso.

Aunque mucho de la fórmula es aproximación, los resultados son indicativos de valores posibles en la práctica. El ahorro mostrado en la Figura 4.1.12 va de cualquier modo a ambos, al productor y el consumidor. Con la minimización de los costos de los productos enviados a la sociedad, los fabricantes americanos y mexicanos pueden continuamente mejorar su posición competitiva en los mercados mundiales.

#### FIGURA 4.1.12 FUNCION DE PERDIDA PARA LA CUBIERTA DEL CABLE DEL VELOCIMETRO

---

Si el encogimiento = 1.50 %, entonces el consumidor reclama debido a los efectos de tal encogimiento.

Costo de garantía por reposición del cable = \$80.

Por consiguiente:

$$K = (80/(1.5^2)) = \$ 35.56$$

y:

$$L = k\sigma^2 \text{ (para más pequeña es mejor } \sigma^2 = \bar{y}^2 + s^2)$$

Por consiguiente (utilizando los valores medios cuadráticos (calculados previamente) como estimadores de la correspondiente variancia tenemos:

Condiciones existentes  $L = 35.56 \times 0.05495 = \$ 1.954022$  por unidad.

Condiciones optimas  $L_o = 35.56 \times 0.0037 = \$ 0.13$  por unidad.

Cantidades que sin duda demuestran el gran ahorro logrado con este proceso de experimentación.

## RAZONES SEÑAL-RUIDO

En la presentación del ejemplo anterior, la variable de respuesta era el encogimiento de la cubierta del chicote del velocímetro. Esta variable se clasificó como "menor es mejor". Taguchi ha creado una transformación para cada tipo de variable. Recordemos que existen 5 tipos de variable a saber: Menor es mejor(LB), mayor es mejor(HB), mejor nominal(NB), atributos y dinámica. Para las 3 primeras se dispone de una expresión matemática que transforma los valores de las observaciones (se requieren al menos 2) a otro valor que también mide la cantidad de variación presente, a la cual se le llama razón señal-ruido.

Existen varias razones S/N disponibles dependiendo del tipo de característica de calidad observada en la experimentación, como se presenta a continuación:

1. Menor es mejor

$$S/N_{LB} = -10 \log( 1/n \sum y_i )$$

Donde n es el número de observaciones en una prueba o tratamiento.

2. Nominal es mejor

$$S/N_{NB1} = -10 \log V_e \text{ (variancia solamente)}$$

$$S/N_{NB2} = +10 \log \{ 1/n V_e (V_m - V_e) \} \text{ para media y varianza}$$

3. Mayor es mejor

$$S/N_{HB} = -10 \log \{ 1/n \sum (i/y_i) \}$$

Las razones señal ruido LB y HB son ambas fácil de calcular, cada observación o repetición de la prueba se introduce dentro de la ecuación. Sin embargo, la razón S/N para NB necesita un poco más de explicación. Ambas razones contienen el valor  $V_e$  y NB2 contiene  $V_m$ .

Estos valores son determinados mediante el método de ANOVA más simple sobre todas las repeticiones para un tratamiento, en el cual la variación total se descompone en dos partes:

- i). La variación del promedio o media

ii). La variación de las observaciones individuales en torno al promedio, llamado error experimental.

Recuerde que la variancia debido a la media  $V_m$  tiene un grado de libertad asociado con ella siempre, por consiguiente:

$$V_m = \frac{SS_m}{v_m} = \frac{SS_m}{1} = SS_m = n(\bar{y})^2$$

$$V_e = \frac{SS_e}{v_e} = \frac{SS_T - SS_m}{n-1}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad \text{en consecuencia:}$$

$$S/N_{NB_1} = -10 \log \left( \frac{SS_T - SS_m}{n-1} \right) = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n(\bar{y})^2}{n-1}$$

$$S/N_{NB_2} = +10 \log \left( \frac{SS_m - V_e}{nV_e} \right)$$

El valor de S/N para NB<sub>1</sub> es solamente función de la variación mientras que la razón S/N para NB<sub>2</sub> es función tanto de la media como de la variación. Por esta razón Hunter recomienda el uso de S/N<sub>NB<sub>1</sub></sub> para el tipo de característica "mejor nominal". Esta razón (S/N<sub>NB<sub>1</sub></sub>) puede considerarse como un sustituto para características del tipo "menor es mejor" o "mayor es mejor".

## CASO 2

### **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TAGUCHI AL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN**

CARACTERÍSTICA DE CALIDAD : MAYOR ES MEJOR

# APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA TAGUCHI AL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ADOQUÍN.

## INTRODUCCIÓN:

La industria de la construcción es una de las pocas que ha mantenido un continuo avance relacionado con el crecimiento demográfico que, en lugares como el Estado de Morelos, rebasa la media nacional toda vez que existe una inmigración de personas de Estados circunvecinos en busca de mejores oportunidades.

Un ejemplo más objetivo está relacionado con “CEMOSA” (Cementos Moctezuma S.A.) que es una empresa que se ha expandido dentro del Estado de Morelos con una unidad altamente automatizada considerada de las más modernas de Latinoamérica ubicada en Tepetzingo en la localidad de Chiconcuac y que abastece no solo al mercado local y nacional, sino que sus productos van más allá de las fronteras.

Esta expansión de la industria de la construcción ha llevado al surgimiento de pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de materiales con propósitos complementarios tales como: Tabicón, bloque, adoquín, poste para cercado y tubo de albañal entre otros.



Para cualesquiera de estas partes, la resistencia a la compresión es la característica de calidad más importante puesto que funcionalmente así deberán trabajar dichas partes. La experiencia de campo ha llevado a apreciar una gran variabilidad que va desde considerar la pieza “un polvorón” sin ninguna cohesión entre sus partes, hasta satisfacer y rebasar las normas oficiales establecidas para el efecto.

La no satisfacción de la resistencia mínima (aproximadamente 15 % del volumen total fabricado en general), implica una reclamación por parte del cliente y mínimamente la reposición total del volumen vendido para evitar riesgos si las partes funcionalmente van a soportar carga, con los consiguientes costos y baja en la eficiencia de la empresa.

Ante la problemática indicada, se decidió realizar un análisis del proceso de fabricación de uno de los productos, seleccionándose el adoquín por sus elevados volúmenes de producción y venta en todo el Estado de Morelos.

La empresa que dio las facilidades necesarias fue “ADOQUIN DE GALEANA” ubicada en el municipio de Zacatepec, Mor.



El adoquín se puede utilizar extensamente para cubrir áreas colaterales a albercas, estacionamientos, jardines, calles, aceras, caminos de acceso, aeropuertos y marinas. Dentro de sus características funcionales están las siguientes: antiderrapante, no reflectante del calor solar, filtra el agua, es estético, evita la hierba en patios y jardines.

Tipos de adoquín: puede clasificarse en razón de su forma o del uso al que va ser destinado.

Por su forma puede ser : Hexagonal, español, cuadrado y Gran hexagonal. Por su uso puede ser : Peatonal y tráfico pesado. Los colores que se ofrecen son: Rojo, Blanco, Negro y natural. Por su peralte puede tener dimensionas de 3, 5 y 8 cm.

Aún cuando la empresa da sugerencias para su colocación, tal situación va más allá de los propósitos de este trabajo.

4.2.1.- PRODUCTO: En esta trabajo se centra la atención en el adoquín peatonal el cual tiene que satisfacer como norma una resistencia a la compresión de  $100 \text{ kg/cm}^2$ .

#### ADOQUIN PEATONAL

Modelos*	Medidas cm	Piezas por $\text{m}^2$
Hexagonal	22 x 22 x 3	20
Español	24 x 25 x 3	20
Cuadrado	20 x 20 x 3	25
Gran Hexagonal	30 x 30 x 3	11

\* Todos los modelos disponibles en colores rojo, blanco, negro y natural.





#### 4.2.2.- CARACTERÍSTICA DE CALIDAD: Resistencia a la compresión. Norma 100 kg/cm<sup>2</sup>

Obsérvese que es del tipo mayor es mejor. Las pruebas de resistencia se realizarán en el laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Civil en el Instituto Tecnológico de Zacatepec.

#### 4.2.3.- PROCESO DE PRODUCCIÓN

Para la elaboración del adoquín se sigue el siguiente procedimiento:

- ❖ Se mide el material inerte: arena y gravilla. El cemento y colorante se miden por volumen más que por peso.
- ❖ Se introducen en la tolva de la mezcladora los materiales en el orden siguiente: arena sin cernir, polvillo de gravilla, cemento y colorante.
- ❖ Una vez introducidos los materiales se realiza el mezclado, el cual se hace en seco y durante un tiempo de 15 a 20 minutos.
- ❖ Se agrega el agua según se requiera (dependiendo del porcentaje de humedad de la arena) para preparar la mezcla. Se usa el criterio del operador.
- ❖ Se realiza el mezclado activando la revoltura durante un tiempo aproximado de entre 5 y 10 minutos.
- ❖ Al tener una mezcla de consistencia homogénea se realiza el vaciado en los moldes que darán la forma definitiva de las piezas.
- ❖ Se coloca el molde lleno en una máquina vibradora hasta generar una compactación uniforme.
- ❖ Se extrae el molde de la máquina compactadora dejando las piezas en una superficie de terreno techado para su secado en sombra o sol según disposición de espacio.
- ❖ Se propicia el fraguado de las piezas rociando agua en las mismas con determinada frecuencia.
- ❖ Se inspecciona y de ser necesario se le vuelven a rociar; en caso contrario se van a almacén.

El siguiente esquema (figura 4.2.1) pretende ser más ilustrativo en relación a este proceso.

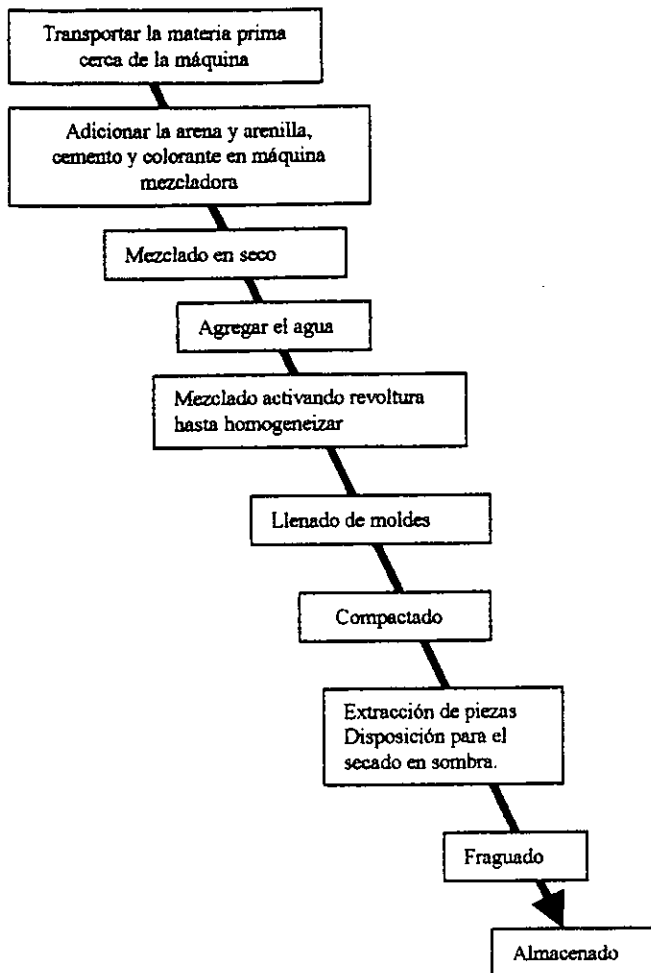


FIGURA 4.2.1. Proceso de producción del adoquín.

**MATERIALES:**

A continuación se presentan los componentes que se utilizan originalmente en la fabricación de adoquín.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Arena	Arena sin cernir
Gravilla	No debe contener grava grande
Cemento	No debe contener piedras
Colorante	Sin grumos
Agua	Potable

Para formar un lote de producción de 100 piezas las proporciones utilizadas son las siguientes:

- ✓ La arena se mide en botes o cubetas de 20 l. Se utilizan 6 botes para un lote.
- ✓ Se mide también en botes de 20 l. Se utilizan 4 en cada lote.
- ✓ 75 kg de cemento
- ✓ 2 ½ kg de colorante
- ✓ 40 litros de agua.



FIGURA 4.2.2: Secuencia fotográfica de las principales operaciones en la fabricación de adoquín.

#### 4.2.4 ANÁLISIS CAUSA - EFECTO

Con la participación del personal de la empresa (un jefe de equipo, 3 operarios para la preparación de la mezcla, un operario para colocar los adoquines sobre las paletas de secado y rociar), se realizó el análisis correspondiente de causas que fueran relevantes y afecten la resistencia a la compresión del producto (figura 4.2.3).

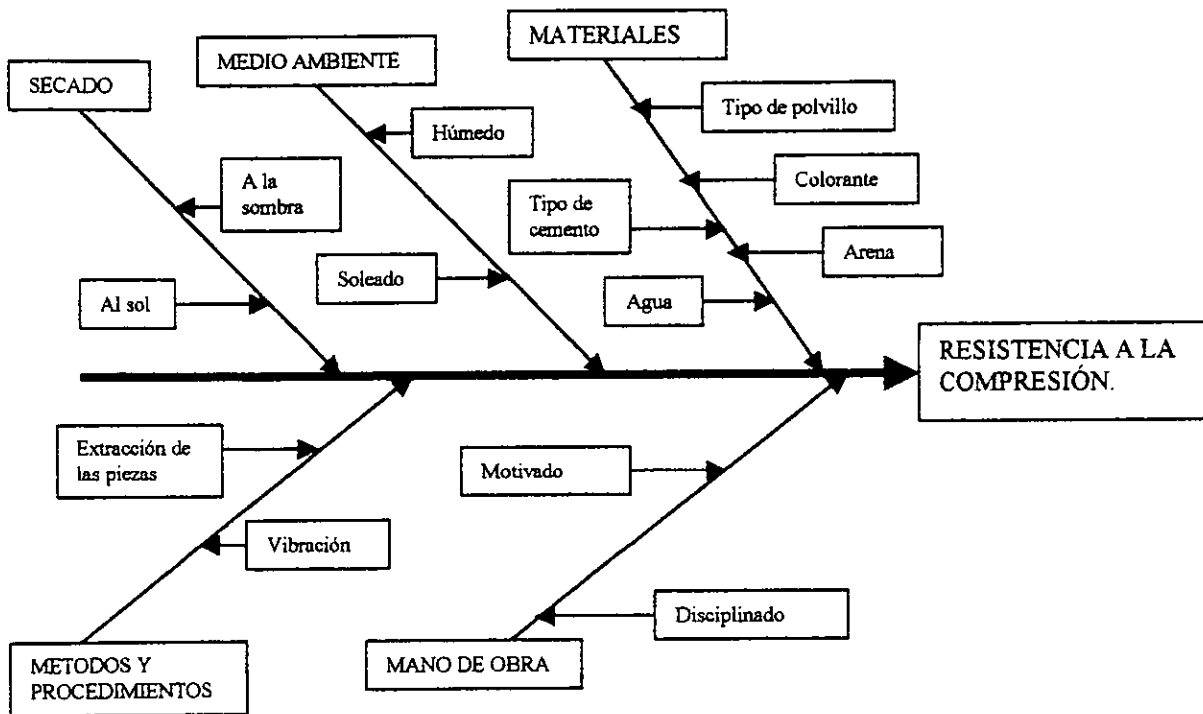


FIGURA 4.2.3 Diagrama causa - efecto  
Determinación de factores que afectan la  
resistencia a la compresión de los adoquines.

#### 4.2.5 SELECCIÓN DE FACTORES Y NIVELES

Con el objetivo de encontrar un proceso que ofreciera un producto de calidad homogénea, se depuró la lista de factores a través de opiniones y sugerencias de otros fabricantes y constructores cuya experiencia en el manejo y uso de este tipo de materiales es reconocida, decidiendo asimismo, los niveles alternos que pudieran ser factibles de probarse. La tabla 4.2.1 presenta los factores y niveles elegidos.

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2
A. Marca del cemento	Tolteca	Moctezuma
B. Tipo de grava	Triturada	No triturada
C. Tiempo de vibración	60 Segundos	10 segundos
D. Tiempo de mezclado	10 minutos	15 minutos
E. Tipo de secado	En sombra	Expuesta al sol
F. Frecuencia de rociado	3.5 Horas	2.0 Horas
G. Cantidad de colorante	1.5 kg	2.0 kg

TABLA 4.2.1 Listado de factores y niveles sujetos a experimentación.

#### 4.2.6 ARREGLO ORTOGONAL

Considerando el número de factores y bajo los supuestos que se establecieron al principio de este capítulo, se eligió un arreglo  $L_8 (2^7)$  que nos permite probar hasta 7 factores.

La experimentación se realizó aleatoriamente en cuanto al orden de los tratamientos. Se escogieron lotes de 70 piezas para cada tratamiento de donde también al azar se seleccionaron y probaron 4 de ellas, midiendo su resistencia a la compresión, consignando los resultados en la columna derecha de la tabla 4.2.2.

TRATAMIENTOS	A	B	C	D	E	F	G	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	SEÑAL/RUIDO
1	1	1	1	1	1	1	1	81.9947	80.1590	78.8162	80.7610	38.1060
2	1	1	1	2	2	2	2	73.1615	80.2000	79.7640	75.3610	37.7240
3	1	2	2	1	1	2	2	80.7766	79.6615	80.0060	76.3010	37.9667
4	1	2	2	2	2	1	1	86.6650	86.4020	82.7150	88.3675	38.7340
5	2	1	2	1	2	1	2	70.6695	71.4422	72.6610	71.5510	37.0946
6	2	1	2	2	1	2	1	98.6620	96.3040	95.2036	89.5500	39.5313
7	2	2	1	1	2	2	1	75.3452	79.3615	80.0001	78.3006	37.8629
8	2	2	1	2	1	1	2	98.8005	93.6120	80.0010	84.5560	39.1042
<b>TOTAL = 306.1237</b>												

TABLA 4.2.2 Arreglo ortogonal y resultados de las pruebas.  
Calculo de la razón señal / ruido

La resistencia a la compresión se determina con la fórmula siguiente:

$$\text{Resistencia a la compresión} = \text{Carga aplicada (kg)} / \text{Área de contacto (cm}^2\text{)}$$

La fórmula aplicada para calcular la razón señal / ruido es:  $S/N = -10 \text{ Log} [ 1/n \sum 1/y_i^2 ]$

#### 4.2.7 NIVELES TOTALES PARA CADA FACTOR EN CADA NIVEL

NIVEL 1	NIVEL 2
A <sub>1</sub> = 152.5307	A <sub>2</sub> = 153.5930
B <sub>1</sub> = 152.4559	B <sub>2</sub> = 153.6678
C <sub>1</sub> = 152.7971	C <sub>2</sub> = 153.3266
D <sub>1</sub> = 151.0302	D <sub>2</sub> = 155.0935
E <sub>1</sub> = 154.7082	E <sub>2</sub> = 151.4155
F <sub>1</sub> = 153.0388	F <sub>2</sub> = 153.0849
G <sub>1</sub> = 154.2342	G <sub>2</sub> = 151.8895

#### 4.2.8 TABLA ANOVA

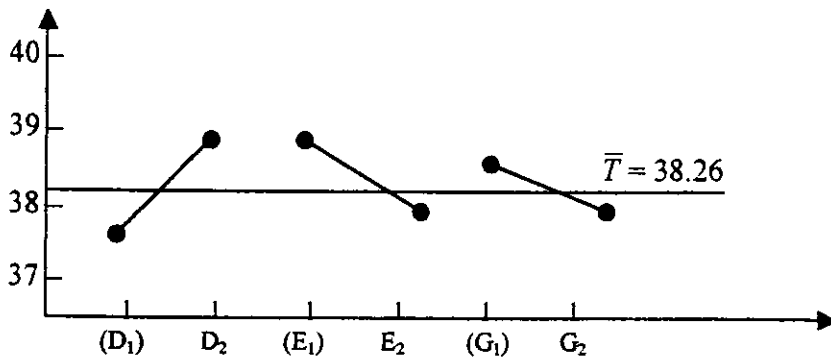
FACTOR	G.L.	S	V	F	S	%
A	1	0.1410	0.1410	8.0113	0.1234	2.7631
B	1	0.1835	0.1835	10.4261	0.1659	3.7148
C	(1)	0.0350	---	---	---	---
D	1	2.0638	2.0638	117.2612**	2.0462	45.8183
E	1	1.3552	1.3552	77.0000*	1.3376	29.9514
F	(1)	0.0002	---	---	---	----
G	1	0.6872	0.6872	39.0454*	0.6696	14.9936
ERROR	2	0.0352	0.0176		0.1236	20.7586
TOTAL	7	4.4659			4.4659	100.0000

\* Factores significativos al 95 % de confianza  $F_{0.05;1,2} = 18.51$

\*\* Factores significativos al 99 % de confianza  $F_{0.01;1,2} = 98.50$

### 4.2.9 GRAFICA DE EFECTOS SIGNIFICANTES

Para mayor objetividad, se construye la gráfica de efectos significantes 4.2.4



( ) nivel actual

GRAFICA 4.2.4 Gráfica de factores significantes en la resistencia del adoquín.

