

01173

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



DISEÑO PARA SEIS SIGMA DE  
SOPORTE CONTROLES DIGITAL DE  
LAVADORAS AUTOMÁTICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
( M E C Á N I C A )  
P R E S E N T A :

ROBERTO PÉREZ MAZA

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

MÉXICO D.F.

MAYO, 2005

m. 344627

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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.

---

*Con mucho cariño y amor a mis hijos  
Daniela y Erick, a mi esposa Elena y a mis  
padres Rosa Arminda y Roberto.*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la  
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el  
contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Roberto Pérez Maza  
FECHA: 26-05-2005  
FIRMA: 

---

---

## RESUMEN

La combinación de herramientas estadísticas y de ingeniería ha dado excelentes resultados en el desarrollo de productos de línea blanca en el Centro de Tecnología y Proyectos de Mabe.

El objetivo de este trabajo es presentar y describir la metodología del Diseño para Seis Sigma, la cual utiliza métodos y herramientas estadísticas para predecir y mejorar la calidad de un producto antes de construir prototipos, para posteriormente verificar esta calidad en corridas piloto y unidades de preproducción y producción. La aplicación de dicha metodología que aquí se presenta es el diseño de un soporte de control electrónico de lavadoras automáticas (copete) que sirve como interfase con el usuario, presentando además los resultados de su evaluación en pruebas de confiabilidad.

El desarrollo de un producto mediante la metodología del DFSS permite incursionar en el diseño probabilístico, el cual considera que todos los componentes que intervienen en el ensamble del mismo tienen una variabilidad inherente a los procesos de fabricación. Esta herramienta nos permite predecir el nivel de calidad con el que se producirán las partes de un ensamble mediante un indicador llamado  $Z$ . Una empresa Seis Sigma es aquella que tiene una  $Z = 6$ , lo que significa que produce 3.4 partes defectuosas por cada millón de oportunidades.

En el diseño del copete digital se utilizan herramientas de ingeniería asistida por computadora como CAD (*Computer Aided Design*) y CAE (*Computer Aided Engineering*), tomando en consideración aspectos del Diseño Para Manufactura y Ensamble (DFM & DFA) como reducción de números de parte, desarrollo de diseños modulares, componentes multifuncionales, etc.

El proceso de diseño en el desarrollo de un producto es el que más influye en el costo final del mismo, pudiendo alcanzar un impacto hasta del 70%. Por tanto las consideraciones y decisiones tomadas en esa etapa deberán estar bien fundamentadas con las herramientas de ingeniería previamente mencionadas.

El resultado palpable de este trabajo fue alcanzar ahorros anualizados cercanos a los 45,000 dólares por reducción de partes, sin considerar los ahorros por inversión en herramientas, tiempos de ensambles, manejos de inventarios, etc. También originó un rediseño de los soportes de los controles de los productos que ya se encontraban en producción para hacer extensivo los beneficios que trae consigo el concepto de diseño que se obtuvo en este proyecto, con lo que se esperan tener ahorros por arriba de 50,000 dólares anuales.

Además, el concepto de diseño del copete digital desarrollado se tomó como ejemplo y guía para un nuevo proyecto en Brasil, donde ya se han visto buenos resultados en el ensamble de ese componente en lavadoras automáticas de ese proyecto.

---

---

---

## ACRÓNIMOS Y DEFINICIONES

### Acrónimos:

DFSS: *Design For Six Sigma*

IDOV: Identificación, Diseño, Optimización y Verificación

DMADV: Definición, Medición, Análisis, Diseño y Verificación

MAIC: Medición, Análisis, Mejora (*Improvement*) y Control

DMAIC: Definición, Medición, Análisis, Mejora y Control

AMEF: Análisis de Modo y Efecto de Falla

QFD: *Quality Function Deployment*

DBF: Diagrama de Bloques Funcionales

CTQ: *Critical To Quality*

CAD: *Computer Aided Design*

CAE: *Computer Aided Engineering*

GEA: *General Electric Appliances*

DPU: Defectos por Unidad

PPM: Partes por Millón de defectuosos

FEA: *Finite Element Analysis*

NPI: *New Product Introduction*

DFR: *Design For Reliability*

ANOVA: Analysis of Variance

DFM: *Desing For Manufacturing*

DFA: *Desing For Assembly*

RSS: *Root Square Sum*

### Definiciones:

**Copete:** soporte de los controles que manipula el usuario mediante botones en el caso digital y mediante perillas en el caso analógico.

**Overlay:** vista de apariencia de los controles de la lavadora también llamado *Mylard* que incluye el arte gráfico para la interfase con el usuario

**Y's:** Variables de respuesta o de salida como GAPS o interferencias

**X's:** Variables de entrada como dimensiones nominales de componentes que forman un diagrama de vector (*vector loop*)

**Z:** Indicador de calidad de variable de respuesta con el cual se puede estimar la probabilidad de partes defectuosas. La forma de hacer el cálculo manual de este indicador se explica en el apéndice A.3

**DPMO:** Defectos por millón de oportunidades

**PPM:** Parte por millón, equivalente a DPMO

**CTQ:** Cualquier cosa que impacta la satisfacción del cliente es un Crítico para la Calidad

**Estudio del Gage R&R:** es un método usado para analizar un sistema de medición para determinar la cantidad y el tipo de variación (error) cuando se mide algo.

---

---

---

---

# CONTENIDO

Resumen

Acrónimos y definiciones

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1 El Enfoque Seis Sigma	6
2.2 Metodologías del DFSS	7
2.2.1 DMADV	8
2.2.2 IDOV	8
2.3 Conceptualización del DFSS	11
2.4 Proceso de desarrollo de productos	11
2.5 La gran oportunidad del Diseño	15
3. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	17
4. IDENTIFICACIÓN	21
4.1 Identificación del cliente	22
4.2 Requerimientos del cliente	22
4.3 Requerimientos técnicos	23
4.4 QFD y AMEF como herramientas Seis Sigma	24
4.4.1 QFD	24
4.4.2 AMEF	27
4.5 Alcance del proyecto	31
4.6 Diseño conceptual del copete digital	32
4.6.1 Montaje del copete en la cubierta	32
4.6.2 Montaje de la tarjeta en el copete	33
4.6.3 Botonera integrada en copete	34
4.6.4 Selección del material	35
4.7 Variables de salida Y's	36
4.7.1 Gaps críticos en la dirección "z"	37
4.7.2 Gaps críticos en la dirección "x-y"	38
4.8 Variables vitales de entrada X's	40
4.9 El Gage R&R	41
4.9.1 Plan de estudio del Gage R&R	42
4.9.2 Análisis de datos	43

---

---

---

5. DISEÑO	48
5.1 Objetivo	49
5.2 Diagrama de Bloques Funcionales (DBF)	49
5.3 Funciones de Transferencia	51
5.4 Lineamientos de diseño para manufactura y ensamble	55
5.5 Diseño para ensamble con <i>snap fit</i>	57
5.6 Análisis del porcentaje de deformación en <i>snap</i> s y botones	60
5.6.1. Análisis de Snaps	60
5.6.2. Análisis de botones	61
6. OPTIMIZACIÓN	64
6.1. Objetivos y generalidades	65
6.2. Análisis de sensibilidad para diseño estadístico	66
6.2.1. Análisis de tolerancias para “Gap G1 entre soportes tarjeta del copete y tarjeta control en la dirección z”	68
6.2.2. Análisis de tolerancias para “Gap G2 entre botón copete y microswitch de la tarjeta en la dirección z”	69
6.2.3. Análisis de tolerancias para “Gap G3 entre domo botón copete y domo burbuja overlay en la dirección z”	70
6.2.4. Análisis de tolerancias para “Gaps en la dirección x-y del ensamble tarjeta control al copete digital”	70
6.3. Diseño detallado de snaps	75
6.4. Diseño detallado de botones	78
6.5. Análisis de llenado y predicciones en la calidad percibida del copete digital	82
6.6. Conclusión	83
7. VERIFICACIÓN	84
7.1. Objetivos y generalidades	85
7.2. Verificaciones en copete digital	85
7.2.1. Verificación de las X’s en dirección “z”	85
7.2.2. Verificación de la X’s en dirección “y”	87
7.2.3. Verificación de la X’s en dirección “x”	87
7.2.4. Verificación del valor de desviación estándar en las X’s del copete digital	89
7.3. Verificaciones en tarjeta de control	90
7.4. Verificación de CTQ en overlay	96
7.5. Verificación de ahorro por reducción de números de parte	96
7.6. Verificación de ensamble con primeras muestras del herramental final	98
7.7. Validación de la confiabilidad de botones en pruebas de vida	100
8. CONCLUSIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

---

---

APÉNDICE A	108
A.1.Cálculos básicos de Sigma	109
A.2.La distribución normal y la normal estándar	109
A.2.1.    Propiedades de la distribución normal	109
A.2.2.    Distribución normal acumulativa	110
A.2.3.    La distribución normal estándar	110
A.3.Cálculo de Z y probabilidad de defecto	111
A.4.“Z Bench” en DFSS	113
A.5.Corto plazo contra largo plazo	113
A.6.DPU / DPO	115
APÉNDICE B	117
B.1. Pruebas de hipótesis	118
B1.1. Hipótesis Estadísticas	118
B1.2. Errores tipo I y tipo II	119
B1.3. Los P-valores (p-value)	119

---

---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

---

El uso de partes plásticas en los productos de línea blanca ha tomado auge en los últimos años en todo el mundo. Así podemos ver un refrigerador o una lavadora con aproximadamente 80% de sus componentes en plástico y el resto en materiales metálicos y unos cuantos cerámicos.

El diseño de partes plásticas tiene ventajas considerables respecto al diseño de componentes metálicos, una de ellas es la gran complejidad que pueden llegar a tener dichas piezas, lo que puede propiciar una reducción en números de componentes que intervienen en el ensamble de un producto.

Por otro lado, el desarrollo de diseño probabilístico es cada vez más demandado ya que los procesos de manufactura involucran variabilidades no contempladas en los diseños determinísticos. El Diseño para Seis Sigma (DFSS por sus siglas en inglés) es una metodología empleada por empresas muy exitosas como Motorola, General Electric, etc. Esta herramienta nos proporciona los medios para desarrollar diseños que contemplen la variabilidad de los procesos de fabricación de tal forma que permite predecir el nivel de calidad con el que se producirán las partes de un ensamble mediante un indicador llamado **Z**. Una empresa Seis Sigma es aquella que tiene una  $Z = 6$ , lo que significa que produce 3.4 partes defectuosas por cada millón de oportunidades (ver apéndice A).

El objetivo de este trabajo es presentar y describir la metodología del DFSS, la cual utiliza métodos y herramientas estadísticas para predecir y mejorar la calidad de un producto antes de construir prototipos, para posteriormente verificar esta calidad en corridas piloto y unidades de preproducción y producción. Se presenta también una aplicación de dicha metodología que es el diseño de un soporte de control electrónico de lavadoras automáticas, conocido como copete, que sirve como interfase con el usuario. Además, se muestran los resultados de la evaluación de este componente en pruebas de vida, con lo que se pueden hacer estimaciones sobre la confiabilidad del mismo.

Se usan herramientas estadísticas como el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallas), QFD (*Quality Function Deployment*), DBF (Diagrama de Bloques Funcionales), análisis de tolerancias, capacidad de procesos, etc.

Además se consideran aspectos de Diseño para Manufactura (DFM – *Design For Manufacturing*) y Diseño para Ensamble (DFA – *Design For Assembly*) en el desarrollo de este componente, al igual que en todo el producto, de tal forma que se logre reducir el número de partes del ensamble en comparación con un producto actual similar y con ello generar ahorros significativos a la compañía.

El Diseño para Seis Sigma puede alcanzarse mediante la aplicación de cualquiera de muchas metodologías. IDOV (*Identification-Design-Optimization-Verification*) es una de las metodologías de uso común para el diseño de productos y servicios que necesiten cumplir con los estándares de Seis Sigma.

---

---

IDOV es un proceso de cuatro fases: Identificación, Diseño, Optimización y Verificación. Estas cuatro fases son paralelas a las cuatro fases de la metodología tradicional MAIC (*Measurement-Analysis-Improvement-Control*) para mejora que incluye: Medición, Análisis, Mejora y Control.

Como este es un proyecto desarrollado bajo la metodología IDOV del DFSS, se presenta un capítulo para cada fase del mismo. Así, posterior a los capítulos 1, 2 y 3 de Introducción, Antecedentes y Presentación del Problema, respectivamente, se aborda la fase de **IDENTIFICACIÓN** en el capítulo 4, donde se presentan los CTQ's (*Critical To Quality*) del cliente como requerimientos tomados del flujo descendente (*CTQ FLOW DOWN*) y se traducen a requerimientos técnicos como gaps críticos que influyen directamente en la *funcionalidad* y *ensamblabilidad* de la tarjeta de control contra el copete digital, las cuales vienen a ser las grandes Y's de este proyecto. Además, en esta etapa, se analiza la capacidad del sistema de medición que será empleada en la etapa de verificación de las X's vitales.

Luego, la etapa de **DISEÑO** se desarrolla en el capítulo 5, donde los objetivos principales son enfatizar en los CTQ's, identificar los requerimientos funcionales, desarrollar conceptos alternativos de diseño, seleccionar el concepto que mejor se ajuste a los requerimientos y predecir la calidad que tendrán las partes.

Para cumplir con los requerimientos técnicos, se estudia la relación entre las X's y la Y's identificadas en la etapa previa, y se definen así las funciones de transferencia. Para esto, se hace uso de los diagramas de vectores (*vector loops*) los cuales ayudan a visualizar gráficamente la relación que existe entre las X's y las Y's.

En el capítulo 6, se aborda la fase de **OPTIMIZACIÓN**, donde se realizan análisis de sensibilidad con el apoyo de una hoja de cálculo de Berryman [1] con el fin de estudiar el impacto que tendrán las variaciones de las partes que intervienen en el ensamble sobre las variaciones de las respuestas (gaps críticos) en niveles de Z y PPM's (Partes Por Millón). Para ello se requiere información a cerca de las capacidades de proceso y aproximaciones estadísticas para definir las tolerancias.

En la fase de Optimización tiene lugar el desarrollo del Diseño detallado del producto o componente, así como las predicciones de su desempeño. En nuestro caso particular, se hacen predicciones del flujo de material dentro del molde de inyección del copete con el apoyo de un software de simulación, analizando confianza de llenado, marcas de unión, rechupes y predicciones de calidad en la pieza final, entre otros. Estos resultados pueden llevarnos en muchas ocasiones a realizar ajustes en el diseño, para evitar esas características indeseables en las partes plásticas inyectadas, buscando siempre el equilibrio entre la apariencia y el buen desempeño de la parte dentro del ensamble.

Finalmente, en el capítulo 7, dedicado a la fase de **VERIFICACIÓN** o Validación, se pretende probar y validar el Diseño del componente, realizando ensambles del producto final donde interviene este componente cerciorándonos de que cumple

---

con todas sus funciones identificadas en el DBF (Diagrama de Bloques Funcionales). Además, se hacen evaluaciones del ensamble del copete digital para determinar la confiabilidad que se espera de este componente a largo plazo mediante pruebas de vida acelerada.

La verificación incluye la liberación de planos con CTQ's identificados por medio del símbolo  $\diamond$ , además se verifican algunos supuestos de normalidad y variabilidad utilizados en la fase de optimización con estudios estadísticos de piezas similares o con partes de herramental final cuando se disponen de ellas.

---

## **2. ANTECEDENTES**

---

---

## 2.1 EL ENFOQUE SEIS SIGMA

Seis Sigma es una visión y una filosofía de compromiso con los clientes para ofrecer productos con la más alta calidad y al menor costo. Es una medida que demuestra niveles de calidad de ejecución al 99.9997% para productos y procesos. Es una aplicación práctica de herramientas y métodos estadísticos que nos ayudan a medir, analizar, mejorar y controlar nuestros procesos.

Seis Sigma inicia y finaliza con el cliente y el consumidor. El Cliente es toda persona que está enseguida a nuestro proceso, puede ser interno o externo a la empresa. El consumidor es el usuario final del producto, generalmente se le considera como externo; es decir, el propietario o comprador doméstico.

Seis Sigma inicia con el requerimiento del consumidor, lo que luego se traduce a requerimientos técnicos específicos con la ayuda del QFD.

Sigma es una unidad estadística de medida que refleja la capacidad del proceso. La escala Sigma de medida está perfectamente correlacionada con tales características como los defectos por unidad (DPU), partes por millón defectuosos (PPM's) y la probabilidad de falla / error. Los niveles de defectos se reducen de manera exponencial conforme aumentan los niveles Sigma de un valor al siguiente como se muestra en la tabla 2.1

$\sigma$	PPM
2	308,537
3	66,807
4	6,210
5	233
6	3.4

Tabla 2.1 PPM's para diferentes niveles de capacidades de proceso

Las capacidades de proceso pueden ser de corto plazo ( $Z_{ST}$ ) o de largo plazo ( $Z_{LT}$ ). En el apéndice A.5 se hace una descripción de la diferencia entre estos dos indicadores. La capacidad a corto plazo es también conocida como la *capacidad inherente del proceso*. Refleja la variación dentro de un grupo de datos y nos indica lo mejor que el proceso puede llegar a estar.

Mientras que la capacidad a largo plazo, también conocida como *Capacidad Sostenida del Proceso*, refleja la variación del 'proceso total'. Por lo tanto, siempre es de esperarse que la Z de largo plazo se encuentre desplazada respecto a la de corto plazo con un valor menor. Este desplazamiento es conocido como Zshift y para términos prácticos, dentro de esta empresa se fija este valor en 1.5.

---

Así  $Z_{LT} = Z_{ST} - 1.5$

Entonces,  $Z_{ST} = 6$ , equivale a  $Z_{LT} = 4.5$ , la cual tiene asociada una probabilidad de defecto de  $3.45 \times 10^{-6}$  en el caso de una distribución normal estándar con media  $\mu=0$  y desviación estándar  $\sigma=1$ , que en forma abreviada se expresa como  $N \sim (0,1)$ .

Así pues, una empresa cuyos procesos alcanzan niveles de  $Z_{ST}=6$  tendrá 3.4 partes defectuosas por cada millón de oportunidades (ver apéndice A).

## 2.2. METODOLOGÍAS DEL DISEÑO PARA SEIS SIGMA (DFSS)

Cuando se dice estar usando Seis Sigma a menudo puede generarse confusión respecto a qué metodología es la que realmente se está usando. La mayoría de las veces que escuchamos a alguien decirlo, en realidad se está refiriendo a la metodología DMAIC (*Definition, Measurement, Análisis, Improvement, Control*) porque tiene un proceso existente que le genera pérdida de recursos. La minoría restante de los que aplican Seis sigma está utilizando una aproximación del DFSS al diseño de un nuevo producto para calidad Seis Sigma.

La metodología DMAIC debe usarse cuando ya existe el producto o proceso en la compañía, pero no se está cumpliendo con las especificaciones o requerimientos del cliente o simplemente el desempeño no es el adecuado. Esta metodología es casi universalmente reconocida y se define de acuerdo a las siguientes 5 fases:

- **Definición** de los objetivos del proyecto y requerimientos del cliente
- **Medición** del proceso para determinar el desempeño actual
- **Análisis** y determinación de las causa(s) que originan los defectos
- **Mejora** de los procesos al eliminar las causas que originan los defectos
- **Control** del desempeño futuro del proceso

Caso contrario al de DMAIC, los pasos o fases del DFSS no son universalmente conocidos o definidos, casi todas las compañías u organismos de entrenamiento tienen su propia definición del DFSS. Muchas veces una compañía implementará DFSS para adecuar su negocio, industria o cultura, otras veces implementarán la versión de DFSS usada por la compañía consultora que los asiste en el desarrollo de su producto o servicio. Debido a esto, DFSS es más una aproximación que una metodología bien definida.

DFSS se usa para diseñar o rediseñar un producto o un servicio desde su concepto hasta su implementación.

El nivel esperado en Sigmas del proceso de un producto o servicio desarrollado con DFSS es de al menos 4.5 (no más de aproximadamente un defecto por cada mil oportunidades), pero puede ser 6 Sigma o mayor, dependiendo del producto. La producción de un producto o un servicio a esos niveles de calidad significa que

---

las expectativas y necesidades del cliente fueron completamente entendidas antes de que el diseño pudiera terminarse e implementarse.

### 2.2.1. DMADV

Una metodología popular del DFSS es DMADV (*Definition, Measurement, Analisis, Design, Validation*), la cual consiste también de 5 pasos o fases (al igual que DMAIC) que son:

- **Definir**- Determinar objetivos y desarrollo
- **Medir** - Identificar las necesidades del Cliente o el Consumidor y convertirlas en requerimientos de diseño medibles: CTQs
- **Analizar** - Identificar y desarrollar diseños de alto nivel que mejor satisfagan a los CTQs
- **Diseñar**- Desarrollar los detalles del diseño y optimizarlo para que se pueda construir
- **Verificar**- Construir o desarrollar un producto o proceso piloto para verificar la actuación de los CTQs

DMADV inicialmente estudia procesos semejantes a los que se utilizarán en los nuevos diseños.

Con una ligera modificación a la metodología DMADV también se encuentra el DMADOV que incluye una fase de optimización.

Existen otras metodologías dentro de DFSS que pueden llegar a ser importantes como DCCDI (Definición, Concepto, Cliente, Diseño e Implementación), IDOV (Identificación, Diseño, Optimización y Verificación) y el DMEDI (Definición, Medición, Exploración, Desarrollo e Implementación) donde se puede ver que existe mucha similitud entre las fases de estas metodologías y las del DMADV.

### 2.2.2. IDOV

En nuestro caso el de mayor importancia será el IDOV que es una metodología de diseño bien conocida especialmente en el área de la manufactura.

Como ya se ha mencionado, el IDOV tiene cuatro fases de acuerdo a su acrónimo donde se:

- **Identifica** al cliente y las especificaciones (CTQ's)
- **Diseña** y traduce los CTQ's del cliente a requerimientos funcionales y a soluciones alternativas. Un proceso de selección hace encontrar de una lista de soluciones la "mejor" solución.
- **Optimiza**. Usa herramientas estadísticas avanzadas y modela para predecir y optimizar el diseño y desempeño del producto o servicio.
- **Valida** o verifica que el diseño que se ha desarrollado cumplirá con los CTQ's del cliente.

---

Como puede verse, la aproximación al DFSS puede utilizar cualquiera de las muchas metodologías posibles; pero el hecho es que todas estas metodologías utilizan las mismas herramientas avanzadas de diseño, como QFD o Despliegue de la Función de Calidad, AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla), DOE (*Design Of Experiments*), Simulación, Optimización Estadística, Diseño Robusto, etc. y en general todas pueden adecuarse al diagrama de flujo de la figura 2.1 donde se ilustra el desarrollo de un Diseño para Seis Sigma (DFSS) de manera genérica.

Todo empieza con la identificación de los requerimientos del cliente a nivel sistema, conocidas como las grandes Y's del proyecto. Se traducen dichos requerimientos a requerimientos técnicos y se identifican los posibles factores que influyen sobre las Y's, estos factores se conocen como las X's potenciales, que luego de un análisis estadístico pueden convertirse en X's vitales cuando se demuestra que tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Se determina el tipo de relación que existe entre las variables independientes (x's) y la(s) dependiente(s) (Y's).

Si la relación es lineal se crean los diagramas de vectores (*vector loops*) y se obtiene la estadística básica sobre las X's, como son media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ).

Si la relación es no lineal debe crearse un modelo matemático usando DOE con Regresión si es que puede medirse la "Y" de manera directa. En caso contrario se usarán herramientas de ingeniería como FEA (*Finite Element Analysis*) y posteriormente se obtiene la estadística básica ya descrita.

Se procede a desarrollar la capacidad de los requerimientos técnicos usando Análisis de Tolerancias para el caso lineal o el método de Monte Carlo\* para el no lineal.

Finalmente se optimiza la capacidad de los requerimientos técnicos ajustando ya sea la media o desviación estándar de las X's, o la relación entre las X's.

---

\* Cap. 9. pag 9-66 del Manual de Entrenamiento en Seis Sigma, Rev. 8.0, Marzo de 1999