### 4.2.10 PROCESO ÓPTIMO

Como se deduce de la gráfica de efectos significantes, el proceso óptimo está dado por los niveles  $D_2 E_1 G_1$  que corresponden al tiempo de mezclado, la forma de secado y la cantidad de colorante. Sin embargo, puede apreciarse que de los tres factores significantes, dos de ellos se están utilizando en el nivel óptimo y solo D debe cambiarse de nivel.

### 4.2.11 CORRIDA DE CONFIRMACIÓN

Controlando los distintos parámetros sujetos a experimentación, en los niveles elegidos anteriormente, se fabricó un lote de 70 piezas las cuales, una vez fraguadas y secadas, fueron sometidas a un escrutinio manual y visual no encontrando evidencia de piezas que pudieran estar en situación extrema por su mala calidad. Se llevó una muestra aleatoria al laboratorio encontrando una resistencia media ligeramente superior a la obtenida con el tratamiento 6 en el cual los factores significantes están en el nivel óptimo.

Con todo el control experimental aplicado, los resultados no satisfacen la norma de  $100 \text{ kg / cm}^2$  en promedio. Sin duda deberán probarse otros factores u otros niveles de los mismos. Sin embargo, se ha llegado con esta prueba a encontrar el proceso que mejor desempeño puede otorgar al fabricar el adoquín, en las condiciones actuales, manteniendo una resistencia cercana a la norma y lo mejor, de resistencia homogénea, con una inversión en tiempo máquina de 5 minutos por lote. Ello seguramente incrementa los costos, pero se justifican por el ahorro en reclamaciones, sustituciones, pérdida de imagen, etc.

Incrementar la resistencia promedio, implica un rediseño de la formulación para este producto, fuera de los propósitos de éste trabajo.

## CASO N° 3

**MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE UN SOPORTE DE BRAZO (CODERA) UTILIZADO EN SILLAS DE TIPO SECRETARIAL.**

EMPRESA: AIR DESIGN ADVANCED TECHNOLOGY  
AERODYNAMICS.





## PRESENTACION

A pesar de la difícil situación por la que atraviesa la economía del país, la industria automotriz ha realizado grandes esfuerzos en la fabricación con mayor calidad de sus productos así como en la comercialización de los mismos, buscando mayor penetración en el mercado doméstico mediante estrategias financieras que difieren los pagos a futuro dando plazos hasta de 24 meses sin cobro de intereses. Así pues, aunado a procesos de mejora de los fabricantes de partes como de los ensambladores, se han integrado un profesionalismo y una gran agresividad de los distintos distribuidores.

**AIR DESIGN** es una empresa fuerte que ha extendido sus operaciones en distintos lugares del país así como en el extranjero. Ha realizado su mayor esfuerzo en lo concerniente al desarrollo e implementación de proyectos destinados a contribuir de manera real, en el avance industrial de cada uno de sus clientes.

Su trabajo central es la manufactura de partes de plástico para la Industria Automotriz tales como las antiguamente llamadas “defensas” o “parachoques” hoy conocidas como “facias”, también “pieseras” para autobuses, partes laterales de camionetas con el emblema **AIR DESIGN**. Sin embargo en razón de la contracción del mercado debido a los efectos de la economía norteamericana, los conflictos mundiales y en general la recesión en que parece estar cayendo México, han diversificado su producción a aquello cuya manufactura requiera inyección en plástico.

Este proyecto está enfocado hacia una parte simple de una silla de oficina llamada CODERA, la cual se encuentra en las partes laterales de la silla y como su nombre lo indica sirve para colocar los brazos y descansar. La característica de calidad que se sometió a prueba fue el peso espuma que conforma el cuerpo de esta pieza.

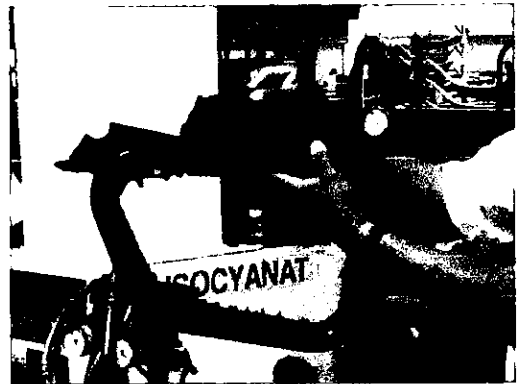
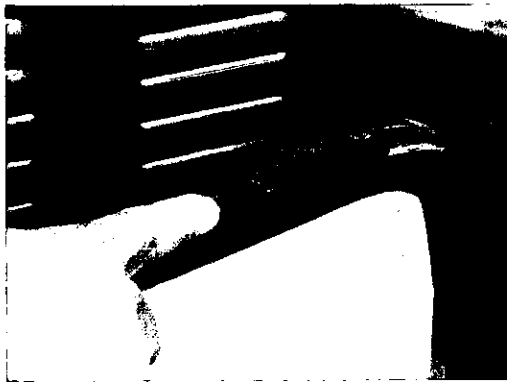
Este producto pertenece a una familia que es fabricada por **AIR DESIGN** siguiendo un proceso semejante e igual materia prima, variando solamente sus moldes y proporciones, tomando como base de sus materias primas el polioli y el isocianato. Algunos productos como la CODERA, llevan un “alma” de metal llamada “inserto”.

En este experimento se busca determinar el proceso óptimo para la elaboración de la CODERA aplicando el Diseño de Parámetros de Taguchi.

### 4.3.1 PRODUCTO SOMETIDO A PRUEBA

Como se especificó en la presentación de este trabajo, el producto es una codera manufacturada en el área de piel integral. Esta pieza es utilizada para el descanso de los brazos. La codera se obtiene al revestir un inserto con una mezcla de poliuretano e isocianato en un molde mediante una máquina de inyección.

El problema que se presenta y justifica este trabajo es el exceso o déficit de hule espuma en el conformado de la pieza que finalmente la hace inservible, o que eleva significativamente los costos por reproceso y que está asociado necesariamente con gran variabilidad en la producción.



### 4.3.2 CARACTERÍSTICA DE CALIDAD

La característica de calidad de interés es el peso espuma de la codera después de haber sido inyectada. El exceso de peso indica una cantidad de material innecesaria, por el contrario, un peso menor indica una pieza no consistente y mal formada.

La clasificación de esta característica es entonces del tipo "mejor nominal".

La medición de dicha característica es mediante pesado directo en gramos.

### 4.3.3 PROCESO

Con el propósito de hacer más objetivo este reporte, se describe el proceso iniciando del almacén toda vez que ahí se encuentra el inserto de metal, concluyendo hasta que el producto terminado se encuentra almacenado también. Particularmente se marcan con "negrillas" las operaciones de interés en este trabajo.

- 1) Los insertos se encuentran en el almacén hasta que se realice el pedido
- 2) Los insertos son cargados en el montacargas.

- 3) Se transportan los insertos hasta el área de piel integral.
- 4) Se descargan los insertos.
- 5) Se les coloca cinta adhesiva en las partes laterales.
- 6) Se coloca el inserto dentro del molde.
- 7) Se inyecta.
- 8) Se espera 4 minutos para que finalice la reacción.
- 9) Se saca la codera.
- 10) Se inspecciona y se pinchan las burbujas.
- 11) Se coloca en contenedor las piezas que cumplen con las especificaciones.
- 12) Se transporta al área de ribeteado.
- 13) Se ribetea (quitar rebabas) e inspecciona.
- 14) Se cantea (lijado) e inspecciona.
- 15) Se empasta e inspecciona.
- 16) Se lija e inspecciona.
- 17) Se pinta e inspecciona.
- 18) Se transporta al área de empaque.
- 19) Se empaca.
- 20) Se transporta al almacén de producto terminado.
- 21) Se almacena.

En la siguiente página se presenta una secuencia gráfica de las operaciones de interés en este trabajo con el propósito de hacer más objetivo este proceso.

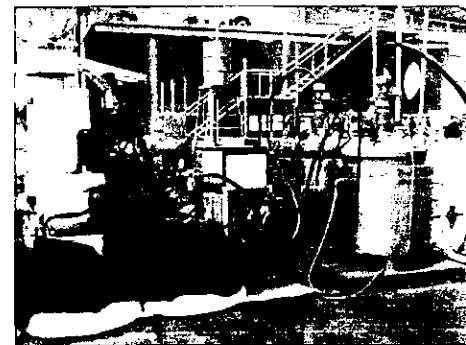
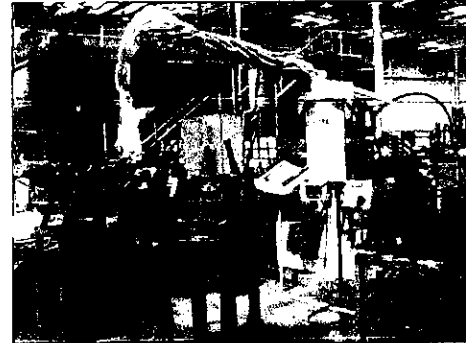


FIGURA 4.3.1 Secuencia gráfica de las principales operaciones de fabricación.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA CODERA

OBJETO DEL DIAGRAMA Codera DIAGRAMA DEL METODO: actual

EL DIAGRAMA EMPIEZA EN : Almacén de materia prima ELABORADO POR: Grupo de ingeniería de calidad

EL DIAGRAMA TERMINA EN : Almacén de producto terminado FECHA: Julio del 20001

m	min.	Símbolo	Descripción	m	min.	Símbolo	Descripción
		▽	Los insertos se encuentran en el almacén hasta que se realice el pedido.	8	4	⇒	Se transporta al almacén de producto terminado
	1	○	Los insertos son cargados por el montacargas.			▽	Se almacena
61.5	5.075	⇒	Se transportan los insertos hasta el área de piel integral.				
	1.47	○	Se descargan los insertos				
	15.35	○	Se les coloca cinta adhesiva en las partes laterales				
2.32	0.25	○	Se coloca el inserto en el molde				
	0.0192	○	Se inyecta				
	4	D	Se esperan 4 minutos para que finalice la reacción				
	.03	○	Se saca la codera				
	0.25	◻	Se inspecciona y se pinchan las burbujas				
2.32	0.01	⇒	Se coloca en el contenedor de piezas				
5.10	0.06	⇒	Se transporta al área de poliuretano piel integral				
	1	◻	Se ribetea (quitar rebabas) e inspecciona				
	0.96	◻	Se cantea (lijado) e inspecciona				
	2	◻	Se empasta e inspecciona				
	1.3	◻	Se fija e inspecciona				
	0.81	◻	Se pinta e inspecciona				
42.6	5.18	⇒	Se transporta al área de empaque				
	15.13	○	Se empaca				
RESUMEN							
EVENTO		NUMERO	TIEMPO (min.)		DISTANCIA		
OPERACIONES		8	33.2592		-		
INSPECCIONES		-	-		-		
ACTIVIDADES COMBINADAS		6	6.32		117.2		
TRANSPORTES		4	14.315				
ALMACENAMIENTOS		2	-				
RETRASOS		1	4				

FIGURA 4.3.2 Diagrama de flujo en la elaboración de la codera.

#### 4.3.4 DIAGRAMA CAUSA EFECTO

Como se ha indicado previamente, en el diseño preliminar del experimento, los diagramas causa - efecto son la manera más útil de generar una lista de los factores relevantes para la prueba previo a una tormenta de ideas de todas aquellas personas vinculadas directa o indirectamente al proceso.

Para este proyecto se convocó y logró la participación del Gerente de Planta, el jefe de la sección de Piel Integral y la opinión de los operadores en los distintos turnos, logrando con esto una lista de las posibles causas que influyen en la característica de calidad sujeta a estudio (peso del hule espuma).

De esta manera, se logró el esquema de la figura 4.3.3 ya depurado por los expertos.

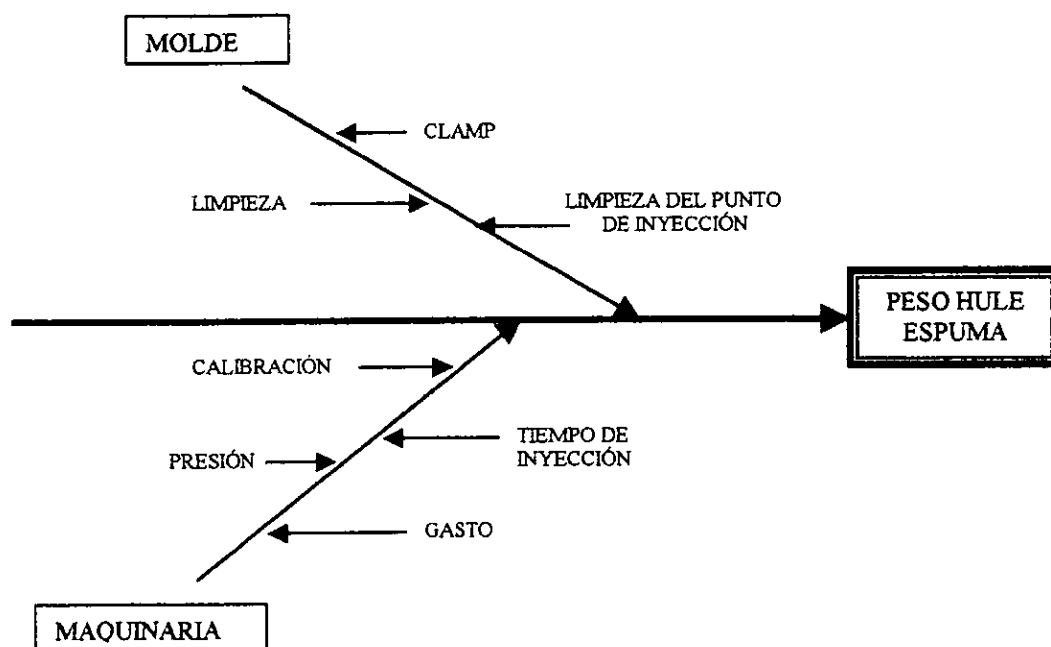


FIGURA 4.3.3. Factores que afectan el peso del hule espuma -en la codera.

#### 4.3.5 LISTADO DE FACTORES

Con la participación del personal citado en el punto 4, se establecieron también los niveles de interés para cada factor considerado potencialmente relevante. Así se seleccionaron las magnitudes dadas en la tabla 4.3.1

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2
A. Gasto	A <sub>1</sub> = 200 g/s	A <sub>2</sub> = 195 g/s
B. Presión de isocianato	B <sub>1</sub> = 2000 psi (137.895 bar)	B <sub>2</sub> = 1000 psi (68.9475 bar)
C. Presión de polioliol	C <sub>1</sub> = 2000 psi	C <sub>2</sub> = 1000 psi
D. Clamp	D <sub>1</sub> = holgado	D <sub>2</sub> = ajustado
E. Limpieza del punto de inyección	E <sub>1</sub> = Limpio	E <sub>2</sub> = Según uso
F. Limpieza del molde	F <sub>1</sub> = limpio cada vez	F <sub>2</sub> = según uso
G. Tiempo de inyección	G <sub>1</sub> = mínimo requerido	G <sub>2</sub> = 30 % de excedente

TABLA 4.3.1. Factores y niveles relevantes

#### 4.3.6 DISPOSICIÓN MEDIANTE UN ARREGLO ORTOGONAL L<sub>8</sub>.

Este arreglo, permite probar hasta siete factores en dos niveles. Utilizando este arreglo se hicieron hasta 6 pruebas para cada tratamiento y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.3.2 donde la variable de respuesta es el peso de hule espuma medido en gramos. Se omite cualquier interacción que pudiera existir entre los factores.

Recuérdese que siendo la característica “mejor nominal” la razón señal / ruido se obtiene mediante la expresión presentada previamente en el marco teórico de este trabajo.

$$S/N = +10 \log \left[ \frac{V_m - V_e}{n V_e} \right]$$

T R A T A M I E N T O S	1	A B C D E F G	Resultados de las pruebas						S/N
			1	2	3	4	5	6	
	1	1 1 1 1 1 1 1	135.5	134.2	132	130.5	124	134	29.99549378
	2	1 1 1 2 2 2 2	169.2	147.7	175	175.6	167.2	163.5	24.20525226
	3	1 2 2 1 1 2 2	167	133.2	171.5	174	162.5	174	20.41619491
	4	1 2 2 2 2 1 1	157.5	170	167.5	162.6	156	168.1	28.90024067
	5	2 1 2 1 2 1 2	162.5	171.4	163.8	173.8	178.1	168	29.03086494
	6	2 1 2 2 1 2 1	172.8	169.7	178.5	176.4	177.5	175.7	34.54573191
	7	2 2 1 1 2 2 1	173	180.3	185.9	175.1	179	189.5	29.15332745
	8	2 2 1 2 1 1 2	178.3	172.7	174.6	172.5	172.9	166.6	33.17762019
			TOTAL						229.424726100

TABLA 4.3.2 Resultados de la pruebas dispuestos en un arreglo ortogonal L<sub>8</sub> (2<sup>7</sup>)

#### 4.3.7 TOTALES DE SEÑAL RUIDO PARA CADA NIVEL

Para cada parámetro se calcula el total de señal ruido cuando está en el nivel 1 ó en el 2 respectivamente, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 4.3.3):

NIVEL 1	NIVEL 2
A <sub>1</sub> = 103.5171816	A <sub>2</sub> = 125.9075445
B <sub>1</sub> = 117.7773429	B <sub>2</sub> = 111.6473832
C <sub>1</sub> = 116.5316937	C <sub>2</sub> = 112.8930324
D <sub>1</sub> = 108.5958811	D <sub>2</sub> = 120.8288450
E <sub>1</sub> = 118.1350408	E <sub>2</sub> = 111.2896853
F <sub>1</sub> = 121.1042196	F <sub>2</sub> = 108.3205065
G <sub>1</sub> = 122.5947938	G <sub>2</sub> = 106.8299323

TABLA 4.3.3. Totales de señal ruido para cada nivel

#### 4.3.8 TABLA DE ANÁLISIS DE VARIANZA

Con esta información se puede ahora construir la correspondiente tabla de análisis de varianza la cual se presenta identificada con el número 4.3.4 a continuación:

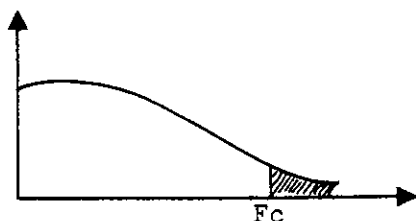
Fuente	Grados De libertad	Suma de cuadrados	Estimación De varianza	F	S'	%
A	1	62.66604385	62.66604385	15.39782628**	58.59624577	40.39
B	(1)	4.69705074	4.69705074	integrado	-o-	-o-
C	(1)	1.654982008	1.654982008	integrado	-o-	-o-
D	1	18.70567573	18.70567573	4.596217149	14.63587765	10.08
E	(1)	5.85736149	5.85736149	integrado	-o-	-o-
F	1	20.42791508	20.42791508	5.019392775	16.358117	11.28
G	1	31.06635726	31.06635726	7.633390318*	26.99655918	18.61
e	3	12.20939424	4.06979808	-o-	28.48858656	19.64
TOTAL	7	145.0753862	-o-	-o-	145.0753862	100%

TABLA 4.3.4 Tabla de análisis de Varianza

\* Significativo a un nivel de significancia de 0.10 dado que  $F_{0.1;1,3} = 5.54$

\*\* Significativo con niveles de significancia de 0.05 y 0.10 dado que  $F_{0.05;1,3} = 10.13$





La columna denominada F de la tabla de análisis de varianza es el valor del estadístico para efectuar la tradicional prueba de significancia. Así, un \* denota si el factor fue significativo con el 90 % de confianza mientras que \*\* significa que lo fue hasta con 95 % de confianza. En consecuencia, podemos visualizar que los factores A y G son los más importantes en términos del peso espuma ya que contabilizan aproximadamente el 59 % de la varianza experimental.

#### 4.3.9 GRAFICA DE EFECTOS SIGNIFICANTES

Con el propósito de hacer más objetivos los resultados experimentales se grafica el efecto promedio de cada factor significativo, dispuestos de modo que los más significativos estén a la izquierda (ver gráfica 4.3.4). De esta gráfica se deriva el tratamiento óptimo que corresponde en esta ocasión a:

$A_2 G_1 F_1 D_2$

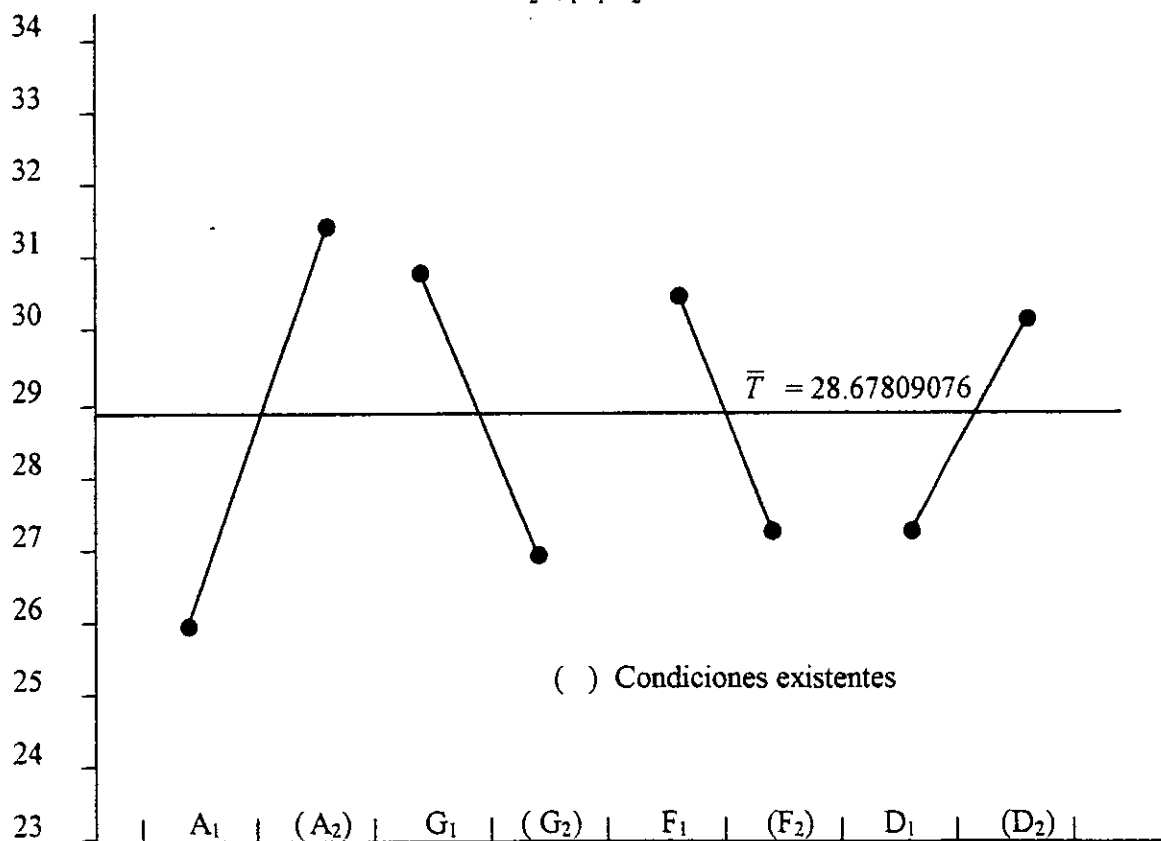


FIGURA 4.3.4 Gráfica de efectos significantes

$$\bar{T} = 229.4247261 / 8 = 28.67809076$$

Promedio nivel 1	Promedio nivel 2
A <sub>1</sub> = 25.8792954	A <sub>2</sub> = 31.47688613
B <sub>1</sub> = 29.44433573	B <sub>2</sub> = 27.9118458
C <sub>1</sub> = 29.13292343	C <sub>2</sub> = 28.2232581
D <sub>1</sub> = 27.14897028	D <sub>2</sub> = 30.20721125
E <sub>1</sub> = 29.5337602	E <sub>2</sub> = 27.82242133
F <sub>1</sub> = 30.2760549	F <sub>2</sub> = 27.08012663
G <sub>1</sub> = 30.64869845	G <sub>2</sub> = 26.70748308

TABLA 4.3.5 Valores promedio para cada factor en cada nivel

#### 4.3.10 CORRIDA DE CONFIRMACIÓN

Habiendo detectado que el factor F (limpieza del molde) y G (tiempo de inyección) debían ser colocados en otro nivel diferente al que se estaba utilizando actualmente, se implantaron los ajustes en el proceso necesarios particularmente en lo que a limpieza del molde se refiere, se integró asimismo una operación adicional consistente en cubrir la superficie del molde antes de cada inyección usando teflón líquido antiadherente lo que se tradujo en una reducción dramática del porcentaje defectuoso detectado anteriormente hasta en un 80 % previo haber realizado la recalibración de la máquina inyectora en cuanto al tiempo de inyección.

#### OBSERVACIONES

Una vez más, se demuestra que con la aplicación del diseño de parámetros relativamente simple, es posible mejorar la calidad de los productos no solo por esta tecnología en sí misma, sino por el necesario análisis que debe realizarse del proceso para su aplicación, lo que permite –como en este caso– introducir una mejora del mismo que aunque no era el objetivo central de la experimentación, se derivó dentro del trabajo realizado.

## CASO 4

# **MEJORAMIENTO DE LA DUREZA Y CONSISTENCIA DE LA PELÍCULA PROTECTORA DEL METAL EN EL REPINTADO AUTOMOTRIZ.**

CARACTERÍSTICA DE CALIDAD "ATRIBUTOS"

# MEJORAMIENTO DE LA DUREZA Y CONSISTENCIA DE LA PELÍCULA PROTECTORA DEL METAL EN EL REPINTADO AUTOMOTRIZ.

## PRESENTACIÓN:

Las pruebas usadas con más frecuencia para determinar las propiedades del material son las pruebas de dureza. Con suficiente conocimiento de la composición del material y de los procesos previos, las pruebas de dureza pueden verse como una medida indirecta de otras propiedades diferentes de una pieza. Por ejemplo, la dureza puede usarse algunas veces para separar y clasificar materias primas de diferente composición, para determinar si se ha realizado un tratamiento satisfactorio u otro proceso o para medir propiedades de resistencia al desgaste de un producto y poder en consecuencia pronosticar su vida útil. Es por ello que las mediciones de dureza se llevan a cabo tanto en materias primas, en partes en proceso, como en productos terminados.

Por lo común, la dureza se define como la resistencia de una pieza a la penetración en el material cercano a su superficie. En las pruebas más aceptadas se imprime un identificador en la superficie del material con una carga conocida y la extensión de la impresión resultante, medida en forma mecánica u óptica esta relacionada con la dureza del material.

Las cualidades de endurecimiento por trabajo de un material, son parte de la mayoría de las mediciones de dureza y explican parcialmente la dificultad de convertir un tipo de medición de dureza a otro, debido a que los diferentes métodos no son coincidentes en aquello que cuantifican. Sin embargo, están suficientemente normalizadas para proporcionar información práctica y útil.

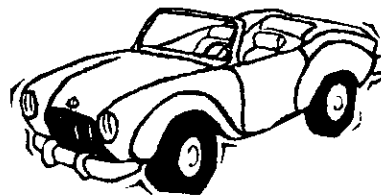
Las mediciones de dureza son útiles para determinar si las técnicas de proceso están cumpliendo sus objetivos.

Las pruebas de dureza más comunes pueden clasificarse como pruebas de micro dureza. Las pruebas de macro dureza permiten escrutar un área grande aceptable de la superficie de la pieza y sus impresiones pueden observarse a simple vista. Las impresiones de las pruebas de microdureza son muy pequeñas, de modo que se requiere un microscopio para verlas.

#### 4.4.1. PRODUCTO SOMETIDO A PRUEBA

Una vez que una unidad automotriz sale de la planta armadora, la responsabilidad del mantenimiento pasa a manos de las distribuidoras. Sin embargo pequeños daños a su carrocería muy comunes por el uso, generalmente son atendidos por talleres de hojalatería y pintura que no tienen relación alguna ni con armadoras ni con distribuidoras. El repintado automotriz en tal caso, depende de la habilidad y experiencia del encargado del taller quienes con frecuencia siguen un método empírico para realizar su trabajo y en consecuencia la calidad resultante en cuanto a su dureza, tiene asociada una alta variabilidad.

En este ejemplo el producto sometido a experimentación es la película protectora del metal, aplicada en el repintado automotriz.



#### 4.4.2. CARACTERÍSTICA DE CALIDAD

Cuando un automóvil es dañado en su carrocería o se desea renovarla y hasta cambiar de color, el dueño espera que el color aplicado sea el deseado, uniformidad en la aplicación y otros detalles que podrían de manera inmediata estar relacionados con el trabajo de hojalatería. Sin embargo está implícito el deseo de que la pintura quede adherida fijamente a la lámina y que no se desprenda con un simple pasar de las manos u otros objetos ligeros. Se espera una vida útil apropiada para este trabajo de al menos 2 años.



Para que lo anterior sea posible, la película de pintura depositada en el proceso de repintado automotriz debe tener la uniformidad (consistencia) y dureza apropiada la cual se logrará entre otros factores siguiendo un proceso adecuado.

Por lo anterior, la característica de calidad que se usará como variable de respuesta en este ejemplo será la dureza (consistencia implícita) de la pintura protectora del metal en el repintado automotriz.

#### 4.4.3. EL PROCESO

Existen varios pasos básicos relacionados con la preparación de la superficie a pintar como son : limpieza, lijado, tratamiento del metal desnudo e imprimado. A continuación se describen las operaciones requeridas para aplicar finalmente la pintura.

##### ➤ LAVAR EL AUTOMÓVIL

Si el vehículo ha estado en la sección de chapistería o planchado del metal es una buena idea darle un lavado completo, si por otra parte el auto esta razonablemente limpio y solo hay que hacerle un pequeño retoque se puede ir directamente a la operación 2.

Mojar con manguera y luego pasar una esponja con detergente y agua, lavar por secciones y enjuagar enseguida. Lavar primero el techo, luego las partes delantera y trasera y por ultimo los costados, en ese orden, secar el vehículo completamente.

##### ➤ LIMPIAR CON SOLUCION DESOXIDANTE

Doblar un trapo limpio y seco en forma de almohadilla y mojarlo con desoxidante, frotar el área que se va a reparar, mojándola bien. Cuando la superficie está todavía húmeda, se seca con un trapo limpio. Para estar seguro de que el desoxidante no se evapore, trabajar por pequeñas secciones a un tiempo.

El desoxidante disolverá la cera, grasa, etc., y estas sustancias contaminantes desaparecerán al secar el desoxidante.

Cambiar los trapos con frecuencia. Un trapo sucio no puede limpiar bien.

Es muy importante limpiar la superficie antes de lijar, ya que el lijado haría penetrar sustancias contaminantes en la superficie pintada.

##### ▪ REBAJAR LOS BORDES ROTOS

A<sub>1</sub> ) Cortar los bordes de las áreas rotas con papel de lija. El lijado puede hacerse a mano, usando un bloque de lijar o con una lijadora orbital.

A<sub>2</sub> ) Completar el rebajado a mano usando un bloque de lijar con papel y agua. Afinar muy bien el borde del retoque para eliminar las rallas de lijado.

##### ▪ QUITAR EL ACABADO VIEJO

Algunas veces, todo o parte del acabado viejo se presenta tan deteriorado que no es aconsejable repintarlo. Entonces hay que quitarlo.

Tal vez no sea necesario quitar el acabado hasta llegar al metal desnudo, si solo algunas pequeñas áreas de la mano final están agrietadas, pero la mano de fondo esta en buenas condiciones, entonces lo ultimo que hay que quitar es la mano final, lo cual puede hacerse lijando.

El acabado viejo puede quitarse mediante los siguientes procedimientos:

- a) Esmerilado
- b) Aplicación de solventes
- c) Removedores

#### ➤ ACONDICIONAR EL METAL

Antes de imprimir el metal desnudo necesita aplicarse un tratamiento especial de limpieza para quitar aceite, grasa y corrosión u óxido para prevenir oxidación posterior.

- Limpiar: El metal desnudo, incluyendo piezas de repuesto o recambio, deben ser completamente limpiados de la misma manera que en la operación 2 para superficies pintadas.
- Tratar el metal: El metal desnudo debe ser tratado con el acondicionador. Este producto quitará corrosión tanto de acero como de aluminio. Prepara el metal para mejorar la adhesión y deposita una capa especial que evitará la formación de óxido.

#### ➤ IMPRIMAR EL METAL DESNUDO

Retocar las áreas de metal desnudo con imprimador – aparejo. El retocado de las áreas rebajadas debe preceder a la operación 6, de manera que todo el trabajo, las secciones retocadas y el acabado viejo puedan ser lijadas y pulidas al mismo tiempo.

#### APLICACIÓN DE PRIMARIO – APAREJO

- ✓ Enmascarar con todo cuidado las áreas adyacentes
- ✓ Quitar el polvo con pistola de aire
- ✓ Revolver bien el primario
- ✓ Dar dos manos húmedas, dejando que la primera se asiente antes de pasar a la segunda mano.
- ✓ Dejar secar por dos o tres horas antes de lijar o aplicar masilla. Dejar secar por toda la noche para lijar al agua o también si la mano final será laca.  
El lijado debe hacerse a mano con un bloque de lijado como soporte del papel o con una lijadora orbital.

#### ➤ LIJADO Y PULIDO

Lijar solamente las áreas imprimadas con papel de lija y agua o en seco, entonces continuar con la siguiente operación.

#### ➤ LIMPIAR CON REDUCTOR

Quitar los residuos aceitosos de la pasta de pulir y las impresiones digitales, especialmente alrededor de los rebajados. La operación de limpieza es similar a la explicada en la operación 2.

### ➤ APLICACIÓN DE LAS MANOS FINALES

Debe distinguirse si la pintura final a aplicar es laca o esmalte acrílico. Se presenta por separado el proceso para cada uno de ellos.

#### ▪ Aplicación de laca acrílica.

- a) Enmascarado final: Una vez que el automóvil está en la sección de pintura debe enmascarse de cualquier parte descubierta que pudiera estar expuesta a exceso de rociado.
- b) Quitar el polvo con pistola de aire.
- c) Revolver la pintura a fondo
- d) Colar
- e) Mano uniformizante o mano de neblina
- f) Mano uniformizante o mano de neblina 2

#### ▪ Aplicación de esmalte acrílico

- m) Enmascarado final
- n) Quitar el polvo con pistola de aire
- o) Revolver la pintura a fondo
- p) Colar
- q) Aplicación completa

Para visualizar la secuencia del proceso se presenta el diagrama de flujo en la figura 4.2.1

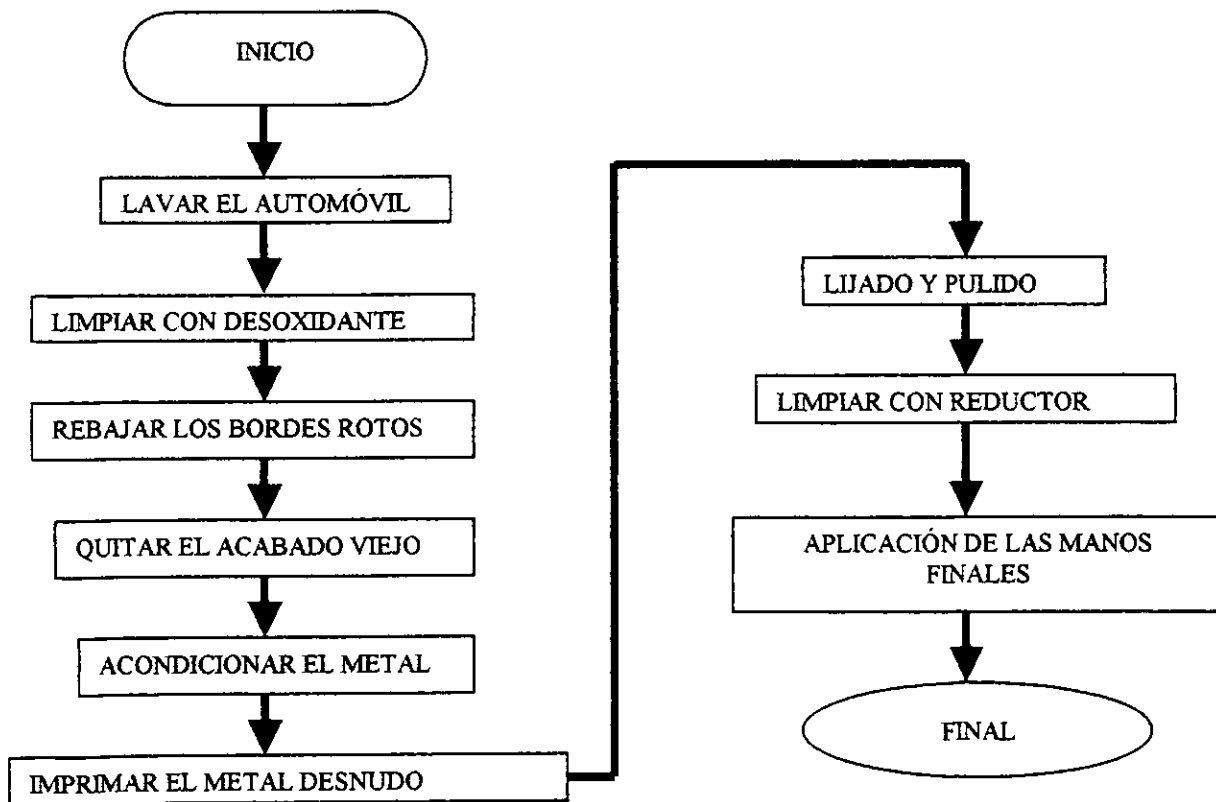


FIGURA 4.4.1 Proceso formal de repintado automotriz



\*NOTA: Como se hace notar, el proceso citado anteriormente es una forma idónea de operar el repintado automotriz, pero la realidad es que en el ramo práctico de estos negocios, los procesos varían de acuerdo al personal que realiza las operaciones. Por ello, éste ejemplo se enfoca al mejoramiento de los procesos que normalmente se usan, basándose en factores que influyen de manera significativa en los métodos más usados comúnmente, sin perder de vista las especificaciones definidas por los fabricantes.