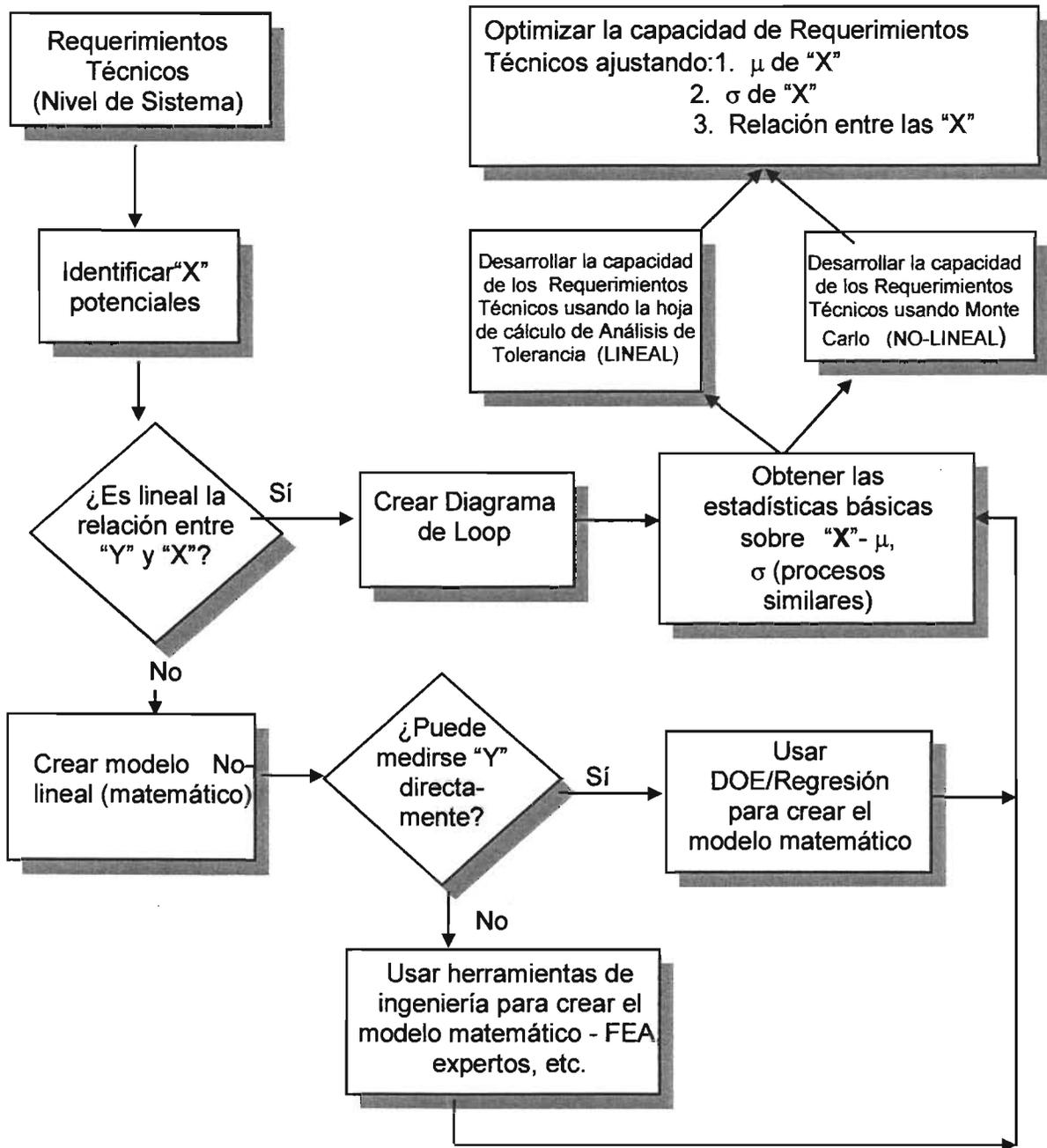


Figura 2.1 Diagrama de flujo para el desarrollo del DFSS de manera genérica

---

## 2.3 CONCEPTUALIZACIÓN DEL DFSS

Como se dijo anteriormente, el DFSS es más una aproximación que una metodología bien definida; sin embargo, se muestran a continuación las definiciones que más se manejan entre las compañías que hacen uso de la herramienta de Seis Sigma.

DFSS se define como una metodología sistemática con herramientas, entrenamiento y mediciones que nos capacitan para diseñar productos y procesos que logren satisfacer las expectativas del cliente y que puedan ser producidos a un nivel de Seis Sigma.

DFSS es la utilización de métodos y herramientas estadísticos para predecir y mejorar la calidad de un producto antes de construir prototipos, para posteriormente verificar esta calidad en corridas piloto y unidades de preproducción y producción.

En pocas palabras:

- **DFSS es** predecir por adelantado la calidad del diseño.
- **DFSS es** el flujo descendente de Requerimientos (Flujo descendente de CTQ's) concordado con el flujo ascendente de capacidad.
- **DFSS** conduce mediciones de calidad y predictibilidad de mejora durante las fases tempranas de diseño.
- **DFSS es** una mejora a nuestros procesos actuales de diseño
- **DFSS no es** un reemplazo del proceso NPI (*New Product Introduction*)
- **DFSS es** involucramiento interfuncional de diseño integrado
- **DFSS** utiliza las capacidades de los procesos de Manufactura para tomar decisiones finales de diseño
- **DFSS** monitorea varianzas de proceso para verificar que se consigan los requerimientos del cliente en  $6\sigma$ .
- **DFSS** usa datos de confiabilidad en diseño.

## 2.4 PROCESO DE DESARROLLO DE PRODUCTOS

Un Proceso de Desarrollo de Productos de acuerdo al concepto de "Ciclo de Vida del Producto" definido por Ullman[7] consiste en seis fases:

- Fase 1. ESPECIFICACIÓN Y PLANEACIÓN,*
- Fase 2. DISEÑO CONCEPTUAL,*
- Fase 3. DISEÑO DEL PRODUCTO,*
- Fase 4. PRODUCCIÓN,*
- Fase 5. SERVICIO Y*
- Fase 6. RETIRO DEL PRODUCTO*

---

Las primeras tres fases forman el Proceso de Diseño de un Producto. Este proceso se puede medir de acuerdo a:

- a) Costo,
- b) Calidad y
- c) Tiempo.

Con el siguiente ejemplo de manufactura de un vehículo (figura 2.2), se puede mostrar la influencia del Proceso de Diseño en el costo, calidad y tiempo de desarrollo de un Nuevo Producto:

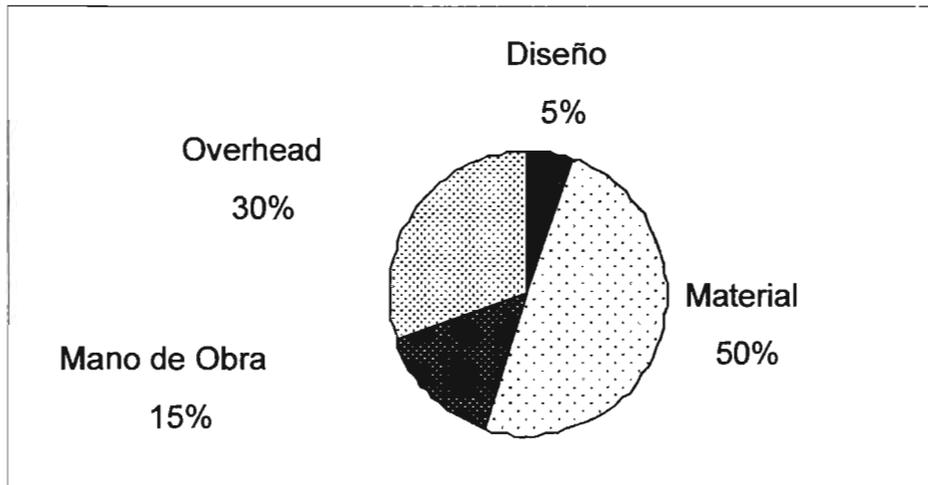


Figura 2.2. Costo final de la Manufactura de un Vehículo.

En esta figura, se representan los costos del diseño, el material, la mano de obra, los tiempos muertos y gastos imprevistos (*Overhead*) en la manufactura de un vehículo, según Ford Motor Company. Ahí se muestra que el 5 % del costo total por manufacturar un vehículo son por actividades de diseño.

Sin embargo, las decisiones hechas durante el proceso de diseño afectan el 70 % de los costos de manufactura, como puede verse en la figura 2.3.

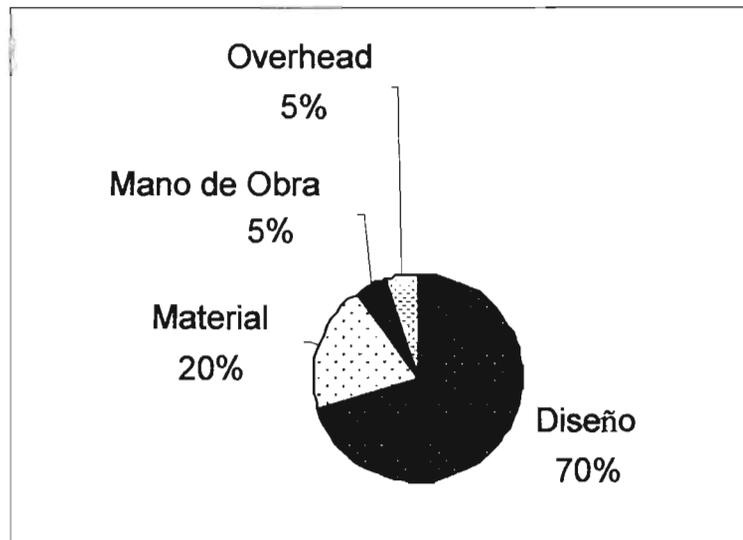


Figura 2.3. Influencia en el costo final de la manufactura de un vehículo.

Por tanto:

***“Las decisiones hechas durante el Proceso de Diseño tienen el más grande efecto en el costo de un producto”.***

Por ejemplo, algunas decisiones del Proceso de Diseño pueden directamente determinar los materiales a utilizar, las partes a ser ensambladas, las formas de las partes, los procesos de manufactura de las partes, entre otras.

Los resultados del proceso de diseño también tienen un gran efecto en la calidad del producto. La **calidad** es una composición de factores que son responsabilidad del ingeniero de diseño, de esta manera las decisiones hechas durante el proceso de diseño determinan como la calidad del producto es percibida por los clientes.

El proceso de diseño también afecta el tiempo que éste toma en producir un nuevo producto. La figura 2.4 muestra el número de cambios de diseño hechos por dos compañías automotrices con diferentes filosofías de diseño.

Los cambios que ocurren después del proceso de diseño son más costosos que los que ocurren antes.

La curva de la compañía B indica que estuvo haciendo cambios después de que fue liberado el diseño para producción, quiere decir que estuvo diseñando el automóvil cuando éste estaba siendo distribuido para su venta. Lo anterior implica cambios en las líneas de producción y la posibilidad de retirar automóviles del mercado por problemas de funcionamiento o fallas.

La compañía A hizo muchos cambios durante el proceso de diseño, pero terminó el vehículo antes de que éste fuera liberado para producción. Los cambios al

---

diseño en las primeras fases del proceso, requieren más tiempo y esfuerzo de ingeniería.

Pero un mismo cambio que costaría \$1,000 USD en tiempo de ingeniería cuando éste se hace en las etapas iniciales del proceso de diseño, costaría si se hace después del proceso de diseño \$1,000,000 USD o más en cambios en herramientas, ventas, administración e imagen.

La figura también muestra que la compañía A hizo más cambios que la B, esto implica que ellos exploraron más alternativas de diseño lo cual explica por que modificaciones ya no fueron necesarias al final del proyecto.

Todas esas diferencias se deben a las diferentes filosofías de diseño aplicadas por cada compañía.

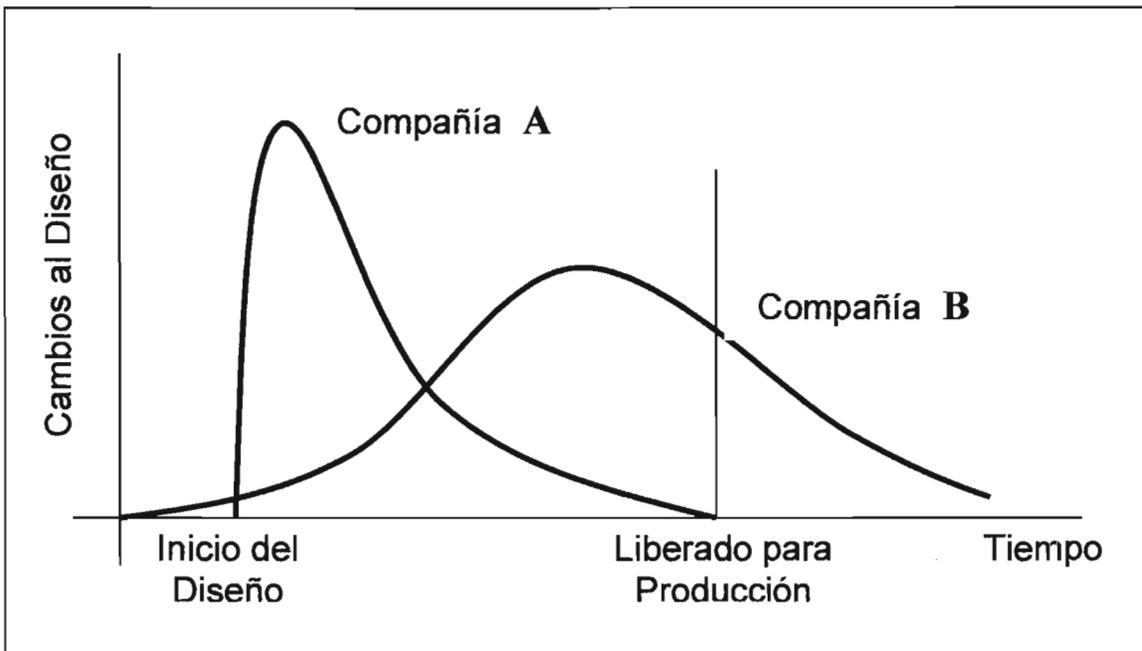


Figura 2.4. Cambios al diseño en diferentes etapas del desarrollo de un producto

Las curvas de la figura 2.4, son una representación de la filosofía de diseño de una compañía Japonesa A (Toyota) y de una compañía Norteamericana B (Ford) en los años 80's. La filosofía de diseño de la compañía A, implemento el modelo de Ingeniería Concurrente y los sistemas CAD/CAE/CAM como herramientas de trabajo para el desarrollo de sus productos.

---

## 2.5 LA GRAN OPORTUNIDAD DEL DISEÑO

El Proceso de DFSS producto nos permite diferenciar entre las contribuciones del diseño a la calidad y costo y las contribuciones de producción, al desempeño medido total de un proceso. DFSS tiene un factor potencial de contribución relativo a los esfuerzos de manufactura para lograr Seis Sigma.