El proceso común no comprende todas las actividades ni está estandarizado. Sin embargo, visitando varios talleres y cuestionando a los hojalateros / pintores, se estableció el proceso de la figura 4.4.2. como el más comúnmente utilizado.

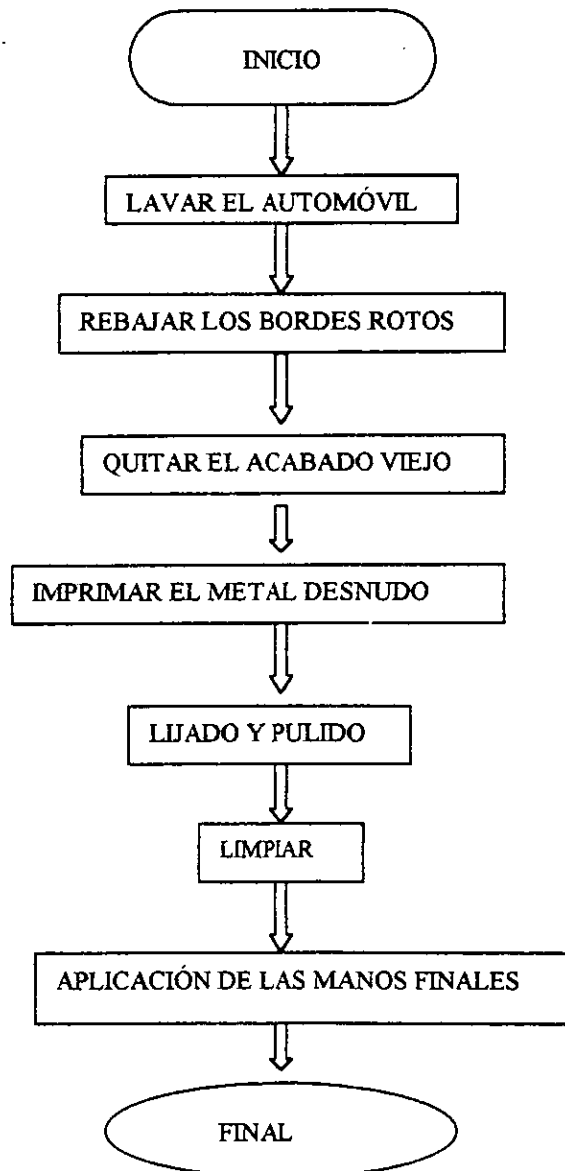


FIGURA 4.4.2. Diagrama de flujo del proceso de repintado automotriz común.



### TIPOS DE IMPRIMADORES (imprimador – aparejo)

Dentro de los factores que es importante considerar es sin duda el imprimador. Un buen primario debe tener las siguientes características:

- ❖ Adhesión
- ❖ Poder de relleno
- ❖ Resistencia al asentamiento
- ❖ Facilidad de lijado
- ❖ Encubrimiento de la mano final
- ❖ Secado rápido

En este ejemplo se consideraron dos tipos por el uso generalizado que se observó en campo. Ellos son:

#### Primario "PREPARAKOTE"

**USOS:** Se usa donde se requiere rellenar superficies de metal desnudo.

**PROPIEDADES:** Rellena las imperfecciones de la superficie y puede lijarse resultando una superficie muy tersa. Tiene excelentes cualidades anticorrosivos y magnífica adhesión.

#### Primario "UNIVERSAL"

**USOS:** Se aplica sobre cualquier tipo de acabado y antes de cualquier clase de mano final.

**PROPIEDADES:** Brinda Un excelente encubrimiento a la mano final. Mejora la adhesión entre el sustrato y el acabado nuevo. Previene hinchazón de las rayas de lijado.

#### 4.4.4 DESARROLLO

Como se estableció previamente, la característica de calidad considerada como variable de respuesta es la dureza (consistencia implícita) que debe tener la capa de pintura colocada sobre una superficie metálica. Aunque la dureza es una variable dimensional que puede cuantificarse en una escala normalizada, en el estudio que aquí se presenta, se consideró como **atributo** ya que en el resultado final del proceso no es importante si la capa de pintura es demasiado dura, solo importa que resista el desprendimiento y la penetración de manera consistente.

Para establecer el criterio de PASA – NO PASA, se recurrió a algunos métodos de medición disponibles como la **prueba de impacto** también conocida como prueba de bala, lo que implicaba el desplazamiento de equipos de laboratorio al campo cuando el factor tiempo era importante. Por ello se recurrió a una prueba práctica conocida como la **prueba del lápiz** la cual se adoptó para determinar la dureza de la película de pintura estudiada en este caso: El proceso normalizado aplicando esta prueba se basa en la clasificación también normalizada de la dureza de los lápices usados para dibujar, donde el tipo “B” es el más suave, sigue el “HB”, “H”, y así sucesivamente hasta llegar al lápiz más duro.

El proceso seguido para llevar a cabo la medición con este método consta de las siguientes operaciones:

OPERACION 1. Se descubre la mina de cada lápiz dejando que permanezca su forma cilíndrica.

OPERACIÓN 2. Se coloca sobre la película de pintura sometida a prueba, formando un ángulo aproximadamente de 45°.

OPERACIÓN 3. Se raya la superficie, aplicando la presión requerida al escribir normalmente (solo hacia fuera, no debe regresarse el lápiz). Esta operación deberá hacerse siempre por la misma persona pues de otra manera se estaría introduciendo un nuevo factor de variación que debería ser también considerado en el experimento.

OPERACIÓN 4. Se realiza la operación anterior tres veces sobre el mismo lugar (girando el lápiz por el posible desgaste).

OPERACIÓN 5. Se inspecciona de manera visual la posible penetración del lápiz en la película de pintura.

OPERACIÓN 6. Si no dejó ralladura significativa, entonces se cambia el tipo de lápiz y se repiten las operaciones (hasta llegar al lápiz más duro)

A continuación en la figura 4.4.3 se simplifica este proceso en un diagrama de flujo.

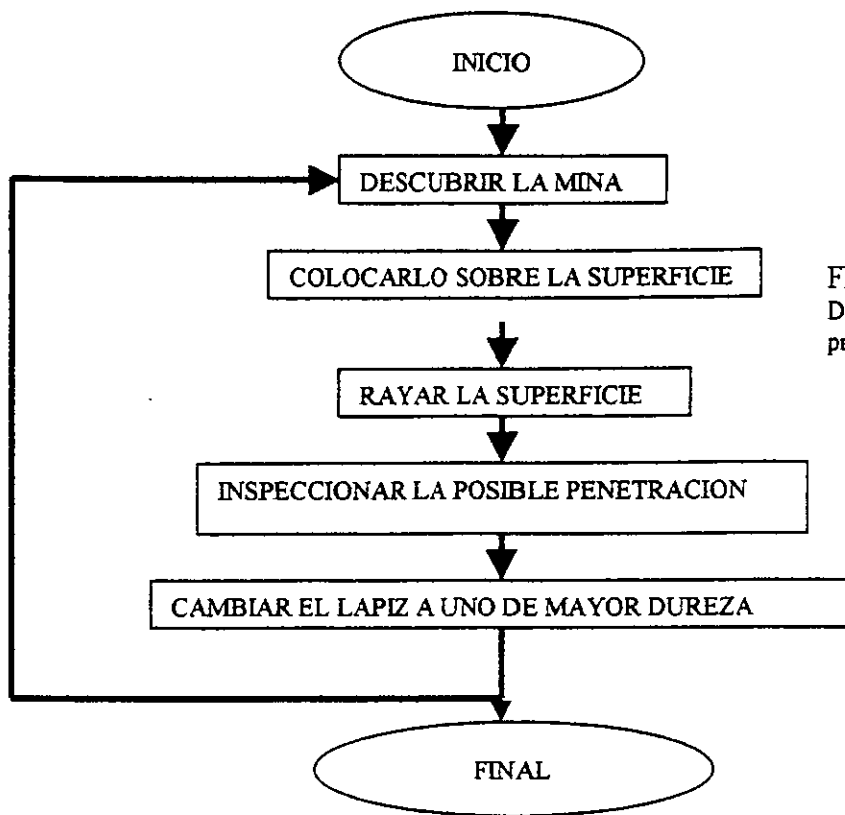


FIGURA 4.4.3  
Diagrama de flujo para la prueba del lápiz.

Tratando de hacer más objetiva esta prueba, se trata de ilustrar en la figura 4.4.4.

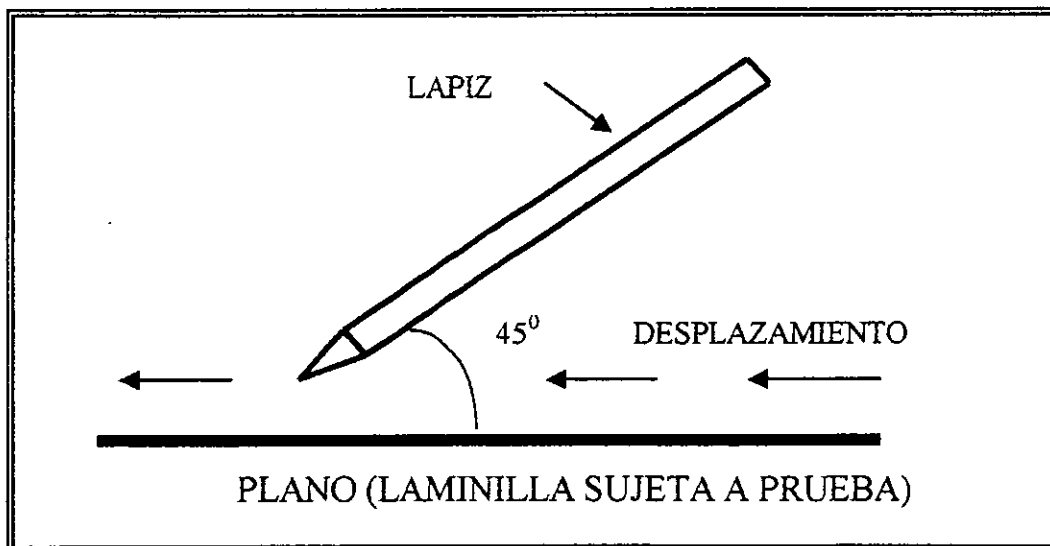


FIGURA 4.4.4 Posición y desplazamiento del lápiz para  
- medir la dureza de la capa de pintura.

## PROCESO DE PREPARACIÓN DE LOS ESPECIMENES SOMETIDOS A PRUEBA

Para efectuar el experimento se eligieron especímenes pequeños que consisten en laminillas rectangulares con dimensiones de 4 x 8 cm , sobre las cuales se aplicó el proceso de repintado mencionado anteriormente, simulando una superficie ferrosa similar a la superficie laminada de los automóviles, sobre la que se trabajará en el futuro.

Cada laminilla puede verse de la siguiente forma:

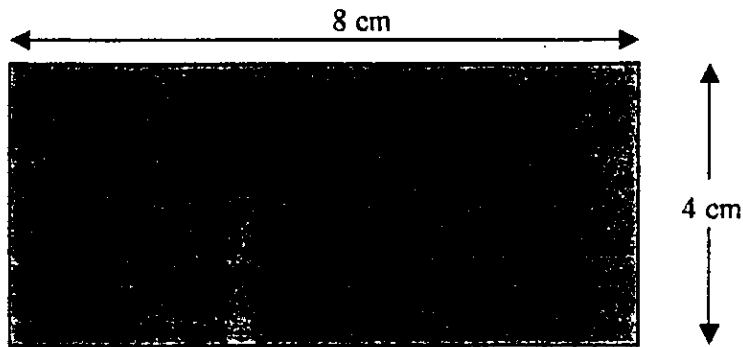


FIGURA 4.4.5 Dimensiones (sin escala) de los especímenes - sujetos a prueba .

En la parte trasera de cada laminilla se anotó el n° de tratamiento que se utilizó, siendo seleccionado de manera totalmente aleatoria.

### IDENTIFICACIÓN DE FACTORES RELEVANTES EN EL PROCESO RESPECTO DE LA CARACTERÍSTICA DE CALIDAD SELECCIONADA.

Con las respuestas obtenidas al entrevistar varios hojalateros – pintores respecto del proceso que utilizan en su trabajo se estructuró el diagrama causa – efecto de la figura 4.4.6

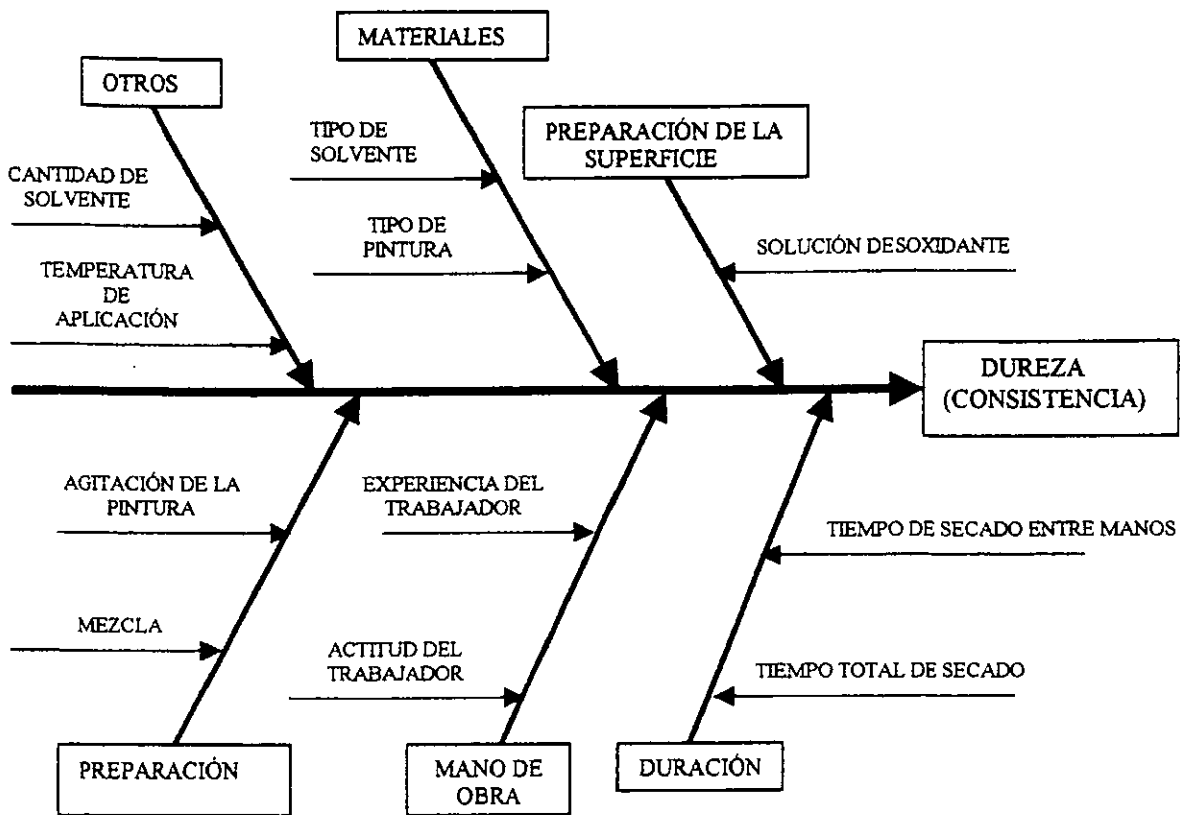


FIGURA 4.4.6. Diagrama causa – efecto de factores relevantes en la dureza - (consistencia) de la capa de pintura automotriz.

#### 4.4.5 LISTADO DE FACTORES

Conjuntamente con hojalateros – pintores que demostraron formación profesional, fueron seleccionados los factores y niveles que se presentan en la tabla 4.4.1 como aquellos factores que son controlables en este proceso y que pueden afectar significativamente la característica de calidad en estudio. Nótese que el proceso que actualmente usan de manera común en los diversos talleres, se encuentra combinado en los dos niveles que se están manejando, de tal forma que no se puede definir un nivel específico como la situación actual.

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2
A: Tipo de primario base	Primer de piroxilina (actual)	Preparakote
B: Preparación de la superficie	Con solución desoxidante	Lavado (actual)
C: Tipo de solvente	Thinner estándar (actual)	Thinner acrílico
D: Tipo de pintura	Laca acrílica	Esmalte acrílico (actual)
E: Cantidad de solvente	Proporción 1.5 a 1 (actual)	Proporción 2 a 1
F: Tiempo de secado entre manos	10 minutos	5 minutos (actual)
G: Tiempo de secado total	24 horas	48 horas (actual)

TABLA 4.4.1 Tabla de factores y niveles asociados considerados importantes.

#### 4.4.6 SELECCIÓN DE UN ARREGLO ORTOGONAL

Considerando que el número de factores es de siete y que menospreciamos la interacción que pudiera presentarse entre ellos, conviene la utilización de un  $L_8 (2^7)$ . Para cada tratamiento se prepararon 10 laminillas con iguales características base que fueron sometidas al tratamiento respectivo.

El orden en que se ejecutaron los tratamientos se dejó al azar, midiendo como se indicó previamente la dureza con la prueba del lápiz. Cuando una laminilla se marcaba antes de alcanzar el grado tope establecido para la prueba y acordado por los hojalateros - pintores que coadyuvaron en el experimento, se consideraba rechazada y el total para cada tratamiento fue registrado en la tabla 4.4.2.