Algo muy importante para los Ingenieros de Diseño, es que DFSS permite describir el enlace entre los métodos estadísticos y el proceso de diseño, con lo que se puede tener herramientas para emigrar del diseño determinístico al diseño probabilístico.

Es indudable que DFSS es la clave para enlazar la optimización del diseño de calidad con las consideraciones de costo y tiempo. Esto nos lleva a reconocer y ponderar la relación entre el costo de corregir defectos en manufactura y el descubrirlos en el proceso de diseño.

En el proceso de DFSS para el desarrollo de un producto, se considera la fabricación de prototipos, sin embargo, debe reconocerse las limitaciones inherentes de los mismos en el diseño, y como deben ser usados en combinación con la simulación y la modelación para diseño robusto con las herramientas CAD/CAE disponibles.

En términos generales, el proceso DFSS nos llevará a reconocer el flujo de diseño estadístico a través de tres fases: desarrollo de sistemas, diseño detallado y pruebas e integración.

En la figura 2.5, vemos que entre todas las fases del desarrollo de un producto como Investigación, Diseño, Prototipo, Producción y Cliente, lo que tradicionalmente se le dedica mayor esfuerzo en cuestiones de calidad ha sido enfocada al área sombreada (Producción/Cliente). El concepto de DFSS junto con el de DFR (*Design For Reliability*) cambia respecto a este enfoque, ya que nos enseña como mover los esfuerzos a las fases de investigación y diseño, donde los costos por cambios o correcciones son los menores.

La confiabilidad es la calidad a través del tiempo. El DFR es una metodología también avalada por Seis Sigma, con la que se pretende desarrollar productos que cumplan con las expectativas y requerimientos del cliente durante la vida útil de los mismos. Además se pueden utilizar los datos de confiabilidad para hacer estimaciones de costos por garantía que la empresa está dispuesta a pagar.

Sin embargo, el desarrollo formal del DFR está fuera del alcance de este proyecto, y al final simplemente se presentan evaluaciones de confiabilidad que ayudan a predecir de manera somera como se estará comportando el copete a través del tiempo.

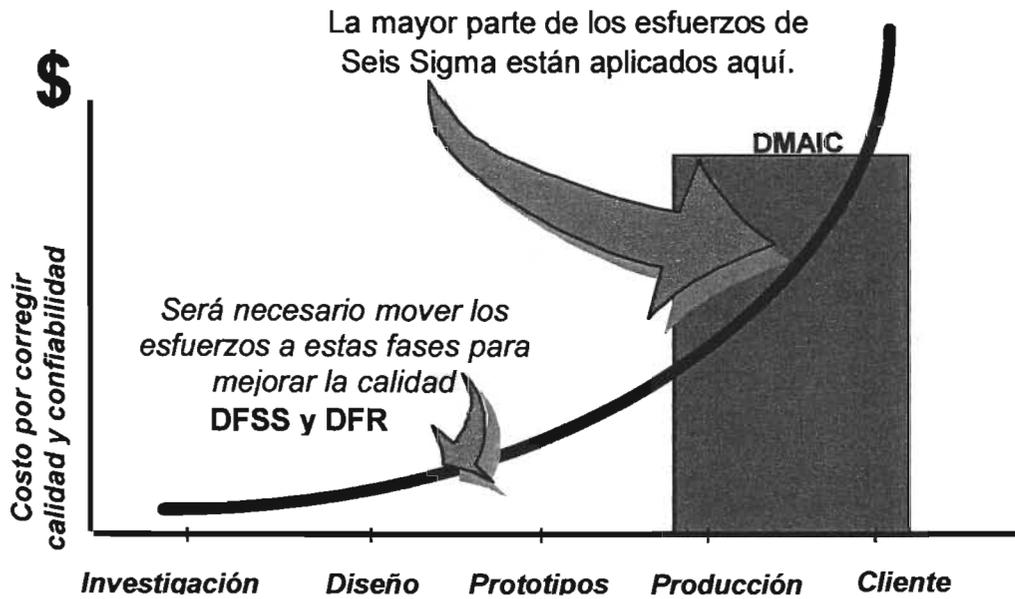


Figura 2.5. Costos por corrección de calidad y confiabilidad en las diferentes etapas del desarrollo de un producto [6]

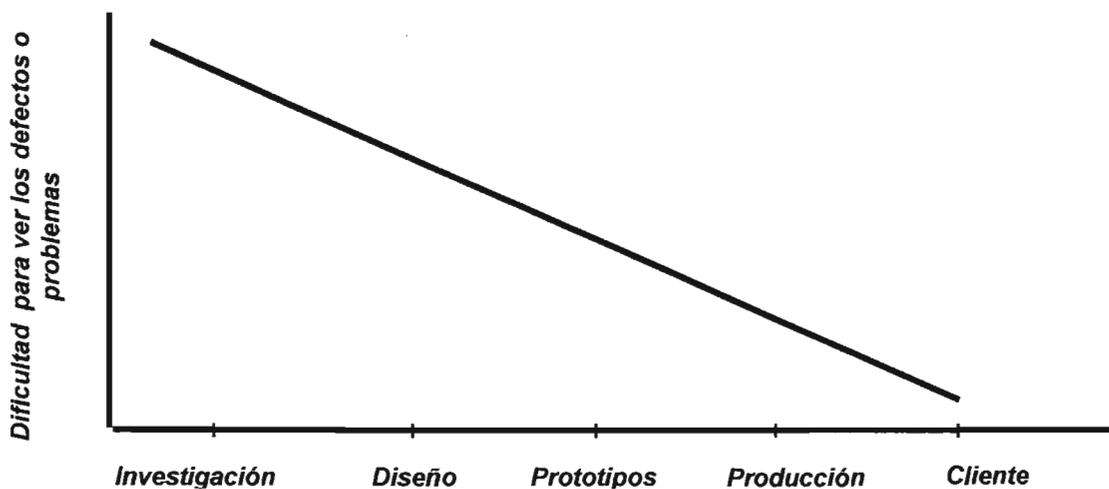


Figura 2.6. Dificultad para ver los defectos o problemas en las diferentes etapas del desarrollo de un producto

En la figura 2.6 se muestra como en las etapas tempranas del desarrollo de un producto (Investigación y Diseño), los defectos son difíciles de ver en comparación con la facilidad que se tiene para ello en la etapa de producción, donde los defectos saltan a la vista; sin embargo, el costo para dar solución a los problemas que implican tales defectos son despreciables si se detectan en esta fase, en comparación con los costos que implicaría el descubrirlos hasta la etapa de producción (figura 2.5). De ahí la importancia de este nuevo enfoque para el desarrollo de un producto mediante la metodología del DFSS y DFR.

---

# **3. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA**

---

---

Como se ha mencionado, el objetivo del presente trabajo es ejemplificar una aplicación práctica de la metodología de Diseño para Seis Sigma (DFSS) desde los conceptos, estrategias y metodologías utilizadas en el Proceso, hasta la etapa de producción de dicha aplicación.

El caso que presentamos es el diseño de copete digital para lavadoras automáticas en capacidades de 10 y 12 Kg. y su interfase con la tarjeta de control y *overlay*. El material a emplearse en el copete debe cumplir con requerimientos de impacto, resistencia UV, estabilidad dimensional, etc. ya que de entrada se define que se debe usar un polímero para ser procesado mediante el moldeo por inyección.

La intención de diseño del copete digital va orientado principalmente a la reducción de partes, y por ende busca alcanzar un impacto económico significativo en comparación con nuestros productos actuales y los de la competencia, sin descuidar aspectos de apariencia (calidad percibida) y seguridad del producto, así como de requerimientos de ensamblabilidad y funcionalidad de la tarjeta de control.

En la figura 3.1 se presentan las partes de una lavadora automática con las que interactúa el copete directa o indirectamente. La parte de apariencia está integrada por los ensambles de cubierta, tapa y copete.

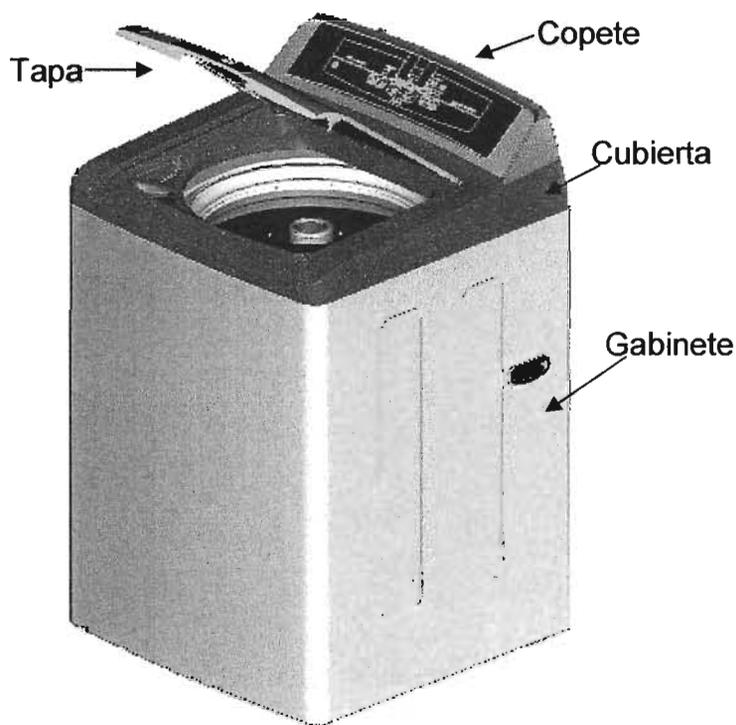


Figura 3.1 Componentes de la lavadora que interactúan con el copete

---

La intención de diseño del copete es tal que el subensamble en el que interviene sea de sólo 3 componentes: copete, overlay y tarjeta de control, como se muestra en la figura 3.2. Las partes de las que se pretende prescindir son: una botonera y 5 tornillos, si se compara al subensamble de un modelo actual con copete plástico (figura 3.3), y 2 remates y soportes control, respecto a un producto con copete metálico.

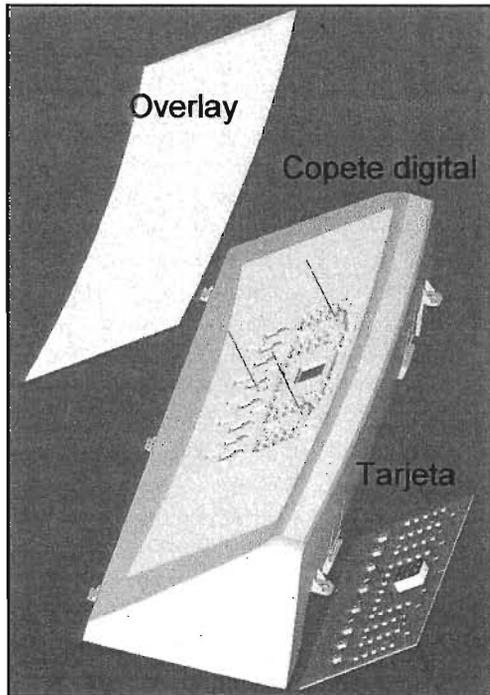


Figura 3.2. Componentes del ensamble del copete digital para lavadoras del nuevo proyecto

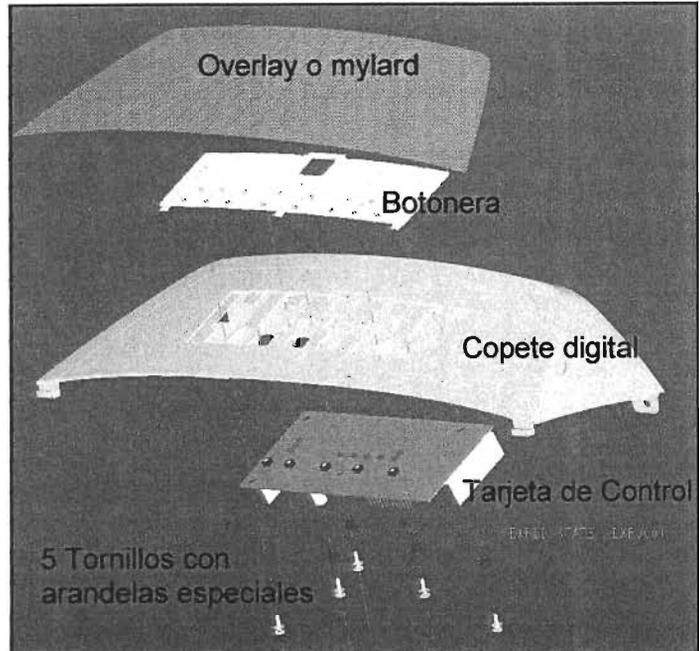


Figura 3.3. Componentes del ensamble final del copete digital para modelos de lavadoras digitales actuales

La herramienta CAD (*Computer Aided Design*) que se utiliza para el diseño de las lavadoras en cuestión, y por ende del copete digital es un software comercial de modelación paramétrica tridimensional que tiene muchas herramientas que permiten desarrollar un diseño considerando aspectos de manufacturabilidad, ensamblabilidad y apariencia, entre otros.