ORDEN DE EJECUCIÓN	TRATAMIENTO	A	B	C	D	E	F	G	LAMINILLAS RECHAZADAS
3	1	1	1	1	1	1	1	1	4
5	2	1	1	1	2	2	2	2	3
1	3	1	2	2	1	1	2	2	2
8	4	1	2	2	2	2	1	1	6
6	5	2	1	2	1	2	1	2	7
4	6	2	1	2	2	1	2	1	6
2	7	2	2	1	1	2	2	1	9
7	8	2	2	1	2	1	1	2	5

TABLA 4.4.2. Arreglo ortogonal utilizado y resultados obtenidos.

En el tratamiento N<sup>o</sup> 1, para cada uno de los factores de la A hasta la G, el número 1 aparece en el arreglo ortogonal. Esto puede describirse como un experimento donde el tratamiento a ejecutar es :  $A_1 B_1 C_1 D_1 E_1 F_1 G_1$  ; específicamente deberá utilizarse:

FACTORES Y NIVELES							
TRATAMIENTO	TIPO DE PRIMARIO BASE	PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SOLVENTE	TIPO DE PINTURA	CANTIDAD DE SOLVENTE	TIEMPO DE SECADO ENTRE MANOS	TIEMPO DE SECADO TOTAL
1	Primer	Desoxidante	Estándar	Laca	1.5. a 1	10 minutos	24 horas

TABLA 4.4.3. Descripción específica para el tratamiento 1.

La ortogonalidad garantiza una comparación justa entre los factores y asimismo entre sus propios niveles.

#### 4.4.7 TOTALES PARA CADA FACTOR EN CADA NIVEL

Con base en la cantidad de laminillas que no alcanzaron el nivel mínimo de dureza y que se encuentran en la columna de la derecha de la tabla 4.4.3., pudo realizarse la comparación entre los distintos niveles de cada factor, por ejemplo  $A_1$  y  $A_2$  fueron contrastados mediante un análisis regular comparando el número total de laminillas no exitosas obtenidas en los experimentos 1,2,3 y 4 contra las que generaron los experimentos 5, 6, 7 y 8. Estos totales fueron para todos y cada uno de los factores en sus dos niveles los siguientes:

$A_1 = 4 + 3 + 2 + 6 = 15$	$B_1 = 4 + 3 + 7 + 6 = 20$	$C_1 = 4 + 3 + 9 + 5 = 21$
$A_2 = 7 + 6 + 9 + 5 = 27$	$B_2 = 2 + 6 + 9 + 5 = 22$	$C_2 = 2 + 6 + 7 + 6 = 21$
$D_1 = 4 + 2 + 7 + 9 = 22$	$E_1 = 4 + 2 + 6 + 5 = 17$	$F_1 = 4 + 6 + 7 + 5 = 22$
$D_2 = 3 + 6 + 6 + 5 = 20$	$E_2 = 3 + 6 + 7 + 9 = 25$	$F_2 = 3 + 2 + 6 + 9 = 20$
$G_1 = 4 + 6 + 6 + 9 = 25$		
$G_2 = 3 + 2 + 7 + 5 = 17$		

El promedio de piezas defectuosas fue utilizado para tomar la decisión y se obtuvo dividiendo los totales entre cuatro, obteniendo:

$\bar{A}_1 = 3.75$	$\bar{B}_1 = 5$	$\bar{C}_1 = 5.25$	$\bar{D}_1 = 5.5$	$\bar{E}_1 = 4.25$	$\bar{F}_1 = 5.5$	$\bar{G}_1 = 6.25$
$\bar{A}_2 = 6.75$	$\bar{B}_2 = 5.5$	$\bar{C}_2 = 5.25$	$\bar{D}_2 = 5$	$\bar{E}_2 = 6.25$	$\bar{F}_2 = 5$	$\bar{G}_2 = 4.25$

Mediante la comparación de promedios se observa que el primario de piroxilina no se debe cambiar porque si lo cambiamos por el preparakote el porcentaje de defectos aumentaría de 3.75 % a 6.75 %, de igual forma pueden ser comparados por separado los porcentajes del resto de los factores del experimento, que se emplearon en cada nivel y en cada uno de los factores. Con esta comparación obtenemos el tratamiento óptimo o condiciones óptimas determinadas:

$A_1 ; B_1 ; C_1 \text{ o } C_2 ; D_2 ; E_1 ; F_2 \text{ y } G_2$





Este resultado viene a confirmar que el conocimiento empírico de los hojalateros – pintores está justificado, ya que el experimento dio como condiciones óptimas las actuales, con la excepción de la preparación de la superficie que corresponde al factor B y donde se recomienda el uso de solución desoxidante. Con este cambio en el factor, podemos obtener una mayor oportunidad de que resista al desgarre o penetración.

La condición óptima citada, tiene una alternativa en el factor C, porque el porcentaje en ambos niveles fue del mismo valor, por lo tanto muestra que no afecta el proceso si se escoge cualquiera de los dos niveles. Se utilizará entonces otro criterio para la selección del que se utilizará en la práctica.

Siendo los porcentajes relativamente pequeños, podría justificarse una transformación del tipo “omega” a efecto de hacer más discriminativos los resultados, situación que rebasa los propósitos de éste trabajo.

#### 4.4.8 CORRIDA DE VERIFICACIÓN

Se realizó una corrida con el tratamiento óptimo a efecto de verificar la veracidad de esta conclusión. Se prepararon otras 10 laminillas (especímenes) que se sometieron a este experimento. La corrida fue sometida a la prueba del lápiz obteniendo 8 recubrimientos con la dureza necesaria para ser aprobados según el criterio de aceptación previamente establecido. Esto implica la existencia de solo 2 especímenes rechazados por penetración, lo que implica necesariamente un mejoramiento en la calidad del trabajo realizado lo cual se traduce en un mayor rendimiento de la inversión destinada al repintado automotriz. El ahorro es función de la frecuencia con que deba pintarse el automóvil, lo que finalmente es una cuestión de carácter estético y con frecuencia subjetivo, propio de cada individuo.

El proceso al que se ha referido como actual en este ejemplo corresponde al llevado a cabo en el “SERVICIO MORELOS”, el cual aún en proporción mínima, logró una mejora efectiva en su proceso. Si la organización de referencia tiene otro proceso distinto, muy probablemente el ahorro para el cliente será más significativo.

Actualmente “SERVICIO MORELOS” tenía reclamaciones por insatisfacción del cliente en cuanto a la dureza hasta en 4 de cada 10 casos (40 %). Con este método se espera que esta cantidad no rebase los 2 de 10 casos (20 %).

La optimización permite un ahorro tal, que representa el 50 % de los costos en que actualmente se incurre por fallos de calidad en el proceso de repintado actual, independientemente de otros costos asociados de carácter intangible.

Los procesos de mejoramiento deberán integrarse paulatinamente en toda actividad productiva. El repintado automotriz no es la excepción aún cuando los diseños y la tecnología de los automóviles cambien de un VW clásico a una línea aerodinámica impulsado por energía solar como se aprecia en la fotografía de la página siguiente.



La pintura protege a los automóviles, independientemente de ser un “clásico” o un prototipo aerodinámico con fuerza motriz fundada en la energía solar.

## **CASO 5: APLICACIONES DIVERSAS DEL DISEÑO DE TOLERANCIAS**

# APLICACIONES DIVERSAS DEL DISEÑO DE TOLERANCIAS

## APLICACIÓN 1

Un fabricante de cristal usa maquinas de ultrasonido donde el material es removido de la superficie de cristal, con micro partículas o erosión por partículas abrasivas. El tipo de herramienta vibratoria de baja amplitud y alta frecuencia, transmite a una alta velocidad granos finos y abrasivos entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo. Con abrasivos finos hay tolerancias de 0.0005 in (pulgadas) ó mejor, lo cual se puede lograr en el proceso.

El fabricante usa maquinas de ultrasonido para cortar placas cuadradas de cristal con una dimensión principal de  $20 \pm 0.0003$  in. Cuando las dimensiones de las placas de cristal son de menos de 19.9997 incurre en un costo por placa de \$ 60.º, por otro lado cuando las placas de cristal tienen dimensiones mayores de 20.0003 in, se mandan a recorte con un 70 % de probabilidad de que el corte de cristal ahora se encuentre entre especificaciones de  $20 \pm 0.0003$  in. El costo de recortar es \$ 10.º/pieza . Se toma una muestra de 30 placas, la dimensión principal es medida y las dimensiones encontradas son las siguientes:

19.9990	19.9991	19.9998	19.9999	20.0000
19.9998	20.0001	20.0002	20.0001	19.9998
20.0006	19.9991	20.0005	20.0003	19.9999
19.9997	19.9998	20.0004	20.0002	20.0006
20.000	19.9990	20.0003	19.9997	20.0000
19.9899	19.9998	19.9999	20.0000	20.0001

Asumiendo que las medidas siguen una distribución normal

- ¿Cuál es la pérdida de calidad?
- ¿Cuál debe de ser la tolerancia para que la pérdida de calidad sea minimizada?
- ¿Cuál es el efecto de recortar sobre la pérdida de calidad?
- ¿Cuál de los siguientes efectos provoca una mayor pérdida de calidad?

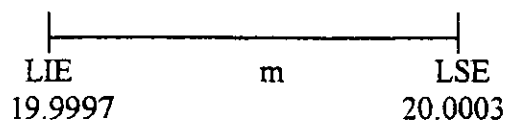
Cambiando la tolerancia de la dimensión principal a  $20 \pm 0.0005$  in.

Reduciendo los costos de recorte por placa a \$ 5.º.

### SOLUCION

Placas cuadradas de cristal, tolerancia cliente  $\Delta o = 0.0005$  in (mercado abierto)

Especificaciones:  $20 \pm 0.0003$  in



- i) Si la dimensión es < LIE el costo en que se incurre es de \$60.
- ii) Si la dimensión es > LIE se recuperan a un costo de \$10 / pieza el 70 % de las piezas; el 30 % se pierde con un costo incrementado de \$70 / pieza.

Con los datos de 30 placas podemos conocer los porcentajes respectivos:

$$\bar{x} = 19.99958667 \text{ (* obsérvese que el proceso esta desviado del valor objetivo.)}$$

$$S \longrightarrow \sigma = 0.001878186$$

$$Z_1 = (19.9997 - 19.99958667) / 0.00187818 = 0.06$$

$$Z_2 = (20.0003 - 19.99958) / 0.00187818 = 0.383$$

Porcentaje que es menor al LIE =  $P(Z_1 \leq 0.06) = 52.39 \%$ .

Porcentaje que se acepta  $P(Z_1 \leq Z \leq Z_2) = 12.41 \%$

Porcentaje que se reprocesa  $P(Z_2 \geq 0.383) = 35.20 \%$

③ Porcentaje que se recupera a un costo de \$10 es igual al 24.79 del total

③ Porcentaje que se pierde con un costo de \$70 es igual al 10.41 % del total.

Por 100 piezas el costo A esta dado por :

$$52.39(\$60) + 24.79 (\$10) + 10.41(\$70) = \$ 4120 / 100 piezas$$

Costo por pieza A = \$41.20 / pieza.

a) La perdida de calidad será entonces

$$L(y) = (41.20 / 0.0003^2) * 0.00187818^2 = \$1614.85 / pieza.$$

b) La pérdida que se transfiere al cliente es el valor de una placa cuando sale mal.

Este costo es  $A_0 = \$60$

Sabemos que  $\Delta_0 = 0.0005$  pulgadas (para un cliente común)

Sabemos que  $q(\Delta)$ , el porcentaje que se acepta, es 12.41 % para una  $\Delta$  actual.

$$\text{Para minimizar la pérdida, partimos de un valor de } \Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} * \Delta_0 =$$

$$= \sqrt{\frac{41.2}{60}} * 0.0005 = 0.00041 \text{ como una primera aproximación.}$$

Con esto el porcentaje de aceptación será:

$$q(\Delta) = P(-\Delta / \sigma \leq t \leq \Delta / \sigma) = 0.1742$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{41.2}{60(0.1742)}} * 0.0005 = 0.00099$$

$$q(\Delta) = P(t \pm 0.5285) = 0.4038$$

$$\Delta = \frac{0.000414}{\sqrt{q(\Delta)}} = 0.000414 / 0.6354 = 0.00065$$

$$q(\Delta) = P(t \pm 0.346) = 0.2696$$

$$\Delta = 0.000414 / 0.5192 = 0.000797$$

$$q(\Delta) = P(t \pm 0.42) = 0.3256$$

$$\Delta = 0.000414 / 0.5706 = 0.000725$$

$$q(\Delta) = P(t \pm 0.386) = 0.2996$$

$$\Delta = 0.000414 / 0.54735 = 0.00075 \text{ por inducción } \boxed{\Delta = 0.00074 \text{ pulgadas}}$$

c) La posibilidad de recortar es equivalente a un reproceso a un costo muy por debajo del de la pieza que se va a "scrap".  
Esto hace que la pérdida de calidad sea menor.

d)

d<sub>1</sub>) si se cambia la tolerancia de la dimensión principal  $\Delta = 0.0005$

$$L(y) = (41.20 / 0.0005^2) * 0.00187818^2 = \$581.34 / \text{pza.}$$

d<sub>2</sub>) si los costos de recorte por placa se reducen a \$5.<sup>00</sup> entonces el costo A se modifica.

Por 100 piezas sería:

$$52.39(60) + 24.79(5) + 10.41(65) = \$3944$$

para una pieza A = \$39.44 / pza.

$$L(y) = (39.44 / 0.0003^2) * 0.00187818^2 = \$1545.85$$

**Obsérvese que la reducción de costo no es suficiente para abatir la pérdida.  
Conviene más incrementar la tolerancia.**

## APLICACIÓN 2

1. un proveedor automotriz hace platos de clutch friccionantes para transmisión automática con un índice de capacidad de proceso Cp de 1.1; en cualquier situación, su proceso hace más de 70% de platos aceptables relacionados a los límites superior e inferior especificados. El dibujo para manufactura establece un espesor total  $0.125 \pm 0.10$  pulgadas. El costo de "scrap" en la fábrica es \$25 por parte. Cuando al cliente le llegan platos fuera de sus propias especificaciones, simplemente los devuelve y tiene que comprar platos importados que según estudios previos satisfacen ampliamente sus especificaciones. Cada plato de este tipo le cuesta \$150 adicional al costo del fabricado en el país.

- ¿Cuales son las especificaciones del cliente?
- ¿Cuál es la pérdida debido a la variabilidad en los platos de clutch?

### SOLUCION

Datos

Cp = 1.1                      70 % de platos aceptables  
m = 0.125  
 $\Delta = 0.10$   
A = \$ 25  
Ao = \$ 150

- Cuales son las especificaciones del cliente.

$$\Delta = \sqrt{A / A_o} * \Delta_o \quad \leftarrow \text{se desea encontrar la tolerancia del cliente. Despejamos } \Delta_o$$

$$\Delta_o = \Delta / \sqrt{A / (A_o * q)} = 0.10 / \sqrt{25 / (150 * 0.70)}$$

$$\Delta_o = \underline{0.204}$$

- ¿Cuál es la pérdida debido a la variabilidad en los platos de los clutch?

$$C_p = 2 \Delta / 6 \sigma \quad \text{de aquí despejamos sigma}$$

$$\sigma = 2(0.10) / 6(1.1) = 0.0303$$

$$L(y) = (A_o / \Delta_o^2) \sigma^2 \quad \longrightarrow \quad L(y) = 150 / (0.204)^2 (0.0303)^2 =$$

$$L(y) = \underline{\$13.30}$$

### APLICACIÓN 3

Un robot es usado en un proceso de soldadura para grietas, el robot es programado para que siga la pista del producto en un transportador elevado y así suelde la junta. La tolerancia de las dispersiones de la soldadura desde el centro de la junta es de  $\pm 0.005$ . Las siguientes observaciones de dispersión fueron tomadas en relación al centro de la junta:

0.003	0.002	0.005	-0.004	-0.003
-0.002	0.003	0.004	-0.003	-0.005
-0.004	0.003	0.005	-0.004	0.003
0.004	0.005	-0.003	-0.003	0.004
-0.003	-0.002	0.005	0.004	0.005

Un sistema de guía de robot es introducido para incrementar la calidad de las juntas soldadas. El sistema de la guía esencialmente es el sistema de visión de una maquina la cual guía el robot a lo largo de la junta mas bien que usar puntos definidos previamente. Las siguientes dispersiones fueron observadas después de la introducción del sistema de guía:

0.001	0.002	-0.001	-0.002	0.003
-0.002	0.003	-0.001	-0.003	0.002
-0.004	-0.002	0.001	0.002	0.001
0.003	0.002	0.001	-0.003	-0.001
0.000	-0.002	-0.003	0.002	0.001

### PREGUNTAS Y SOLUCION

#### DATOS

$$A = 150$$

$$\Delta = \pm 0.005$$

$$n = 25$$

$$\sigma^2 = 0.0000142 \text{ (antes de introducir guía)}$$

Con sistema de guía

$$\sigma^2 = 0.00000456$$

a) ¿Cuál es el efecto de la introducción guía del robot?

Disminuir la variabilidad o sea, reduce la dispersión de la soldadura.



- b) Si el costo de un producto defectuoso cuesta \$150. ¿Cuáles serían los ahorros, después de la introducción del sistema de guía?

$$L(y) = Kv^2 \quad K = A / \Delta^2$$

$$L(y) = (150 / 0.005^2) * 0.00000456 = \$27.36$$

$L(y) = \$27.36$  perdida obtenida al utilizar la guía del robot

$$L(y) = (150 / 0.005^2) * 0.0000142 = \$85.20$$

$L(y) = \$85.2$  perdida obtenida originalmente

Ahorro

$$\$85.2 - 27.36 = \$ 57.84^*$$

\* Obsérvese que este ahorro no es tan real, puesto que utilizar la guía del robot necesariamente tiene asociado un costo que habría que considerar, restándolo.

## APLICACIÓN 4

Un proveedor de partes automotrices para una empresa ensambladora Alemana, ha sido advertido de que si en un plazo de 12 meses no logra la certificación bajo la norma VDA 6.0 perderá las ventas con dicha empresa. Dentro del proceso de desarrollo de los elementos correspondientes a la norma, decide iniciar un proceso de mejora en su producto principal centrado en la reducción de la variabilidad de su diámetro. Esta empresa fabrica válvulas de motor cuyo diámetro principal estaba centrado en planos de  $0.635 \pm 0.012$  in. (pulgadas). Durante el tiempo que se mantuvo esta especificación, el departamento de servicio a clientes cuantificó la pérdida que se les transfiere a estos, en la cantidad de \$1000, toda vez que la falla era detectada por el cliente hasta que la válvula era montada en su motor. Con el proceso de mejora continua la tolerancia de dicho diámetro en planta puede disminuirse en un 50 %, logrando que el costo interno por no satisfacer las nuevas especificaciones prácticamente se mantuviera constante en \$50.

### PREGUNTAS Y SOLUCIÓN

- a) Suponiendo que la capacidad del proceso de producción del proveedor puede satisfacer las exigencias de los clientes, ¿Cuáles serían las especificaciones que podrían ser satisfechas con estas condiciones?

DATOS:  $A = \$50$  ;  $A_0 = \$1000$  ;  $\Delta = 0.006$  (valor mejorado)

$$A = (A_0 / \Delta_0^2) * \Delta^2 \quad \Delta_0 = \sqrt{\frac{A_0}{A}} \Delta$$

$$\Delta_0 = \sqrt{\frac{1000}{50}} * 0.006 = 0.0268$$

las especificaciones que se pueden satisfacer son:

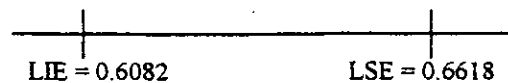
$$0.635 \pm 0.0268$$

- b) El cliente, al saber de la mejora, coloca un pedido de 20,000 válvulas integrando las nuevas especificaciones al contrato. ¿Cuál debería ser la tolerancia del proveedor si en un determinado momento la gráfica de control de su proceso indicara que se ha desviado de su valor objetivo y presenta un comportamiento probabilístico normal con un nivel promedio de 0.628 y una desviación estándar de 0.020?

SOLUCION: Necesitamos conocer la fracción defectuosa (o aceptable) del proceso  $q(\Delta)$ .

$$\mu = 0.628$$

$$\sigma = 0.013$$



Estandarizando

$$Z_1 = (0.6082 - 0.628) / 0.020 = -0.99$$

$$Z_2 = (0.6618 - 0.628) / 0.020 = 1.69$$

$$p(-0.99 \leq Z \leq 1.69) \implies q(\Delta) = 0.3389 + 0.4545$$

$$q(\Delta) = 0.7934$$

Sustituyendo

$$\Delta = \sqrt{A / (A_0 * q(\Delta))} * \Delta_0 = \sqrt{50 / (1000 * 0.7934)} * 0.0268 =$$

$$\Delta = 0.00673$$

Obsérvese que la tolerancia del proveedor se ve incrementada para satisfacer las especificaciones del cliente, no obstante que aproximadamente el 21% de su producción es defectiva.

El proveedor deberá implantar un sistema de inspección si persiste la desviación del nivel de su proceso aún cuando lo ajuste cada vez que detecte dicha desviación.

## APLICACIÓN 5

En la producción de pistones en una empresa automotriz, un cierto tipo de pistón debe satisfacer las siguientes especificaciones  $4.200 \pm 0.008$  in. Cuando un pistón no satisface estas condiciones se vende como chatarra, perdiendo su valor que corresponde al costo de producción de \$100 / pieza.

En la planta se lleva a cabo la aplicación del control estadístico del proceso. Particularmente para determinar la capacidad del mismo se tomo una muestra representativa de 30 pistones obteniendo las siguientes mediciones (NOTA: medidas codificadas en milésimas de pulgada + 4.180 in).

18	23	16	24	21
22	14	19	22	24
21	20	22	14	24
18	26	24	18	16
26	16	21	24	18
23	18	20	21	14

Usando un recubrimiento electrolítico se puede controlar el espesor de una manera más efectiva, garantizando un índice de capacidad del proceso de 1.2, pero este proceso incrementa el costo de producción en un 15% lo que se traduce en un costo significativo dado que el volumen de producción es de 5400 unidades por día.

Compare las pérdidas de calidad en condiciones normales y con la aplicación del recubrimiento electrolítico.

### SOLUCION

Especificaciones  $4.200 \pm 0.008$

$m = 4.200$

$A = \$100$

$\Delta = 0.008$

$n = 30$  datos decodificados

4.198, 4.202, 4.201, ....., 4.196, 4.198, 4.194.

$$\bar{x} = 4.20023$$

$$s = 0.00353 * \implies \sigma^2 = 0.00353^2 = 0.00001246$$

\*Este valor obtenido directamente en milésimas de pulgada daría  $s = 3.53$ ; decodificando daría lo mismo.

El proceso tiene una pérdida

$$L(y) = k v^2$$

$$L(y) = (100 / 0.008^2) * 0.00353^2 = \underline{\$ 19.47/pieza}$$

Para 5400 unidades / día la pérdida es \$ 105,138.84/día

Con el recubrimiento electrolítico  $C_p = 1.2 = (2\Delta / 6\sigma)$

$$\sigma = 2\Delta / 6(1.2) = 2(0.008) / 7.2 = 0.00222 \rightarrow \sigma^2 = 0.000004938$$

En este caso, considerando el incremento del 15% en costos y por tanto en A; la pérdida es:

$$L(y) = (115 / 0.008^2) * 0.00222^2 = \$8.8557 / unidad$$

Para 5400 unidades día, la pérdida es \$ 47,820.88.

Comparando resultados, el ahorro al utilizar el proceso electrolítico por día es:

Ahorro

$$\$ 105,138.84 - 47820.88 = \$57,317.96$$

**CONCLUSIÓN:** conviene utilizar el recubrimiento dado por el proceso electrolítico.

## APLICACIÓN 6

Un proveedor (fabricante) de “defensas” de automóvil utiliza un proceso electrolítico para recubrir su producto con una película de cromo para protegerla de la corrosión, crear una superficie resistente al desgaste y mejorar su apariencia. El espesor de la película de cromo depositada depende del tiempo de proceso y de la cantidad de la corriente que pase por la cuba electrolítica. La especificación de la película de cromo es  $0.0005 \pm 0.0003$  in. Si el valor de la película de cromo cae fuera de este rango por el lado inferior, la pieza no tardara en acusar la oxidación, pero si la película de cromo rebasa los límites superiores, se torna “quebradiza” situación que también obliga al propietario del coche (cliente) a reemplazarla con el consiguiente costo, valor que se calcula en \$5000 pesos para cualquier caso.

El proveedor debe ajustar su proceso a efecto de garantizar la calidad a sus clientes, para lo cual introduce dispositivos de control de factores críticos y otros elementos de tal manera que en una producción piloto de 20 “defensas” se midió el espesor de la película de cromo obteniendo los siguientes resultados: (codificados en diezmilésimas de pulgada).

3.8	2.0	5.6	3.4	6.2	5.6	4.8	7.1	3.5	6.4
4.2	5.2	6.9	2.3	4.0	7.6	3.0	5.0	4.4	6.2

Actualmente se sabe que la capacidad del proceso es tal que un gran porcentaje de piezas debe ser reprocesada.

Cuando una pieza se sale del rango de tolerancia especificado en planta del fabricante, incurre en un costo de \$800 pesos debido al reproceso a que tiene que someter cada pieza incluyendo el costo de remover el cromo, los químicos usados, la energía, etc.

### DATOS

$m = 0.0005$  in      codificado  $m = 5$  (diezmilésimas de pulgada)  
 $\Delta o = \pm 0.0003$  in      codificado  $\Delta o = \pm 3$  (diezmilésimas de pulgada)  
 $A_o = \$5000$  ;     $A = \$800$

### PREGUNTAS Y SOLUCION

- a) En estas condiciones donde el proceso no es hábil para satisfacer las especificaciones del cliente. ¿Cuál debe ser la tolerancia del proveedor?

Se desconoce  $q(\Delta)$  por lo que no se puede calcular  $\Delta$  directamente

Se calcula  $\sigma$  usando los 20 datos codificados

$$\bar{x} = 4.86$$
$$s \longrightarrow \sigma = 1.60 \quad \text{se usa } s \text{ como estimador de } \sigma$$

1. Se calcula un  $\Delta$  de "arranque" suponiendo capacidad del proceso. (Se utilizan diezmilésimas de pulgada).

$$\Delta = \sqrt{800/5000} * 3 = 1.2$$

$$q(\Delta) = q(1.2) = \int_{-1.2/1.6}^{1.2/1.6} f(t) dt = \int_{-0.75}^{0.75} f(t) dt = 0.5468$$

2. Calculo de la 1ª aproximación:

$$\Delta = \sqrt{800/5000(0.5468)} * 3 = 1.62$$

$$q(\Delta) = q(1.62) = \int_{-1.62/1.6}^{1.62/1.6} f(t) dt = \int_{-1.01}^{1.01} f(t) dt = 0.6876$$

3. Calculo de la 2ª aproximación:

$$\Delta = \sqrt{800/5000(0.6876)} * 3 = 1.45$$

$$q(\Delta) = q(1.45) = \int_{-1.45/1.6}^{1.45/1.6} f(t) dt = \int_{-0.90}^{0.90} f(t) dt = 0.6318$$

4. Calculo de la 3ª aproximación:

$$\Delta = \sqrt{800/5000(0.6318)} * 3 = 1.51$$

- 5.- Cuarta aproximación

$$q(\Delta) = q(1.51) = \int_{-1.51/1.6}^{1.51/1.6} f(t) dt = \int_{-0.94}^{0.94} f(t) dt = 0.6528$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{800(0.6528)}{500}} * 3 = 1.48$$

- 6.- Calculo del a 5ª aproximación:

$$q(\Delta) = q(1.48) = \int_{-1.48/1.6}^{1.48/1.6} f(t) dt = \int_{-0.925}^{0.925} f(t) dt = 0.645$$

$$\Delta = \sqrt{800/5000(0.645)} * 3 = 1.49 \text{ valor cercano al del paso anterior, por lo que:}$$

$$\underline{\Delta = 1.49} \quad \text{Decodificado } \Delta = 0.000149 \text{ in.}$$

**Obsérvese que el proceso tiene aproximadamente 35.5% de defectuosos, lo que justifica el procedimiento seguido.**

b) Si se logra mejorar la capacidad del proceso a un costo de \$300/pieza, de modo tal que capacidad del proceso sea la unidad. ¿Cuál será la ganancia neta de esta mejora?

Calculo de la pérdida actual:

$$L = (A_0 / \Delta_0^2) \sigma^2 = (5000 / 3^2) * 1.6^2 = \underline{\$1422.22 / pieza}$$

$$\text{Si } C_p = 1 \text{ la nueva variancia será } (W / 6)^2 = ((2*3) / 6)^2 = 1$$

$$L = (5000 / 3^2) * 1^2 = \underline{\$555.55 / pieza}$$

$$\text{Ahorro en pérdida} = 1422.22 - 555.55 = \underline{\$866.66 / pieza}$$

Puesto que gastamos \$300 / pieza para la mejora la ganancia neta será \$866.66 - 300 = \$ 566.66

c) Si podemos mejorar el proceso a un costo unitario de \$200 para llevar su índice de capacidad del proceso a un valor de 0.90, o por \$500 por unidad elevamos el Cp a 1.2, ¿Cuál de las tres mejoras deberíamos implementar si los precios por pieza fuera de \$3500 (Cp = 1), \$2900 (Cp = 0.9) y \$4000 (Cp = 1.2)?

- Mejora para que Cp = 0.9  $\rightarrow w/6\sigma = 0.9 \rightarrow \sigma = w/6(0.9) = 6/6(0.9) = 1.11$

$$\text{Pérdida } L = (5000 / 3^2) * (6 / 6(0.9)) = \underline{\$617.28 / pza.}$$

Ahorro en pérdida

$$\$1422.22 - 617.28 = \underline{\$ 804.93 / pza.}$$

menos el costo de la mejora

$$804.93 - 200 = \underline{\$604.93 / pza.}$$

- mejora para que Cp = 1.2  $\rightarrow w/6\sigma = 1.2 \rightarrow \sigma = w/6(1.2) = 0.833$

$$L = (5000 / 3^2) * (0.833) = \underline{\$462.96 / pza.}$$



Ahorro en pérdida

$$1422.22 - 462.96 = \underline{\$959.25 / \text{pza.}}$$

menos costo de la mejora

$$\$959.25 - 500 = \underline{\$459.25 / \text{pza.}}$$

**SINTETIZANDO:**

Cp	Precio / pza.	L(y)	Pérdida Total
0.9	\$2900	\$617.28	\$3517.28 *
1	3500	555.55	4055.55
1.2	4000	462.96	4462.96

\*Optimo

*Obsérvese que al cliente no le conviene que se mejore el proceso cuando le incrementan los precios.*

## APLICACIÓN 7

Las rebabas representan un problema común para todos los procesos de labrar a maquina, perforar o torcer. El método de quitar rebabas tiene un efecto directo en la calidad de la *operación de quitar rebabas*. Quitar rebabas manualmente es una operación aburrida, agotadora y monótona, y la calidad de retirar rebabas varia de una pieza de trabajo a otra.

Para lograr uniformidad entre las piezas de trabajo, un fabricante instaló un sistema automático que consiste en un robot equipado con instalaciones fijas; herramientas para retirar rebaba y artefactos o dispositivos de cambio rápido. El robot usa la herramienta de retirar rebabas y sigue el contorno de la pieza de trabajo con alta precisión para obtener la calidad deseada. Una medida de la calidad de la *operación de retirar rebabas* es la ausencia de rebabas y extremos filosos, es decir, que fragmentos de material no sean visibles y que no se pueda sentir filo. Esto puede ser logrado cuando el método usado para quitar rebaba, o los filos, producen un radio de chaflan (bisel) de 0.02 in (0.51mm) máximo. Claramente es una tolerancia tipo "S" ( Es la característica de calidad "entre menor mejor"). El costo de retirar la rebaba de la pieza de trabajo es de \$3.00. El costo unitario de la pieza de trabajo antes de la *operación de retirar rebabas* es de \$15 y el costo de operación del robot es de \$10 por hora. Suponiendo que hay una producción de 100 piezas de trabajo por hora y que las siguientes medidas del radio del bisel de 20 piezas de trabajo tomadas al azar son obtenidas:

0.015	0.017	0.020	0.021	0.010
0.013	0.022	0.015	0.009	0.015
0.019	0.020	0.012	0.003	0.001
0.020	0.010	0.007	0.013	0.018

- ¿Cuál es la pérdida de la calidad por unidad?
- Suponiendo que el fabricante especificó que el radio del bisel no debe ser menor de 0.002. ¿Cuál sería en estas condiciones la pérdida de la calidad?
- ¿Cuál debería ser la tolerancia si el fabricante no desea incurrir en una pérdida de calidad más grande que \$0.50 por pieza de trabajo?.

SOLUCION:

$$r \leq 0.020 \text{ in}$$

$$m = 0$$

$$\Delta = 0.020 \text{ in}$$



pérdida (para 100 piezas):

A = costo de la pieza + costo de retirar rebaba + costo de operación robot

$$A = \$1500 + 300 + 10/100 = \$18.1$$

Dado que se dan las 20 medidas del radio del bisel, cada valor es equivalente a la desviación respecto del valor objetivo  $m$  que es igual a cero. Por lo tanto:

$$V^2 = 1/20 [0.015^2 + 0.017^2 + \dots + 0.013^2 + 0.018^2]$$

$$V^2 = 2.298 \times 10^{-4}$$

Entonces la pérdida esta dada por:

$$L(y) = (18.1 / 0.02^2) * 2.298 \times 10^{-4} = \mathbf{\$10.40 / pza}$$

b) Si se cambian las especificaciones

$$m = 0.002$$

$$\Delta = 0.018$$

la variancia ahora esta dada por:

$$V^2 = 1/20 [(0.015 - 0.002)^2 + \dots + (0.0018 - 0.002)^2] = 0.0001778$$

Entonces:

$$L(y) = (18.1 / 0.018^2) * 0.0001778 = \mathbf{\$9.93 / pza.}$$

Obsérvese que aunque la tolerancia es menor y la variabilidad también, se mantiene prácticamente la misma pérdida para una pieza de manera individual. La diferencia solo será significativa en altos volúmenes de producción

c) Este inciso puede tener dos respuestas: para el inciso a y para el inciso b. El método es el mismo.

$$\text{Para el a).} \quad L = (18.1 / \Delta^2) * 2.298 \times 10^{-4} = 0.50$$

$$\Delta^2 = 83.1876 \times 10^{-4}$$

$$\Delta = \mathbf{0.0912 \text{ in}}$$

$$\text{Para el b)} \quad L = (18.1 / \Delta^2) * 1.778 \times 10^{-4} = 0.50$$

$$\Delta^2 = 64.36 \times 10^{-4}$$

$$\Delta = \mathbf{0.0802 \text{ in}}$$

Obsérvese por favor, que aún cuando el proceso en el inciso b) tiene una variabilidad 23 % menor que en el inciso a), la tolerancia solo disminuye en un 12 % lo que reafirma lo presentado en la parte teórica respecto de que las tolerancias no guardan una relación directa con la capacidad del proceso.

### APLICACIÓN 8

Suponga que el costo de reparar una falla en el control de temperatura de un equipo de refrigeración en fabrica es de \$20, \$25 y \$18 por unidad marca Nieto, General Eléctric y Koblenz respectivamente. Compare las pérdidas causadas al cliente por desviaciones del valor objetivo en el control de temperatura de estos equipos de refrigeración. La tolerancia del cliente común para un nivel de temperatura dado, es de 2.5 °C y en cualquier caso, ya sea por enfriar en exceso o no hacerlo, generalmente, gasta en salario del técnico, productos descompuestos, etc. la cantidad de \$200.

Para la marca Nieto la desviación estándar de su proceso es de 1°C, mientras que para la General Eléctric es de 1.2 °C. La marca Koblenz es nueva en el mercado por lo que tuvimos que medir la temperatura de 12 controles respecto de una temperatura nominal de 4 °C, obteniendo:

4.3, 4.6, 3.5, 3.8, 4.0, 5.0, 5.2, 4.8, 3.4, 4.9, 4.0, 4.2

Con base en el criterio de menor pérdida ¿Qué marca me recomienda comprar?. Justifique su respuesta en base a los cálculos.

### SOLUCION

#### DATOS

$A_N = \$20$	$\sigma_N = 1^\circ C$	$A_o = 200$
$A_{GE} = 25$	$\sigma_{GE} = 1.2^\circ C$	$\Delta o = 2.5^\circ C$
$A_K = 18$	$\sigma_K = 0.5946^\circ C$	

a) ¿Qué marca me recomienda comprar?

#### SOLUCION:

Calculamos las pérdidas de los equipos desde la perspectiva del cliente

$$L(y) = (A_o / \Delta o^2) \sigma^2 =$$

$$L(y)_N = (200 / 2.5^2) * 1^2 = \$32$$

$$L(y)_{GE} = (200 / 2.5^2) * 1.2^2 = \$46.08$$

$$L(y)_K = (200 / 2.5^2) * 0.5946^2 = \$11.31$$

Costo de reparar	Perdida transferida L(y)
\$ 20	\$32
25	46.08
18	11.31

Obsérvese que el refrigerador Koblenz tiene la menor pérdida y que estas siempre son mayores a las que sufriría el fabricante si hubiera corregido las desviaciones.

## APLICACIÓN 9

La calidad de un producto se define por dos características: número de dureza Brinell (BHN), y diámetro circular, las especificaciones de estas características son:

Dureza en BHN  $250 \pm 5$   
 Diámetro  $1.0000 \pm 0.002$

Las siguientes medidas de BHN fueron tomadas al azar de 20 piezas del proceso:

248	250	249	252	253
249	247	249	250	251
250	249	248	250	251
249	245	246	249	254

Las siguientes medidas de los diámetros también se tomaron:

1.0010	1.0020	1.0015	1.0009	1.0019
0.9998	0.9999	1.0020	1.0011	0.9997
0.9980	1.0010	1.0009	0.9996	0.9990
1.0000	1.0013	1.0009	1.0009	1.0009

La pérdida causada por un BHN inaceptable es de \$ 20, y la pérdida causada por tamaño de diámetro inaceptable es de \$ 30, ¿Cuál es la pérdida total esperada causada por las desviaciones del valor objetivo.