Durante la fase de diseño del copete se emplean herramientas CAE (*Computer Aided Engineering*) para hacer análisis mecánico y la simulación del proceso de inyección de plásticos, los cuales nos permiten hacer predicciones sobre el desempeño del componente que nos ocupa en este proyecto.

Para poder prescindir de la botonera, es necesario que el mismo copete cumpla con la función que ésta tiene, pero además no puede usarse el mismo concepto de los botones ya que de ser así, por el mercado al que va dirigido el producto, se violaría una patente que protege el concepto de botones en forma de doble espiral que se muestra en la figura 3.4.

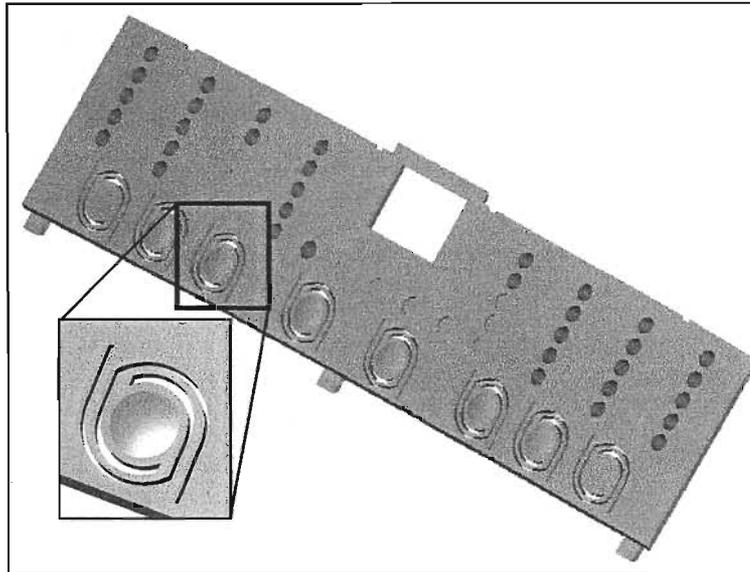


Figura 3.4- Geometría en forma de doble espiral de los botones de la botonera actual

La forma geométrica que se diseñe para los botones, combinada con el material a emplear debe satisfacer requerimientos de fatiga, ya que ellos son los que reciben la acción mecánica de flexión para activar los microswitches de la tarjeta de control cuando el usuario hace la selección de ciclos en la lavadora y esto se lleva a cabo de manera cíclica durante toda la vida útil del producto.

Por otra parte, para eliminar los tornillos que se emplean para sujetar la tarjeta al copete, éste deberá tener sujetadores, que en lo sucesivo se llamarán *snap fits* o simplemente *snaps*, los cuales tendrán un diseño tal que cumpla con el requerimiento de ensamble y desensamble además de la resistencia mecánica a la flexión.

Para el diseño de los *snap fits* se emplea la hoja de cálculo *GEA Plastics database*[2] y posteriormente se corroboran los resultados con la ayuda de la herramientas CAE antes mencionado.

En general, el diseño del copete debe cumplir con los lineamientos de diseño para ensamble, diseño para manufactura o moldeabilidad en este caso y diseño para apariencia. Con la ayuda de la herramienta CAD que se usa en esta empresa, se hacen análisis de interferencias, se revisa y comprueba gráficamente que todas las áreas de la pieza sean desmoldables, mientras que para las predicciones de calidad por apariencia y características del proceso de inyección, se emplea una herramienta CAE para simulaciones de dicho proceso.

Cabe mencionar que el estudio de los efectos de la temperatura sobre el comportamiento del copete está fuera del alcance de este trabajo, es decir, los análisis mecánicos y de tolerancias se hacen considerando que el componente trabaja a temperatura ambiente, porque los cambios de temperatura en condiciones normales de operación no afectan significativamente.

---

# 4. IDENTIFICACIÓN

---

---

## 4.1. IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

La Identificación es el primer paso de la metodología IDOV del DFSS. Ésta comienza el proceso con un amarre formal del diseño a la voz del cliente, entendiendo que el *cliente* no es solo el usuario final sino todo aquel cuya función dependa de la nuestra.

En el caso del diseño de un componente, como el copete digital, el cliente inmediato es el área de manufactura, ya que lo que se diseñe, primeramente debe ser manufacturable y luego debe gozar de *ensamblabilidad* para cumplir con las expectativas de dicho cliente. Luego seguirán clientes secundarios que también dependerán de nuestro trabajo aunque de manera indirecta como son las áreas de producción, venta y distribución, hasta llegar al usuario final, cuyo principal interés estará enfocado con la *funcionalidad* del producto que ha adquirido. Como parte de esa funcionalidad estará la *respuesta adecuada del panel de control o copete* en el momento de accionar los controles.

En el diseño del copete digital está contemplada el área de servicio como uno de nuestros clientes, por lo que tal diseño deberá considerar aspectos de serviceabilidad, es decir, además de ser un diseño para ensamble, deberá ser también para desensamble, de tal forma que si este cliente necesita hacer alguna sustitución de componentes que intervengan en el ensamble del copete pueda hacerlo sin mayor dificultad y sin que tengan que reemplazarse partes innecesarias.

## 4.2. REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

Una vez identificado quienes serán nuestros clientes, debemos preguntarnos qué es lo que ellos quieren, por ejemplo, al usuario final le interesará la apariencia, el desempeño y la facilidad de uso de nuestro producto; el área de manufactura querrá que el copete sea fácil de ensamblar además de que sea capaz de producirse. Así, los requerimientos del cliente que se atacan en este proyecto son: *funcionalidad y ensamblabilidad* de la tarjeta de control en el subsistema copete-overlay-tarjeta, así como la *ensamblabilidad* de todo este subsistema con la cubierta.

En esta fase de la metodología IDOV del DFSS es donde se identifican los requerimientos del cliente, es decir, aquellas características del producto que son críticos para la satisfacción del usuario final y se traducen a requerimientos técnicos (CTQ's) que el producto diseñado deberá cumplir al momento de salir a producción.

Estos CTQ's se transforman en las grandes Y's del producto, que generalmente están relacionados con el desempeño y apariencia del mismo, y en la parte medular del flujo descendente.

### 4.3. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Los requerimientos del cliente generalmente no son medibles. No se pueden establecer escalas de ensamblabilidad o de funcionalidad. Necesitan traducirse a requerimientos técnicos, es decir requerimientos que puedan especificarse de manera concreta para no caer en ambigüedades.

En nuestro caso particular, los requerimientos del cliente los traducimos a gaps críticos que influyen directamente en la *funcionalidad* y *ensamblabilidad*. Los requerimientos del cliente son tomados del flujo descendente de CTQ's (CTQ FLOW DOWN), de manera similar a como se ilustra en la figura 4.1

La *funcionalidad* y *ensamblabilidad*, identificados ya como requerimientos del cliente vienen a ser las grandes Y's de este proyecto, las cuales dependen de los gaps críticos que a su vez están en función de las X's potenciales vitales. Éstas necesitan también ser identificadas, definidas y verificadas mediante un sistema de medición adecuado, por lo que en esta etapa se analiza la capacidad del sistema de medición mediante un estudio de Gage R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad) que se empleará en la etapa de verificación de la metodología IDOV.

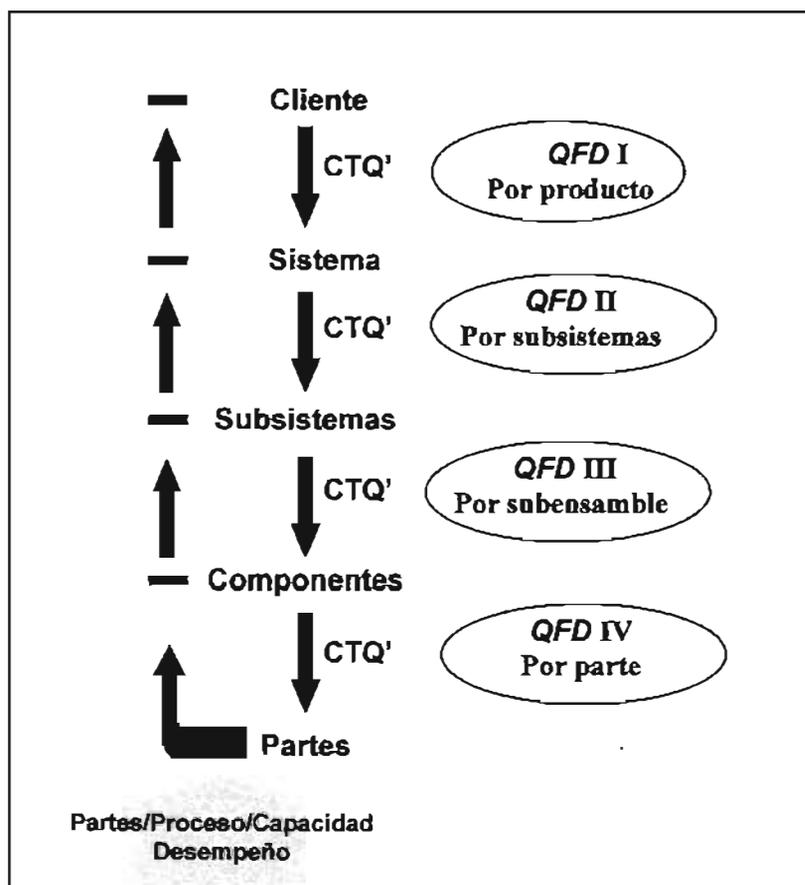


Figura 4.1. Flujo descendente de CTQ's

---

El estudio del Gage R&R nos permite:

- Determinar si el error de medición es pequeño y aceptable relativo a la variación del proceso o especificación del producto
- Determinar la confianza de la "certeza" de los datos.
- Obtener una adecuada resolución del Gage o equipo de medición.
- Enfocar los esfuerzos de mejora si la variación de la medición es inaceptable.

Debido a que la *funcionalidad* y la *ensamblabilidad* no pueden medirse directamente es que éstas se definen en función de los gaps críticos que sí podrán medirse indirectamente a partir de las dimensiones de las X's vitales de las diferentes partes que intervienen en el ensamble. En este caso, las X's vitales del copete, la tarjeta control y el overlay.

Las especificaciones de los gaps críticos (requerimientos técnicos) para alcanzar los requerimientos del cliente de funcionalidad y ensamblabilidad se definen de manera conjunta con el equipo de apoyo técnico con base en la experiencia y conocimiento de cada integrante del mismo y del resultado de los análisis de tolerancia. El equipo de apoyo técnico es un grupo multidisciplinario de personas que participan en mayor o menor grado durante el desarrollo de un proyecto Seis Sigma.

#### 4.4. QFD Y AMEF COMO HERRAMIENTAS DE SEIS SIGMA

Dos herramientas de Seis Sigma muy importantes que deberán utilizarse en esta fase de **Identificación** de la metodología IDOV para DFSS serán el QFD (Despliegue de la función de Calidad) y el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla)

##### 4.4.1 QFD

Por sus siglas en inglés, Quality Function Deployment. En nuestro caso lo llamaremos Despliegue de la Función de Calidad. EL QFD es una de las mejores herramientas para realizar un acertado flujo descendente de CTQ's.

- QFD proporciona un proceso de **flujo descendente** para los CTQs desde el nivel más alto al más bajo.
- El proceso de **flujo descendente** comienza con la **voz del cliente** como entrada.
- Desde ese punto descendemos a través de una serie de *cuatro Casas de la Calidad* para llegar a los factores controlables internos.
- QFD es una herramienta para priorizar, usada para mostrar la importancia relativa de los factores más que como una función de transferencia.

---

Una Casa de la Calidad es una representación gráfica del flujo lógico, desde identificar los requerimientos del cliente hasta el desarrollo detallado de las acciones para asegurar la satisfacción del cliente.

Las cuatro Casas de la Calidad para el QFD usan la voz del cliente en una cascada sistemática dentro del diseño, el proceso y la comercialización del producto o servicio, como se ilustra en la tabla 4.1.

Las Cuatro Casas de la Calidad para esta empresa son:

- Casa del cliente (QFD I)
- Casa de la empresa (QFD II)
- Casa del proceso (QFD III)
- Casa del control de proceso (QFD IV)

En las figuras 4.2 y 4.3, se presenta una porción del QFD I y QFD II, respectivamente, del proyecto de lavadoras automáticas 10 y 12 Kg., donde podemos encontrar la ensamblabilidad, serviceabilidad, funcionalidad y durabilidad entre otros como requerimientos del cliente. El QFD I es a nivel de todo el sistema y el QFD II es a nivel subsistema, en este caso al nivel del subsistema *Estructura* que es donde interviene el ensamble copete.