### SOLUCION

Dureza	Diámetro
$250 \pm 5$	$1 \pm 0.002$
$A_0 = \$ 20$	$A_0 = \$ 30$
$v^2 = 4.6815$	$v^2 = 1.081 \times 10^{-6}$

$$L(y) = kv^2 \quad k = A / \Delta^2$$

$$L(y)_{\text{BHN}} = (20 / 5^2) * 4.6815 =$$

$$L(y)_{\text{BHN}} = \$3.74$$

$$L(y)_D = (30 / 0.002^2) * 1.081 \times 10^{-6} \rightarrow L(y)_D = \$8.11$$

**Pérdida Total = \$ 11.85**

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El ámbito global en que se desarrollan los países –México no es la excepción-, los hace más vulnerables a las nuevas circunstancias que puedan ocurrir en cualquier parte del mundo. Así han surgido grandes movimientos económicos producto de crisis internas de distintos países. El efecto “tequila” de México, el efecto “vodka” de Rusia y el efecto “samba” de Brasil fueron, en la década pasada, crisis que afectaron económicamente al mundo. Hoy, a partir del 11 de septiembre de 2001, una guerra entre Estados Unidos de Norteamérica y el terrorismo internacional, vino a complicar la recesión no declarada en nuestro país y ha afectado en más de una forma a los mexicanos y obviamente a las organizaciones productivas que residen aquí.

En este contexto, aunado a los compromisos firmados por México en el ámbito comercial, el reto que enfrentan las empresas está centrado en su supervivencia. Por citar dos casos recientes, recordemos la empresa DINA en el Estado de Hidalgo que tuvo que cerrar sus puertas y el grupo de ingenios azucareros entre ellos el “Emiliano Zapata” de Zacatepec, Mor; que fueron adquiridos por el Gobierno Federal ante la situación de quiebra en que operaban. Los “paros técnicos” de la industria automotriz es otro caso ampliamente conocido.

Las empresas que aún están trabajando deberán en consecuencia elegir una estrategia para sobrevivir y poder competir en los mercados tanto nacionales como internacionales. Esta estrategia necesariamente deberá estar fundada en la calidad. Así, con todas las limitantes internas que pudieran tener las organizaciones, particularmente las micro y pequeñas empresas, deberán cumplir con la normatividad internacional en materia de calidad si quieren competir y sobrevivir. Deberán atender las expectativas del cliente integrando calidad tanto en los productos como en los procesos, implantando sistemas de mejoramiento continuo que aseguren su cumplimiento y logren mejores niveles de desempeño cada vez.

La estrategia de Genichi Taguchi la cual comprende el diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias, se fundamenta en una filosofía que centralmente establece la inclusión de la calidad en el producto y en los procesos desde su diseño, por ello es conocida también como “control de calidad “fuera de línea”. Esta filosofía no es reciente, ha sido planteada por Jurán en su llamado “mapa de carreteras” y más recientemente se le ha denominado QFD (Quality Function Deployment) o despliegue de la función

calidad que mediante formatos, facilita una respuesta holística a las necesidades del cliente. Se complementa con otras herramientas tales como el AMEF (Análisis de modo y efecto de falla) incluido en la norma QS 9000 y también considerado en el elemento 4.13 que comprende “acciones preventivas y correctivas” de la norma ISO 9002.

La inclusión de esta filosofía como criterio de una norma internacional, valida su efectividad en cuanto al mejoramiento de la calidad de productos y procesos, lo que justifica el estudio y aplicación de esta estrategia.

Fundamentada en la experimentación, comprende la aplicación del proceso científico y aplicado a los productos y a los procesos de producción, nos permite generar un conocimiento profundo de su funcionamiento identificando las causas raíz de sus desviaciones, realizando en consecuencia acciones que permitan mejorar su funcionabilidad y su calidad.

Como se ha presentado en el cuerpo de esta tesis, los arreglos factoriales fraccionados ortogonales en que se basa la estrategia de Taguchi, es una estrategia experimental eficiente puesto que permiten una considerable reducción de corridas experimentales a la vez que facilitan su aplicación, y más aún cuando se limita el número de factores a no más de quince y el número de niveles de cada uno de ellos a solamente dos. Al reducir los costos significativamente incrementa la posibilidad de aplicarla reiteradamente en todos y cada uno de los microprocesos de la organización o de la empresa, logrando una optimización que si bien es cierto no es global, se traduce en un mejoramiento sostenible de la calidad de lo que se oferta.

Es importante subrayar que Taguchi ha seleccionado una serie de arreglos ortogonales para distinto número de factores y de niveles, acompañados de sus gráficas lineales y sus tablas triangulares que permiten, de ser necesario, analizar posibles interacciones entre los factores. Es importante señalar que la aleatorización del orden en que se efectúan las distintas corridas experimentales así como la reproducibilidad de cada una de ellas deberá ser cuidadosamente respetada a efecto de separar los efectos principales ocasionados por la variación de un factor respecto de otros.

Otro elemento incorporado en esta estrategia es la transformación de los datos originales a razones señal/ruido que son medibles, aditivas, e incluyen valores de tendencia central y variación en la misma respuesta, lo que permite seleccionar más fácilmente aquellos factores que tienen menor variabilidad,



los cuales corresponden a los de mayor razón señal/ruido. La herramienta estadística utilizada para discriminar entre los factores significativos y los que no lo son, es el ANOVA ( análisis de variancia ), desarrollada por Sir. Ronald Fisher, cuyas bondades en el análisis estadístico de la variabilidad es universalmente conocido.

Los casos presentados son reales, realizados con la metodología practica propuesta y representa sólo una parte de una serie de aplicaciones exitosas en la micro, pequeña y mediana industria del estado de Morelos, más con un enfoque académico que industrial. Sin embargo, sus resultados han permitido hacer menos sensibles a los productos y procesos con que se ha experimentado respecto de factores de ruido (robustos), lo que se ha traducido en un incremento en la calidad y un ahorro en los costos por desperdicios, o por reclamaciones, además ha permitido detectar la posibilidad de utilizar sustitutos de productos que no tienen efecto significativo en los resultados y que son más económicos.

El diseño de tolerancias se ha presentado de una manera académica toda vez que implica investigaciones de costos de producción tanto para clientes como para proveedores, así como investigación de campo del uso y funcionamiento de diversos productos que comprende una ardua tarea que no puede ser completada en las condiciones y disponibilidades en que se ha realizado este trabajo.

La estrategia de Genichi Taguchi, ha tenido en las empresas del estado de Morelos, una mínima aplicación debido principalmente a su escasa difusión y a la complejidad que sus fundamentos teóricos pudieran comprender al ser considerados en toda su extensión. Este trabajo ha tratado de presentar un esquema simplificado que ha sido aplicado con éxito. Se confía en que pueda llegar a los ingenieros en planta y asimismo pueda contribuir al mejoramiento de la calidad en sus empresas.

Se recomienda que las instituciones de nivel superior mediante sus académicos, no solo desarrollen tecnología en los distintos campos del conocimiento humano, sino que además busquen métodos más simples para aplicarlos y hacerlos más asequibles al técnico común que se desempeña en el campo productivo. Que también sean los centros de compilación de las experiencias desarrolladas en el mundo en determinadas líneas de interés general y fuentes difusoras de casos exitosos que se multipliquen en el país al que debemos servir, México.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Raymond, H. Alan.- *Administración en la tercera ola. Los contornos competitivos.* Compañía editorial continental. México.1986.
2. Kast, Fremont E. ; Rosenzweig, James E. *Administración en las organizaciones: Un enfoque de sistemas y de contingencias.* Mc. Graw Hill Interamericana de México. 1988
- 3.- Solís, M. Leopoldo.- *La realidad económica mexicana: retrovisión y perspectivas.* México. El colegio Nacional. Fondo de Cultura Económica. México. 2000.
- 4.- CIDAC. *El acuerdo de libre comercio México Estados Unidos. Alternativas para el futuro.* México. 1994.
- 5.- Deming; W. Edward. *Calidad, productividad y competitividad. La salida de la crisis.* Ediciones Díaz de Santos, S. A. España.1989.
- 6.- Jablonsky, Joseph R. *TQM: Como implantarlo. Aprenda a Administrar la Calidad Total.* Compañía Continental Editorial S.A de C.V. México. 1996.
- 7.- García, D. Salvador. *Los retos de la competitividad. la micro, pequeña y mediana empresa en México.* México.1993.
- 8.- Villegas, M. Fabián. *Planeación Estratégica Creativa.* México. Editorial P.A.C.México. 1994.
- 9.- Taylor, Wayne A. *Optimization and Variation Reduction in Quality.* U.S.A. Quality Technologies at Baxter Healthcare Corporation. Taylor Enterprises, Inc. U.S.A.1994
- 10.- Montgomery, Douglas C. *Diseño y Análisis de Experimentos.* Grupo Editorial Iberoamérica. México1991
- 11.- ISO. *Quality Sistem Requirements QS 9000* (Requerimientos del sistema de calidad QS 9000)  
Tercera edición marzo de 1998  
Segunda reimpresión . junio de 1998
- 12.- Téllez, S. Rubén. *Ingeniería de calidad.* México. División de estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. México.1988.
- 13.- Estrada, C. Octavio. *Análisis y crítica de la norma ISO serie 9000 versión 2000.* División de ingeniería Mecánica e Industrial. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
- 14.- Ryan, Nancy E. *Los métodos Taguchi y el DFC.* Panorama Editorial.México 1995.

- 15.- Mitra, Amitava. *Fundamentals of quality control and improvement*. Mc Millan U.S.A.1993.
- 16.- Asociación Mexicana de Calidad. *Norma ISO 8402 (NMX CC – I D.G.N. México1995) Sistemas de calidad . Vocabulario 1994*.México 1995.
- 17 CALMECAC (Calidad Mexicana Certificada A. C. Organismo acreditado para la certificación.) *Manual para la interpretación de los requisitos de la norma ISO 9000 /NMX – CC - 1994*, México. 1995.
18. Moen, Ronald D. ; Nolan; Thomas W. y Provost LLoyd P; *Improving quality Through planned experimentation*.Mc Graw Hill, USA. 1991.
- 19.- García, O. Lucía .- *Ingeniería de calidad aplicada a la industria petrolera (optimización del lodo de perforación)*. Tesis de grado. U.N.A.M.1996.
- 20.- Luckie, D. Lilia .- *Optimización con arreglos ortogonales*. Tesis de licenciatura en Física y Matemáticas. I. P. N. México.1990.
- 21.- Taguchi, Genichi..- *Introduction to quality Engineering .- Designing Quality into Products and Processes*.- Asian Productivity Organization. AMERICAN SUPPLIER INSTITUTE INC.
- 22.- Ross, Phillip J..- *Taguchi Techniques for quality Engineering* .- Mc Graw Hill Book Company.
- 23.- Taguchi, Genichi; Elsayed, A. Elsayed; y Hsiang, C. Thomas.- *Quality Engineering in Production Systems*.- Mc Graw Hill, Inc. USA. 1988
- 24.- Mitutoyo, IMP, DGN.- memorias.- *La tecnología más avanzada del mundo a su alcance*. III Congreso de Metrología y Control de Calidad. México. Noviembre 1987.
- 25.- ITESM.- CENTRO DE CALIDAD División de Graduados e investigación.- *Método Taguchi.- Experiencias, casos y resultados de su implantación en México*. México 1988.
26. D.G.I.T. Instituto tecnológico de Zacatepec. Departamento de Ingeniería Industrial.- *Reportes de aplicación de la metodología Taguchi*. Asignatura Ingeniería de Calidad. Titular: José Luis Bautista Herrera. México 2000.
- 27.- Moore, Harry D. y Kibbey, Donald R. - *Materiales y procesos de fabricación* Edit. LIMUSA. México 1988.

- 29.- Doyle, Lawrence E.; Keyser, Carl A.; Leach, James L.; Schrader, George F. y Singer, Mase B. *Materiales y procesos de manufactura para ingenieros* Edit. Prentice hall Hispano Americana S.A.México. 1994.
- 30.- Hobson, W.T.- *El repintado de automóviles.- Principios y técnicas*. Editorial Prentice Hall. México 1996.
- 31.- Estrada, C. Octavio; *Análisis y crítica de la norma ISO serie 9000 versión 2000* División de Ingeniería mecánica e industrial. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- 32.- Aquino, C. Zoloxóchitl . *ISO 9000 una nueva visión*. Revista *Manufactura* . Año 7, número 71. Editorial Expansión. México. Mayo 2001.
- 33.- Hernández, S. R.; Fernández, C. C.; Baptista, L. P.; *Metodología de la Investigación*. Edit. Mac Graw Hill. México. 1999.
34. Ford; General Motors; Chrysler; *Advanced product Quality Planning and control plan (APQP)*. Manual. USA. 1995.

## ANEXO 1

# ARREGLOS ORTOGONALES EN DOS NIVELES\*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Citado por Phillip J. Ross en "*Taguchi Techniques for Quality Engineering*" Mc Graw Hill Book Company U.S.A., 1988, pp.213 – 217.

## ARREGLOS ORTOGONALES EN DOS NIVELES

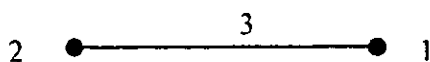
### Arreglo $L_4$

Tratamiento $N_0$	Columna número		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

### Tabla triangular $L_4$ (Interacciones)

Columna número	Columna número	
	2	3
1	3	2
2	-	1

### Gráfica lineal $L_4$



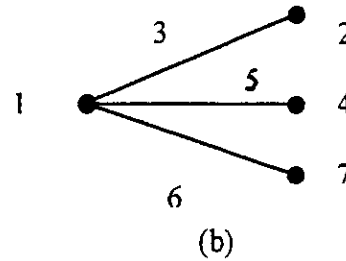
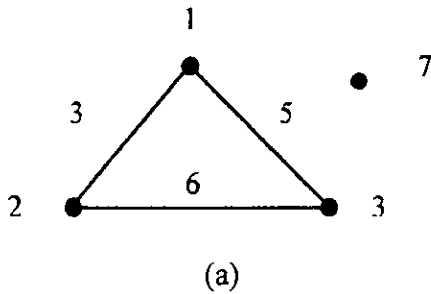
### Arreglo $L_8$

Tratamiento $N_0$	Columna número						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

**Tabla triangular L<sub>8</sub>**  
(interacciones)

Columna No	Columna número					
	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2	-	1	6	7	4	5
3	-	-	7	6	5	4
4		-	-	1	2	3
5		-	-	-	3	2
6		-	-	-	-	1

**Gráficas lineales L<sub>8</sub>**



**Arreglo L<sub>12</sub>**

Tratamiento No	Columna No										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

**Precaución:**  
Una interacción de dos columnas se confunde con las columnas restantes, por ello se recomienda asignar solamente efectos principales a este arreglo.

**Arreglo L<sub>16</sub>**

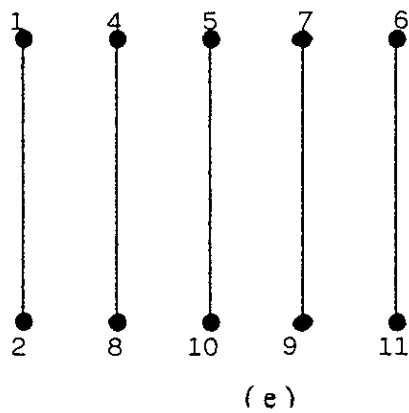
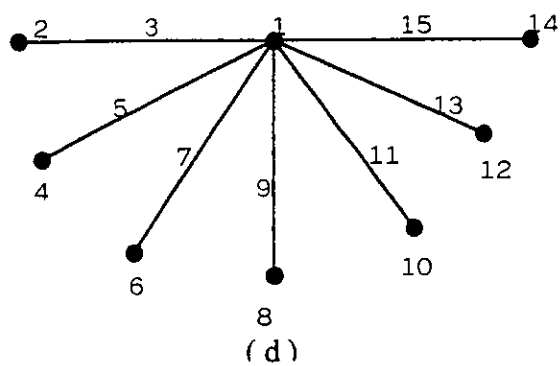
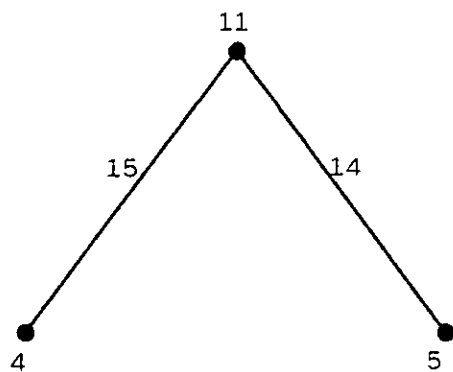
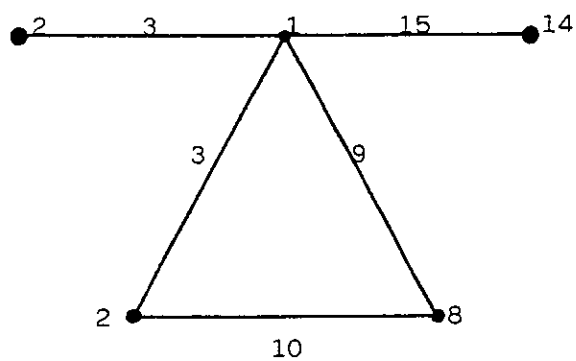
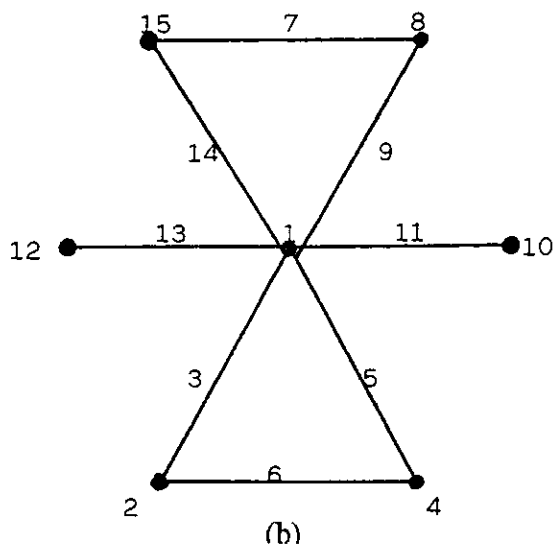
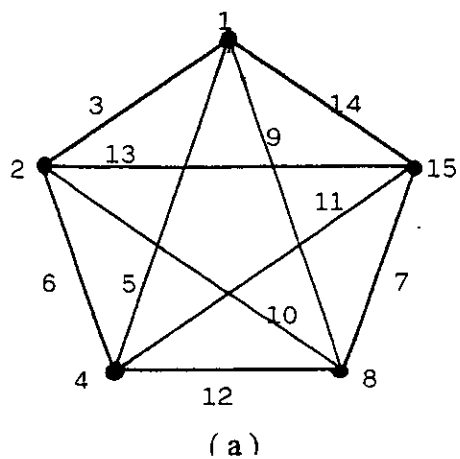
Tratamiento No	Columna No														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

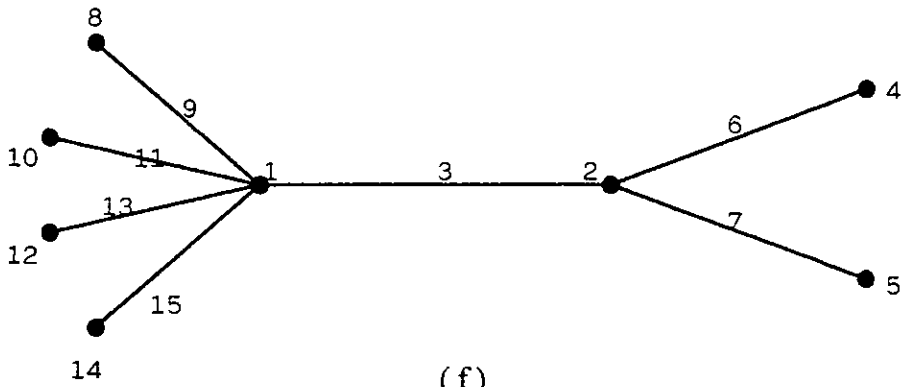
**Tabla triangular L<sub>16</sub> (Interacciones)**

Columna No	Columna número													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
2	-	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
3	-	-	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
4	-	-	-	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
5	-	-	-	-	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
6	-	-	-	-	-	1	14	15	12	13	10	11	8	9
7	-	-	-	-	-	-	15	14	13	12	11	10	9	8
8	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7
9	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2	5	4	7	6
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	6	7	4	5
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	6	5	4
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	2
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1



# Gráficas lineales $L_{16}$





(f)

## ANEXO 2

# PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL BASADO SOBRE LOS MÉTODOS TAGUCHI

Por: Gil Schumacher y William Eureka

## INTRODUCCIÓN

El propósito de este programa es simplificar el análisis cuando se utilizan métodos Taguchi y se dispone de una mínima infraestructura en equipo de cómputo.

Los autores permiten la reproducción de este programa libremente, con la exclusiva petición de darse de alta como usuario del mismo.

Los requerimientos de equipo son los siguientes:

- IBM PC o equivalente con 128 k de memoria (o más).
- Al menos 1 disco *floppy*.
- Interfase gráfica (en color preferentemente, aunque se acepta monocromática)
- Impresora EPSON o equivalente
- GRAPHICS.COM instalado (si se desean imprimir las gráficas)

El máximo número de parámetros que pueden ser analizados son:

✓ Factores	31
✓ Filas	32
✓ Niveles	9
✓ Archivos de datos	100
✓ Columnas en el arreglo	31
✓ Observaciones por fila	30
✓ Categorías	9

## INSTALACIÓN SOBRE EL DISCO DURO

Asegúrese que el archivo `graphics.com` está en su directorio raíz o sistema operativo. Entonces coloque el disco que contiene el programa de análisis en el drive "A". Después que usted haya hecho lo anterior, teclee "A: INSTALL" y presione ENTER. El programa de instalación cargará todos los archivos sobre el disco dentro de un directorio llamado "ANOVA". Para usar el programa usted debe ahora teclear "cd/ANOVA para cambiar directorios y entonces teclee "ANÁLISIS". El programa ejecutable es "ANOVA.EXE". Esto Debe arrancar el programa y desplegar el menú principal sobre la pantalla.

A partir de este paso, las instrucciones se encuentran abiertas en la pantalla.

Se tratará de hacer más objetiva la aplicación de este programa mediante un ejemplo tomado de los casos que se han presentado en esta tesis. Algunos valores dentro del proceso pueden diferir toda vez que los cálculos seguidos en este programa, particularmente para la tabla ANOVA, no son del todo coincidentes con las fórmulas sugeridas en el marco teórico de esta tesis. Esto se debe a que una vez transformados los datos a valores señal / ruido el programa utiliza opciones de análisis remanente.

Puede observarse que mientras la suma de cuadrados en la tesis se obtuvo mediante la expresión (ejemplificado para el factor A):

$$\frac{(A_1 - A_2)^2}{n}$$

En este programa se obtiene mediante la expresión  $2(A_1 - A_2)^2$

Los resultados óptimos no difieren independientemente de la expresión usada.

## SELECCIÓN DEL *DRIVE* DE TRABAJO

El primer cuadro que el usuario ve, está relacionado con el *drive* donde estarán los archivos que se han de analizar. Si se da "enter" por *default* el programa seleccionará el "drive" con el que inició el trabajo.

## MENU PRINCIPAL

El menú principal lista los comandos usados en este programa, los cuales son:

ANÁLISIS EXPERIMENTAL BASADO SOBRE LOS METODOS TAGUCHI	
Escrito por: Gil Schumacher (DDA) y Bill Eureka (CPC)	
. n / a F <sub>1</sub> Introducción de datos del teclado	F <sub>6</sub> Desplegar datos editados
. n / a F <sub>2</sub> Leer datos de archivo	F <sub>7</sub> Salvar datos en archivo
F <sub>3</sub> Desplegar tabla promedio	F <sub>8</sub> Despliegue gráficas promedio
F <sub>4</sub> Desplegar Tabla ANOVA	F <sub>9</sub> Salir / reiniciar / información
F <sub>5</sub> Ejecutar análisis S/N	
INSTRUCCIONES: Para seleccionar la función deseada, presione la tecla con la función indicada. Obsérvese que las selecciones marcadas con "n/a" no están disponibles hasta después que otras elecciones han sido hechas.	
DISTRIBUCIÓN: Gratuita para ingenieros CPC. (Se prohíbe su venta). Registrarse con Darlene Gore (492-6513) para copias posteriores.	

Cuando se inicia el programa, solo los comandos F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> y F<sub>10</sub> no tienen "n/a" ante ellos. La razón porque los otros comandos están bloqueados es porque cualquier cálculo que deba hacerse requiere datos que el usuario debe cargar previamente dentro del sistema. Esto garantiza que el usuario use el programa correctamente o salga del mismo. Para ejecutar un comando presione la tecla de la función asociada al mismo.

Por ejemplo F<sub>1</sub> cuando quiera introducir datos del teclado. Se pedirá el título correspondiente al trabajo el cual deberá introducirse sin rebasar 72 caracteres, presionando ENTER. A continuación se pedirá definir si los datos son continuos o categóricos. Dependiendo del tipo de datos se elegirá la tecla de la función correspondiente:

F<sub>1</sub> – Regresar al menú      F<sub>2</sub> – Continuos      F<sub>3</sub> - Categóricos

Debe entenderse que los datos son continuos cuando son numéricos y categóricos si pueden ser clasificados pero no cuantificados (ejemplo: COLOR: azul, rojo, amarillo; MATERIAL: Plástico, acero, madera; CLASIFICACIÓN: Bueno, malo, pobre.)

El análisis que pretendemos ejemplificar se refiere a datos continuos, por lo cual se presiona F<sub>2</sub>.

Ahora se pregunta en la pantalla el número de categorías (2 – 10) deseadas \_\_\_\_? Para ello se teclaea el número deseado y se presiona ENTER.

Se debe elegir a continuación el arreglo deseado, el cual corresponde a uno de los siguientes números:

1- L <sub>4</sub>	6- L <sub>24</sub>	11- L <sub>27</sub>
2- L <sub>8</sub>	7- L <sub>28</sub>	12- L <sub>16A</sub>
3- L <sub>12</sub>	8- L <sub>32</sub>	13- L <sub>32A</sub>
4- L <sub>16</sub>	9- L <sub>9</sub>	14- L <sub>25</sub>
5- L <sub>20</sub>	10- L <sub>18</sub>	

Al elegir el arreglo deseado, se introduce el número que le corresponde y se teclaea ENTER.

Ahora el sistema desplegará los siguientes comandos:

F<sub>1</sub> - Proceder      F<sub>2</sub> - Modificar columnas del arreglo      F<sub>3</sub> – Eliminar columnas

Si no desea hacer algún ajuste en la columna, teclear F<sub>1</sub>.

Si desea modificar el arreglo en una columna, teclee F<sub>2</sub> y entonces el programa preguntará:

Introduzca el número de columna que desea cambiar ? \_\_\_\_ presione RETURN. El programa preguntará los nuevos valores para las filas dentro de esa columna en particular. Por ejemplo:

Introduzca nivel para columna 1 fila 1 (fué 1) ?

Después de corregir volverán a aparecer los comandos:

F<sub>1</sub> - Proceder      F<sub>2</sub> - Modificar columnas del arreglo      F<sub>3</sub> – Eliminar columnas

Esto se podrá hacer las veces que sea necesario.

## ELIMINAR COLUMNAS

El programa preguntará al usuario :

Número de columnas que desea borrar? x y z (donde x, y, z son números de columnas).

Se tecléa el número de columna a eliminar, separadas por espacio si son varias.

## INTRODUCIR EL NOMBRE DE LOS FACTORES

La siguiente pantalla preguntará el nombre de los factores:

Para cada columna introduzca el nombre del factor en 8 letras o menos. Si no se usa la columna presione enter.

Columna 1:?  
Columna 2 : ?  
Etc.

## INTRODUCCIÓN DE DATOS

En este punto el programa pregunta el número de respuestas por fila, número que se tecléa simplemente y se presiona ENTER.

Número de respuestas por fila (tratamiento o corrida) ? \_\_\_\_

El programa pedirá entonces que se introduzcan los datos para cada fila, los cuales se tecléarán separándose por un espacio entre sí. El programa una vez completados los datos para una fila, pedirá los de la fila siguiente y así sucesivamente hasta que todas las respuestas queden introducidas. Con F<sub>1</sub> regresamos al menú principal. Para variables continuas, los comandos F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub> estarán bloqueados.

## LEER DATOS DE ARCHIVO

Pueden usarse datos de archivos previamente creados. Presionando F<sub>2</sub> el programa abre una ventana con los nombres de los archivos disponibles y un número indicativo que puede servir para la selección.

El programa preguntará: Número de archivo de datos deseado? \_\_\_\_.

Se tecléa el número y se presiona ENTER, lo cual cargará el archivo seleccionado dentro del programa para ser analizado. Se podría haber regresado al menú principal sin selección de archivo simplemente presionando F<sub>1</sub> en vez de introducir un número de archivo.

A continuación y a manera de ejemplificación, se introducen los datos del caso 2 contenido en la página 123 de esta tesis.

Una vez abierto el programa, seleccionamos el *drive* apropiado y presionamos F<sub>1</sub> para introducir los datos desde el teclado. En este momento el programa solicita el título del experimento, por lo cual tecleamos:

*OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ADOQUIN*

Ahora seleccionamos F<sub>2</sub> para indicar que los datos son : *CONTINUOS*

Ahora Preguntará el número de categorías, lo que se introduce numéricamente, para el ejemplo en curso tecleamos : 2 presionar ENTER.

Ahora debe seleccionarse el arreglo ortogonal apropiado, lo que es función del número de factores e interacciones de interés. Para este ejemplo un L<sub>8</sub> es el apropiado y por ello tecleamos el número asociado a dicho arreglo que es el 2. ENTER

Tecleamos F<sub>1</sub> para proceder.

Ahora preguntará en nombre de los factores para cada columna dado en no más de 8 caracteres. Por simplicidad se denominarán con las letras A, B, C, etc; pero se tendrá presente que representa cada uno de ellos y sus niveles. Para ello se incluye la siguiente tabla.

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2
A. Marca del cemento	Tolteca	Moctezuma
B. Tipo de gravilla	Triturada	No triturado
C. Tiempo de vibración	60 Segundos	10 segundos
D. Tiempo de mezclado	10 minutos	15 minutos
E. Tipo de secado	En sombra	Expuesta al sol
F. Frecuencia de rociado	3.5 Horas	2.0 Horas
G. Cantidad de colorante	1.5 kg	2.0 kg

INTRODUCCIÓN DE DATOS. Estos valores serán tomados de los resultados experimentales que se concentran en la siguiente tabla:

TRATAMIENTOS	A	B	C	D	E	F	G	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4
1	1	1	1	1	1	1	1	81.9947	80.1590	78.8162	80.7610
2	1	1	1	2	2	2	2	73.1615	80.2000	79.7640	75.3610
3	1	2	2	1	1	2	2	80.7766	79.6615	80.0060	76.3010
4	1	2	2	2	2	1	1	86.6650	86.4020	82.7150	88.3675
5	2	1	2	1	2	1	2	70.6695	71.4422	72.6610	71.5510
6	2	1	2	2	1	2	1	98.6620	96.3040	95.2036	89.5500
7	2	2	1	1	2	2	1	75.3452	79.3615	80.0001	78.3006
8	2	2	1	2	1	1	2	98.8005	93.6120	80.0010	84.5560



Antes de introducir los datos debe definirse el número de observaciones por tratamiento, que en este ejemplo es de 4. ENTER

El programa ahora preguntará ¿cuáles son los datos para la fila 1?

81.9947 80.1590 78.8162 80.7610

Estos datos deben de introducirse dejando un espacio entre cada uno de ellos o mediante una coma.

¿Cuáles son los datos para la fila 2?

73.1615 80.2000 79.7640 75.3610

Así sucesivamente hasta que el programa mismo indique que todos los valores han sido introducidos.

El programa regresará ahora al menú principal.

Si se desea verificar que los datos son los correctos, presionamos F<sub>6</sub> que mostrará los valores y permitirá, en su caso, cambiar lo que sea necesario.

Si seleccionamos F<sub>3</sub> se desplegará la tabla de promedios, con la observación que esta tabla se estructura en base a los valores originales.

### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN

MEDIAS

GRAN PROMEDIO = 82.09789

COLUMNA	FACTORES	NIVEL 1	NIVEL 2
1	Cemento	80.9945	83.5013
2	Gravilla	81.0163	83.1795
3	Vibración	81.2621	82.9336
4	Mezclado	77.3629	86.8328
5	Secado	85.9478	78.2479
6	Rociado	81.8333	82.3724
7	Colorante	84.9130	79.2828

Si presionamos F<sub>4</sub> se despliega la tabla ANOVA. Sin embargo esta tabla estará basada en los datos originales. Es conveniente traducirlos a valores señal / ruido (solo datos continuos) mediante la selección de F<sub>5</sub> previo haber guardado los datos originales pues de no hacerlo, se perderá la información original siendo substituidos por los correspondientes en señal / ruido. Para salvar los datos originales lo hacemos con la tecla F<sub>7</sub>.

Al presionar F<sub>5</sub> se preguntará el tipo de característica con la que se está tratando. En este caso es "mayor mejor" por lo que se debe presionar la tecla F<sub>2</sub>; lo que completa la transformación.

La expresión matemática que se estableció para el efecto es la siguiente:

$$S/N = -10 \text{ Log } [ 1/n \sum 1/y_i^2 ]$$

Con F<sub>1</sub> se regresa al menú principal.

Con F<sub>6</sub> ahora podemos conocer los datos editados mediante la transformación, obteniendo:

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN  
DATOS EDITADOS

COLUMNA	VALORES S/N
1	38.1065
2	37.7245
3	37.9672
4	38.68658
5	37.09514
6	39.5318
7	38.92273

Se puede ahora desplegar la tabla ANOVA presionando F<sub>4</sub> con valores señal/ruido.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN  
Análisis de razón señal/ruido.

COLUMNA	FACTOR	gl	SUMA DE CUADRADOS	VARIANCIA	F	CONTRIBUCIÓN %
1	CEMENTO	1	0.1077			2.60
2	GRAVILLA	1	0.1205			2.91
3	VIBRACIO	1	0.0550			1.33
4	MEZCLADO	1	1.8368			44.32
5	SECADO	1	1.2471			30.09
6	ROCIADO	1	0.0095			0.23
7	COLORANTE	1	0.7680			18.53
TOTAL		7	4.1447			100.00

Para determinar la significancia de los factores es conveniente integrar (*pool*) aquellos con mínimo efecto seleccionado a criterio del analista en la columna de suma de cuadrados.

El programa preguntará ¿que número de columnas deben ser integradas? Se teclean los números, en este caso 3, 6. Presionando ENTER una nueva tabla ANOVA será desplegada.

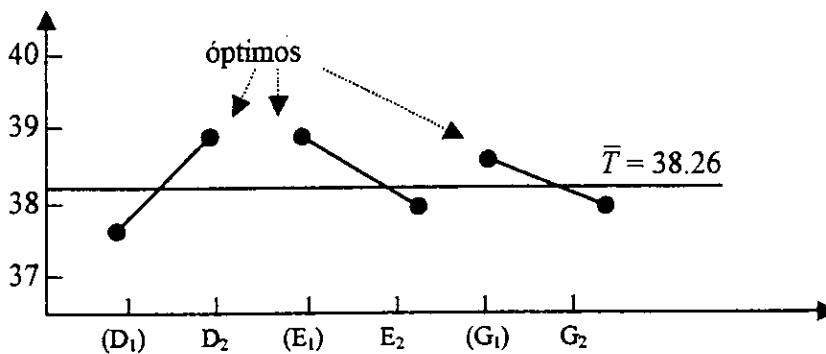
## OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN

COLUMNA	FACTOR	gl	SUMA DE CUADRADOS	VARIANCIA	F	CONTRIBUCION %
1	CEMENTO	1	0.1077	0.1077	3.3378	1.82
2	GRAVILLA	1	0.1205	0.1205	3.7341	2.13
3	VIBRACIO	[1]	-	-	-	-
4	MEZCLADO	1	1.8368	1.8368	56.9013	43.54
5	SECADO	1	1.2471	1.2471	38.6326	29.31
6	ROCIADO	[1]	-	-	-	-
7	COLORANTE	1	0.7680	0.7680	23.7921	17.75
Todos los otros		2	0.0646	0.0323		5.45
<b>TOTAL</b>		<b>7</b>	<b>4.1447</b>			<b>100.00</b>

Con la tecla  $F_8$  se pueden desplegar las gráficas promedio, utilizadas como medio auxiliar para determinar los niveles óptimos de los valores. Se presentan las gráficas de todos los factores que no han sido integrados (*pooled*). Aquí presentamos solamente las de los factores significativos.

### OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN

#### GRAFICA DE PROMEDIOS (PARA FACTORES SIGNIFICATIVOS)



( ) nivel actual

Con la tecla  $F_9$  podemos obtener el óptimo recomendado, o sea, el resultado teóricamente óptimo resultante de la selección de los mejores niveles para los distintos factores.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTOR DE ADOQUIN  
 Análisis de razón señal ruido (niveles óptimos -- mayor mejor)

COLUMNA	FACTOR	MEJOR NIVEL	CONTRIBUCIÓN
1	CEMENTO	2	0.1160
2	GRAVILLA	2	0.1228
4	MEZCLADO	2	0.4792
5	SECADO	1	0.3948
7	COLORANTE	1	0.3098
TOTAL			39.6599
GRAN PROMEDIO			38.2372
MEJORA			1.4226

De esta tabla se deduce que los niveles para el tratamiento óptimo para los factores significantes (D Mezclado; E Secado y G colorante) son coincidentes con aquellos obtenidos en el cuerpo de esta tesis.

Finalmente, con la tecla F<sub>10</sub> se puede :

- F<sub>1</sub> : Regresar al menú principal
- F<sub>2</sub> : Salir del programa completamente (se recomienda salvar la información)
- F<sub>3</sub> : Reiniciar el programa con nuevos valores.
- F<sub>4</sub> : Presentar información sobre el programa.

#### TERMINANDO LA SESIÓN

Esto puede hacerse con la opción QUIT / RESTART, pero se recomienda antes de hacerlo salvar la información a efecto de no tener que volver a capturar.