<b>QFD</b>	<b>Casas de la calidad</b>	<b>Nivel</b>
I	Cliente (usuario final)	Sistema (todo el producto)
II	Empresa	Subsistema
III	Proceso	Subensamble
IV	Control de proceso	Componente

Tabla 4.1.- Casas de la Calidad y niveles en que impacta

Especificaciones	Dirección										Satisfacción del cliente					
	Co	Op	Hd	Co	Co	Hd	Op	Hd	Hd			Importancia del requerimiento	Satisfacción del cliente			
	Numero de operaciones por unidad de tiempo necesarias para instalar MEF Volumen de agua en la etapa de lavado No de operaciones para fijar características de lavado, % de hueverías sin necesidad de demostración de uso RMC Variable Prueba de enredo Cantidad pelusa generada en ciclo de blanqueo a carga de usuario Proporción agua suavizante para que no manche Confiabilidad Cumplimiento con lista de servicioabilidad Cumplimiento de DOE TBD															
	TBD		Igual D System	2	800 MM	Estrobor: 600, 800, 900 por Necesidad, Placa 600 TBD		2.5 MAX	TBD		TBD servicio	100% cumplimiento	100% cumplimiento			
Fácil de instalar	9													3	1	3
Que tenga despachador de Detergente/Suavizante/Cloro									9					3	3	9
Que lave bien (quite las manchas)							1			9				9	3	9
Ciclos adecuados a los tipos de ropa.							9	9	9					9	9	3
Que llene rápido.														9	3	3
Ahorro de agua.	9	9												9	3	9
Fácil de usar (Operaciones automatizadas)				9	9					1				9	1	3
Que no deje pelusa									9					9	3	9
Que el suavizante no manche la ropa										9				9	3	9
Sin residuos de jabón en el enjuague.						3				3				9	9	9
Que sea durable											9			3	3	3
Brand Aproveal, Consumer Union (Requerimientos de GE por no cliente)						9		9	9	9				9	1	1
México y Centro America (PROFECO, NOM-005)														9	9	9
México y Centro America (PROFECO, INTEX, DESEMPEÑO-12 y NOM-005)														9	3	3
Que sea servicioable (fácil de dar mantenimiento)											9			9	9	9
Partes de fácil mantenimiento (servicioables) por el cliente o usuario-STC.								1				9		1	1	9
Fácil de servicio sist/Impulsor / Controles/ Hidraulico													9	3	3	3

PUNTAJE DE LA IMPORTANCIA TECNICA	98	249	194	928	981	830	928	1074	316
CLASIFICACION DE LA IMPORTANCIA TECNICA	30	12	14	5	6	7	20	4	19

Figura 4.2- QFD I del proyecto (requerimientos del usuario final)

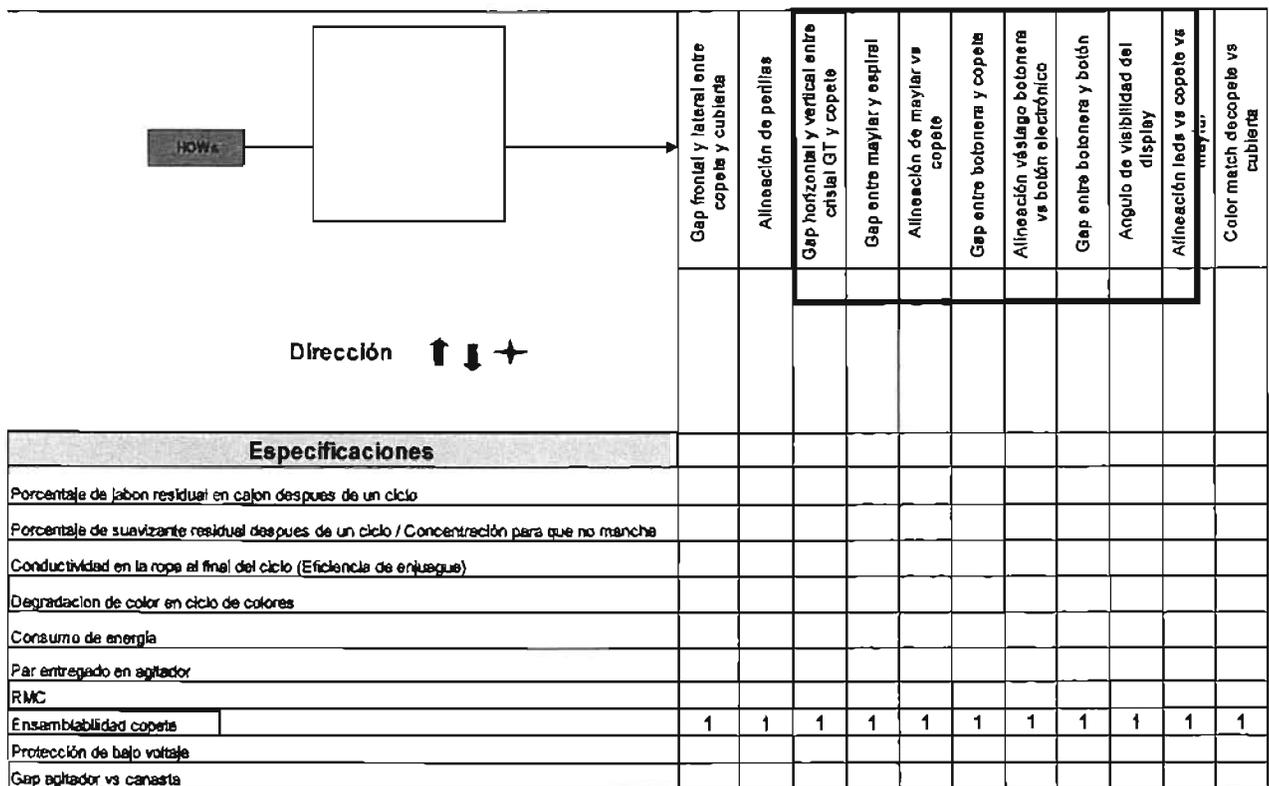


Figura 4.3, QFD II del proyecto (requerimientos de la empresa a nivel subsistema)

#### 4.4.2 AMEF

El AMEF es una técnica analítica enfocada a la prevención de fallas a través de la identificación de problemas potenciales. El AMEF es una herramienta proactiva que se usa pragmáticamente para identificar las fallas potenciales y sus efectos, para calificar numéricamente el riesgo asociado con la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la detectabilidad, y documentar los planes apropiados para la prevención.

Los AMEF's se pueden aplicar a diseño de productos, a procesos de manufactura y de servicios y transaccionales. En nuestro caso particular, lo estaremos aplicando para el diseño de nuevos productos, específicamente en el diseño del copete digital.

- El AMEF de PRODUCTO se enfoca en el modo de la falla potencial sobre el producto en sí debido al proceso de diseño.
  - Sistema
  - Subsistema
  - Sub-ensambles
  - Componentes/Partes
  - Materia Prima

- 
- El AMEF de PROCESO se enfoca en el modo de la falla potencial debido a los procesos de manufactura. Se analiza el flujo o pasos del proceso, los equipos o maquinarias, así como las herramientas y los operadores.
  - AMEF de SERVICIO - Se enfoca en el servicio al Cliente después de las ventas, considerando aspectos de confiabilidad, disponibilidad de refacciones, garantías, etc.

**Reseña histórica del AMEF:**

- Se usó por primera vez en la década de los 60 en la industria Aeroespacial durante las misiones del Apolo.
- En 1974 las Fuerzas Navales de Estados Unidos desarrollaron la norma MIL-STD-1629A [8] referente al uso de AMEF.
- A fines de los años 70, la industria automotriz se vio obligada a efectuar cambios en las aplicaciones debido a los altos costos en sus pasivos, y comenzó a incorporar el AMEF dentro de la administración de sus procesos.
- A mediados de los 80, la industria automotriz instituyó el AMEF de Proceso para dar validez a sus procesos de manufactura.
- En 1991, ISO 9000 recomendó usar el AMEF de Producto y de Proceso [6].

El AMEF jerarquiza los problemas en los que se debe trabajar primero, identifica las fallas en los planes de control y conduce a hacer más preguntas acerca del proceso.

Algunas definiciones que se utilizan en la aplicación de esta técnica son:

- Modo de la Falla – es la forma en que falla una entrada de proceso específico. Si no fue detectada ni corregida o removida, ocasionará que ocurra el Efecto.
- Efecto – es el impacto sobre los requerimientos del cliente. Generalmente se enfoca al cliente externo, pero puede incluir también el efecto local o los procesos con la corriente.
- Causa que origina la falla.
- Fuentes de variación que ocasionan el Modo de la Falla.

La salida de un AMEF es el “Número Prioritario de Riesgo” (NPR). Este es un número que se calcula basándose en la información que se proporciona respecto a

- los modos de la falla potenciales,
- los efectos y
- la capacidad actual del proceso para detectar las fallas antes de que lleguen al cliente

El NPR se calcula como el producto de tres calificaciones cuantitativas, relacionadas cada una a los efectos, causas y controles:

$$\text{NPR} = \text{Severidad} \times \text{Ocurrencia} \times \text{Detección.}$$

---

## Definición de Términos del NPR:

- Severidad (de Efecto)- la importancia del efecto sobre los requerimientos del cliente - podría estar también relacionado con la seguridad y otros riesgos si ocurriera la falla (1=No es severo, 10=Muy severo)
- Ocurrencia (de Causa)- la frecuencia con la que una causa determinada ocurre y genera un Modo de la Falla. Algunas veces puede referirse a la frecuencia de un Modo de la Falla (1=No probable, 10=Muy probable)
- Detección (capacidad de los controles actuales) - la capacidad de detectar qué tiene el sistema de control vigente:
  - las causas antes de generar un modo de la falla
  - los modos de la falla antes de ocasionar un efecto
  - 1=Posible de detectar, 10=Probabilidad remota de detectar

## Pasos Generales en el AMEF

De manera generalizada, en la aplicación del AMEF se pueden seguir estos pasos:

1. Seleccionar el equipo para el AMEF de Proceso
2. Generar un Mapa de Proceso e identificar todos los pasos del proceso
3. Anotar todas las Salidas Claves del Proceso que satisfacen los requerimientos del cliente interno y externo
4. Hacer una lista de las Variables de Entrada Claves para cada Paso del Proceso
5. Definir el Proceso relacionando las Salidas Claves con las Variables de Entrada Claves del Proceso
6. Clasificar por orden de importancia las ECVP (Entradas Clave Variables de Proceso)
7. Iniciar el AMEF de proceso
8. Hacer una lista de las formas en que puede variar (Modos de la Falla) e identificar los Efectos asociados, para cada Entrada de Proceso
9. Hacer una lista de todas las Causas para cada Modo de la Falla
10. Hacer una lista de los Controles actuales para cada Causa
11. Asignar los índices de Severidad, Ocurrencia y Detección a cada Causa
12. Calcular el número prioritario de riesgo para cada escenario de Modo de la Falla potencial
13. Determinar las acciones recomendadas para reducir los NPR Altos
14. Llevar a cabo las acciones apropiadas
15. Calcular nuevamente los NPR

En la figura 4.4 se presenta la porción correspondiente al AMEF de diseño de producto (Lavadora automática 10 y 12 kg.) que se realizó para el proyecto. En ésta se pueden ver dos valores de NPR (28 y 16) asociados al punto de interfase del usuario con los controles en dos modos de falla diferentes.

Nombre de la parte o componente	Función de la parte	Modo (s) de la falla potencial	Efecto (s) de la falla potencial	Causa (s) de la falla potencial	Controles actuales en el proceso	Ocurriencia severidad	NPR
Copele	Sujección y proteger controles	Controles sueltos	Mal funcionamiento	Mal ensamble	NE	2	8
		Rayado	mala calidad percibida	Mal manejo de materiales	Inspección visual en ensamble	2	2
	Apariencia	Amanillamiento	mala calidad percibida	Sin protección UV	NE	5	3
		No hace color match con copele y gabinete	mala calidad percibida	Muestreo en R de color	Muestreo en R de color	4	7
	Interfase de usuario con controles	Controles no activan o se activan solos	Insatisfacción del cliente	Bombos desajustados	Prueba en los loop	2	7
	Impedir acceso a elementos de potencia	Luces de led no visibles	Insatisfacción del cliente	Letras desalineadas	Prueba en los loop	2	4
		Copete roto o suelto	Usuario desprotegido	Sraps rotos		2	5
						2	2
							20

Figura 4.4. AMEF del proyecto

---

Tanto en los QFD's, presentados en las figuras 4.2 y 4.3 como en el AMEF de la figura 4.4, se observa la necesidad de cuidar los aspectos relacionados a la interfase con el usuario, que en este caso son los controles con los que interactuará para que la tarjeta de control sea la que mande las señales adecuadas para que el producto desempeñe la función requerida. Logrando con esto la satisfacción y seguridad del cliente al usar nuestros productos.

#### 4.5. ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto busca establecer las especificaciones, mediante la metodología IDOV del DFSS, para los gaps críticos del subensamble copete integrado por copete, tarjeta control y overlay, para asegurar el montaje y funcionamiento del sistema overlay-botón-microswitch.

El diseño de este componente no sólo contempla aspectos estadísticos de Seis Sigma, sino que también se utilizan herramientas del diseño mecánico como los que plantea el diseño para ensamble, diseño para manufactura, etc.

Este proyecto abarca también análisis de moldeo y de elemento finito hechos durante la etapa de diseño del copete, aunque no es el fin profundizar en dichos análisis sino utilizarlos como herramientas de optimización o mejoras a los conceptos originales.

Como el proyecto está enfocado principalmente en el sub-ensamble copete, los análisis de tolerancias correspondientes a la interfase copete-cubierta están fuera del alcance de éste. Sin embargo, considerando que la cubierta es una parte modular y que se ensamblará con diferentes tipos de copetes, se toman los análisis ya realizados para el ensamble del copete perillas que tiene las mismas restricciones de ensamble con la cubierta que el copete digital.

El diseño del copete digital se realiza mediante la metodología IDOV del DFSS, por lo que también se deberá seguir ésta en el diseño de la tarjeta digital y del overlay para alcanzar los objetivos de manera simultánea. Aquí simplemente se dejarán identificadas y definidas cuáles serán las X's vitales a cuidar en el diseño de esas partes, ya que la verificación de las mismas está fuera del alcance de este proyecto.

Las verificaciones del ensamble copete con partes físicas de herramental final sí están considerados en este trabajo, así como evaluaciones de laboratorio preliminares en donde se observa su comportamiento como parte del ensamble total del producto.

Así mismo, también se contempla evaluaciones de vida del componente aislado para validar el desempeño que tendrán los actuadores o botones que siendo parte del mismo copete sustituirán a las botoneras. La intención no es establecer un

---

modelo matemático de confiabilidad propiamente, sino encontrar un marco de referencia respecto al comportamiento que tiene la botonera actual.

## 4.6. DISEÑO CONCEPTUAL DEL COPETE DIGITAL

Una de las directrices definidas por la Dirección de la compañía es eliminar en lo posible el uso de tornillos en los ensambles y en general reducir el número de partes que lo integran.

El área de Planeación del Producto con base en los estudios de mercado define que el material a emplearse en las partes de apariencia será un plástico (polímero o copolímero) que cumpla con las especificaciones de Ingeniería.

Aunque en general el diseño de productos plásticos nos permite reducir el número de componentes en un ensamble, la mayoría de las aplicaciones requieren de algún método de ensamble como son:

- Sistemas de ensamble desde el moldeo, que es el más económico ya que no ocupa tornillos, adhesivos, solventes o equipo especial. En esta categoría es donde se incluyen los snap fits.
- Sistemas de pegado químico, que tampoco requiere de tornillos pero ocupa solventes y adhesivos para crear la unión. Se usa principalmente donde se requiere un sellado para evitar fugas de gases o líquidos.
- Métodos de soldadura térmica, que no requiere de agentes químicos pero si requiere equipo especializado. Ejemplos de este método son la soldadura por ultrasonido y soldadura por placas calientes, entre otros. La desventaja de este método es que los materiales a unir deben ser compatibles y tener temperaturas de fusión similares.
- Ensamble con sujetadores mecánicos como tornillos, grapas, remaches, etc. con diseños especiales para plástico.

### 4.6.1. MONTAJE DEL COPETE EN LA CUBIERTA

Inicialmente se planteó la idea de diseñar el copete de tal forma que no necesitara ningún tornillo para ensamblarse a la cubierta. Por ello se le diseñaron dos snaps suficientemente grandes en la parte posterior para mantenerlo sujeto a la cubierta y tres lengüetas frontales como puede verse en la figura 4.4.

Por razones de seguridad no se pudo mantener este concepto y se decidió realizar el ensamble usando dos tornillos, por lo que al concepto original se le agregaron dos orejas en la parte posterior para este fin (figura 4.5). Con esto se cumplió el requerimiento de seguridad que pide usar herramienta para realizar el desensamble de componentes que en su interior incluyen partes que representan riesgos de choque eléctrico.

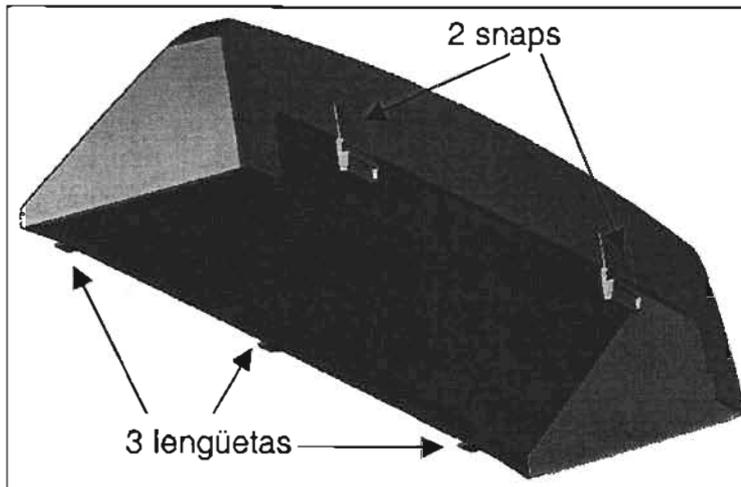


Figura 4.4.- Concepto original para montaje del copete en la cubierta

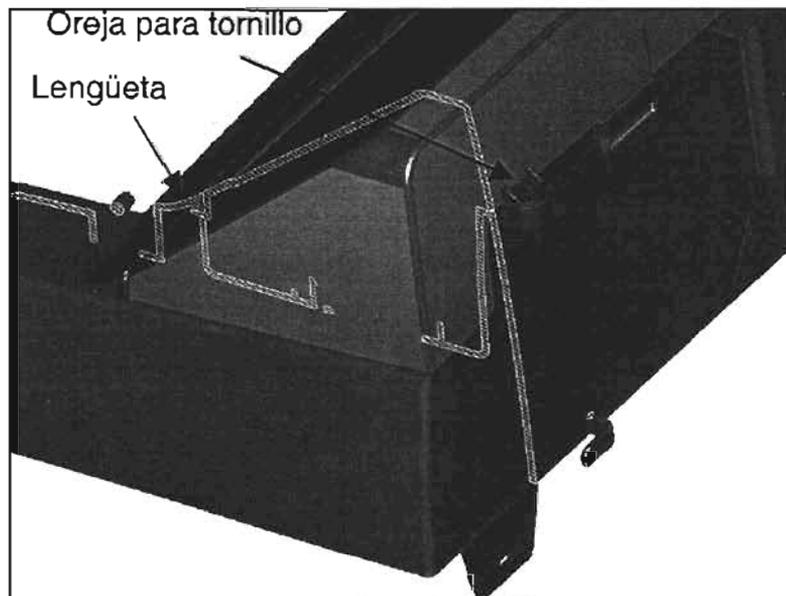


Figura 4.5.- Concepto final de montaje del copete en la cubierta

#### 4.6.2. MONTAJE DE LA TARJETA EN EL COPETE

Teniendo el panorama general de los diferentes tipos de uniones o ensambles de componentes que existen, se decide utilizar los *snap fits* para el montaje de la tarjeta en el copete, que además son los más adecuados para altos volúmenes de producción y con los que se logran ensambles económicos y rápidos.

Así, el concepto que se planea utilizar en el diseño del copete digital para el montaje de la tarjeta control es mediante el uso de *snaps* y soportes rígidos (*snaps* rígidos), como se muestra en la figura 4.6. La intención de diseño al manejar este concepto es descartar el uso de tornillos en el ensamble de la tarjeta así como de la botonera. El beneficio de este concepto de ensamble sería tiempo de ensamble y costo por material (ahorro de 5 tornillos y de una botonera por cada tarjeta)

---

Este es un concepto de ensamble aún no usado para montajes de tarjeta en esta empresa, al menos dentro de los diseños liberados hasta la fecha, por lo que habrá de evaluarse y pasar satisfactoriamente, pruebas como la de transporte, caída libre, pruebas de vida, etc.

En el diseño de esta parte también deberá considerarse la eventualidad de un resultado negativo en la evaluación por lo que debe tener la versatilidad suficiente para que pueda hacerse uso de tornillos para el ensamble de la tarjeta si es que se diera tal resultado.

En la figura 4.6, puede verse que en total se pretende sujetar la tarjeta con 5 soportes rígidos y 10 snaps flexibles. Estos también serán restrictotes al movimiento de la tarjeta en todas las direcciones (por convención, se ha definido la cara plana de la tarjeta como la dirección x-y). Además se ven los 3 bosses (posicionadores) que eventualmente servirían para los tornillos en caso de ser requeridos.

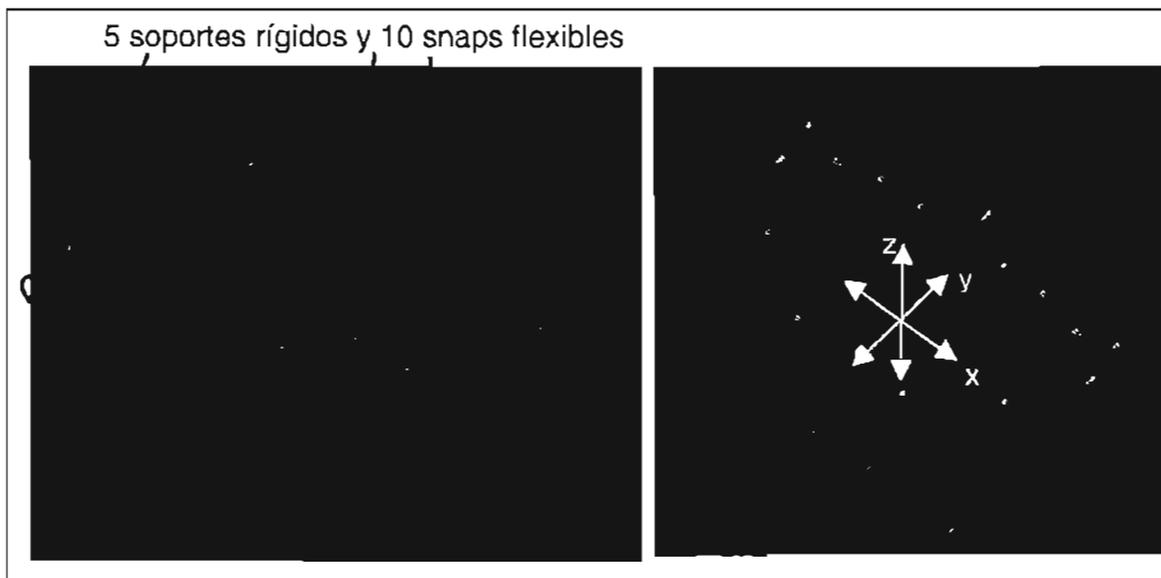


Figura 4.6. Diseño conceptual para el montaje de la tarjeta control en el copete digital.

### 4.6.3 BOTONERA INTEGRADA EN EL COPETE

Para eliminar la botonera que maneja los modelos actuales, es necesario que ésta venga incluida en el mismo copete, es decir, que el copete y la botonera sean una sola parte.

La configuración actual de los botones tiene muy buen desempeño mecánico ya que el porcentaje de deformación y los niveles de esfuerzo que se le induce al momento de realizar la activación de los microswitches son muy bajos, por lo que no tienen problemas de fractura por fatiga. Sin embargo, esta configuración está patentada en algunos países donde se comercializará el producto que se desarrolla en este proyecto. Por lo tanto es necesario desarrollar una nueva

---

geometría en los botones que cumpla con la función pero sin infringir ninguna patente.

En la figura 4.7 se muestra la configuración actual de los botones así como las posibles opciones de geometría que se pueden usar los botones del copete digital de este proyecto.

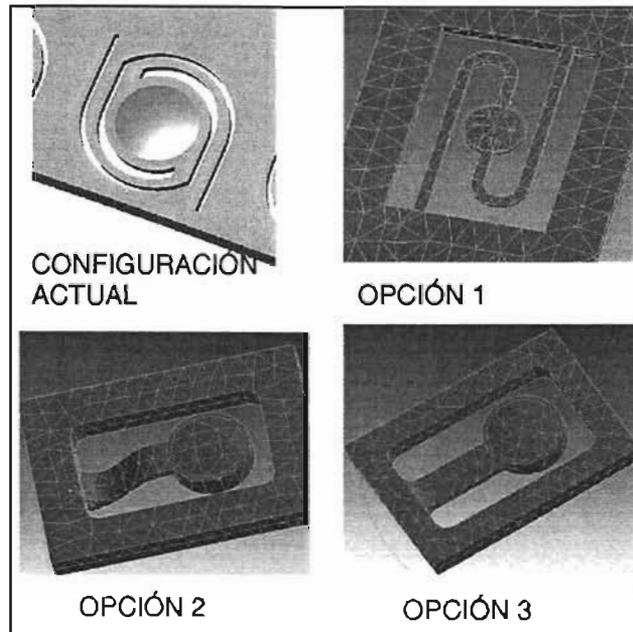


Figura 4.7. Opciones de geometría para botones del copete digital

Las tres opciones de geometrías que se evaluaron mediante análisis de elemento finito. De ellas, la que presentó mejor desempeño pero sin llegar a superar a la actual fue la opción 1. La opción 2 fue la que presentó los resultados más pobres en cuanto a desempeño mecánico, mientras que con la opción 3 se obtuvieron resultados intermedios entre la 1 y la 2.

Aunque del análisis realizado se esperaría que la geometría escogida para los botones del copete fuera la opción 1, no se optó por ésta debido a la limitación de espacio entre botones definido por el área de Diseño Industrial. Sin embargo la opción 3, también cumple con los requerimientos de desempeño mecánico como se verá en la fase de *Diseño* y posteriormente en la de *Optimización*. Por lo tanto se decide utilizar esta geometría para el diseño del copete digital que nos ocupa en este proyecto.

#### 4.6.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Existen tres posibles materiales a emplearse: ASA (Acrilonitrilo-Stireno-Acrilato), ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Stireno) y PP (Polipropileno).

El ABS es un copolímero que tiene alto brillo, buenas propiedades mecánicas, es fácil de moldear y es dimensionalmente estable. Se degrada con agentes químicos

---

agresivos como la gasolina, aguarrás, etc., pero en contraparte tiene buena resistencia química a los limpiadores domésticos. Para aplicaciones en componentes que se usan a la intemperie, se recomienda usar un ABS grado UV para prevenir el amarillamiento de las partes blancas.

El ASA tiene propiedades mecánicas y de apariencia similares al del ABS, pero es mejor en cuanto a la resistencia química. El costo es lo que lo pone en desventaja frente al ABS. El factor de contracción de ambos es prácticamente el mismo, por lo que un molde diseñado para una parte en ABS, eventualmente podría utilizarse para inyectar ASA o viceversa.

El polipropileno por su parte, es el más barato de las tres opciones. Tiene propiedades mecánicas moderadas, excelente resistencia al impacto y al ataque químico, y su brillo es bueno. Es fácil de moldear pero a menudo tiene problemas de estabilidad dimensional (problemas de alabeo). A bajas temperaturas tiene muy buenas propiedades pero a altas temperaturas éstas disminuyen considerablemente.

Con base en lo anterior y considerando que el producto va dirigido a un segmento medio-alto del mercado se decide emplear un ABS grado UV, ya que en nuestro país la mayoría de los usuarios de lavadoras mantienen el producto a la intemperie y aunque no es el más económico ofrece ventajas de desempeño mecánico considerables respecto al PP.

#### **4.7. VARIABLES DE SALIDA “Y’s”**

Como se ha descrito previamente, la respuesta de *ensamblabilidad* de tarjeta y *funcionalidad* de botones, estará en función del comportamiento de los gaps críticos en las direcciones x,y,z, que intervienen en el ensamble de la tarjeta y overlay contra el copete.

Como se verá a continuación, se han identificado 10 gaps críticos, 3 en la dirección “z”, 3 en la dirección “y” y 4 en la dirección “x”. Si logramos controlar estos 10 gaps simultáneamente, estaremos asegurando el ensamble y funcionamiento adecuado de los controles en los copetes digitales, y con ello, la satisfacción de nuestros clientes respecto a la interfase (*funcionalidad*) con el producto estará garantizado.

Cada uno de estos 10 gaps se ha identificado como una variable de respuesta, por lo que a su vez dependerán de diferentes X’s vitales que también serán identificadas y definidas en esta parte del proyecto. Cada gap que se ha identificado aquí se definirá con su respectiva función de transferencia en la fase de diseño.

#### 4.7.1. GAPS CRITICOS EN LA DIRECCION "z"

Primeramente analizaremos los 3 gaps en la **dirección "z"**, que son los más importantes para la *funcionalidad* y posteriormente veremos los gaps en dirección x-y, que están más relacionados al aspecto de *ensamblabilidad* de la tarjeta.

- GAP G1:

Como puede verse en la figura 4.8, este es un gap normal a la superficie de la tarjeta entre ésta y los soportes de tarjeta control en el copete (incluyendo *bosses*) para permitir el ensamble de los snaps del copete en los suajes de la tarjeta. Este gap debe ser lo suficientemente grande para que permita el ensamble de los snaps pero también lo suficientemente pequeño para evitar que los microswitches queden muy alejados de los botones, tanto que estos no lleguen a activarlos, y de que se tenga una tarjeta floja.

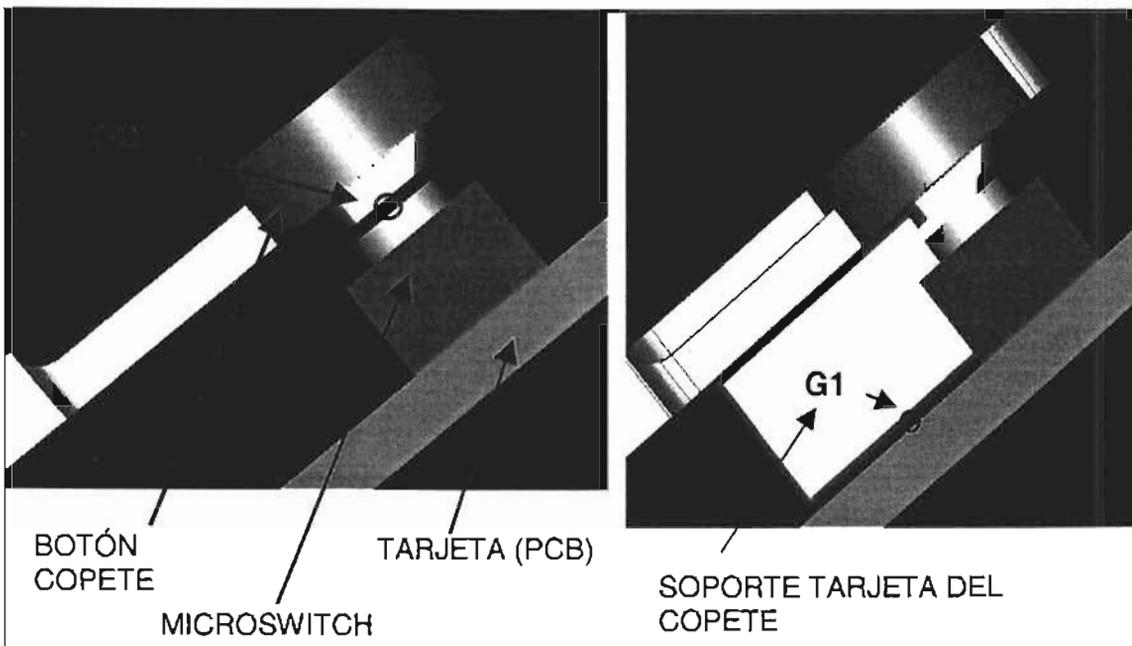


Figura 4.8. Gap G1 y G2 en dirección "z"

- GAP G2:

Es el gap que se necesita entre los botones del copete y los microswitches de la tarjeta, como se muestra en la figura 4.8. Este es uno de los gaps más importantes a cuidar, y dependerá del gap anterior. A la vez, la función de este gap junto con el siguiente (G3) es garantizar la funcionalidad del sistema *overlay*-botones-tarjeta. Cuidando, obviamente, los aspectos de propiedad de los materiales, como la flexibilidad de los botones del copete y del domo del *overlay*, la cual dependerá del material y la geometría que estos tengan.

- GAP G3:

Al igual que los anteriores, este es un gap en la dirección "z", normal a la superficie de la tarjeta entre el domo del botón en el copete y el domo de la burbuja del *overlay*, como se ilustra en la figura 4.9. Con este gap, se busca

---

aprovechar al máximo la carrera de la burbuja del overlay sin llegar a generar interferencias críticas entre botones del copete que no se utilicen por la configuración de los controles y zonas del overlay sin burbujas que ocasionen marcas en el overlay inaceptables visualmente.

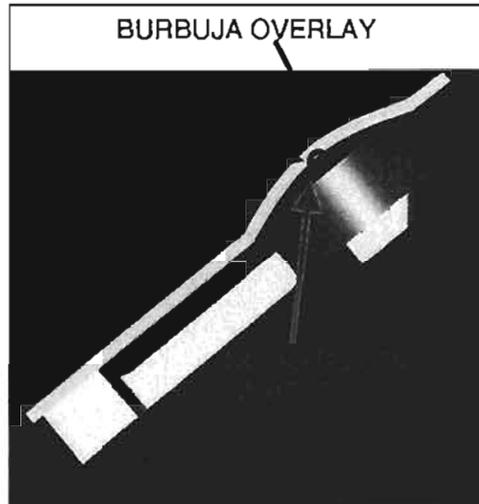


Figura 4.9. Gap G3 entre botón copete y burbuja overlay

#### 4.7.2. GAPS CRÍTICOS EN LA DIRECCIÓN "x-y"

Pasamos ahora a los gaps en la dirección x-y que se han definido como críticos para la **ensamblabilidad** de la tarjeta.

Analizamos primeramente los gaps a controlar para poder restringir el desplazamiento en la **dirección "y"**. Vemos que esto puede alcanzarse entre dos snaps y dos topes, sin embargo, cuidaremos los gaps en todos los snaps en esta dirección no para restringir el desplazamiento sino para garantizar el mayor agarre en la cabeza de los snaps sobre la tarjeta y con ello un mejor soporte para la misma.

Como traemos dos filas de snaps flexibles (superior y central), y una fila inferior de soportes rígidos, el análisis de tolerancias se hará entre un snap flexible, un soporte rígido y un tope, con lo que tendremos 3 gaps en esta dirección, a decir, G4, G5, y G6, tal como se indica en la figura 4.10.

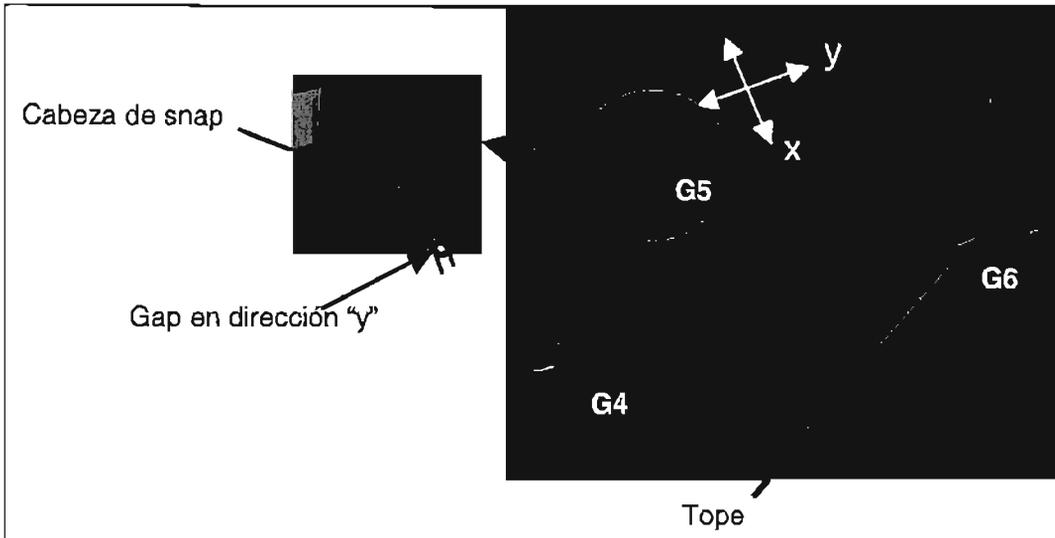


Figura 4.10. Gaps G4, G5 y G6 en el ensamblaje tarjeta en dirección "y".

Para restringir el desplazamiento de la tarjeta en la **dirección "x"**, cuidaremos los gaps en dicha dirección simplemente en dos snaps de la fila superior y en dos soportes rígidos de la fila inferior como se ilustra en la figura 4.11. Mientras que el resto de los gaps en la misma dirección asociados a todos los snaps, soportes rígidos y topes, podrán quedar holgados. Los gaps a cuidar deben garantizar el ensamblaje y ajuste de la tarjeta.

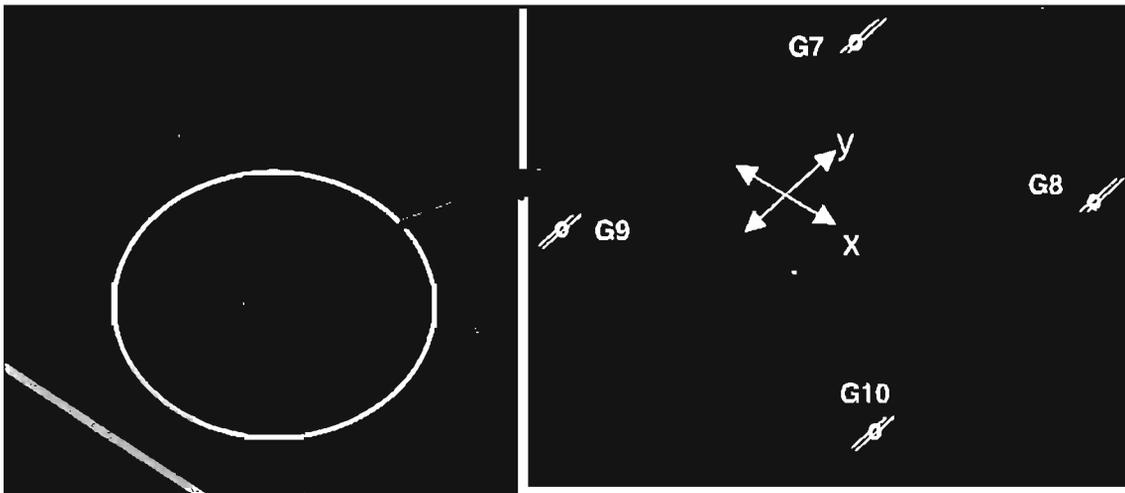


Figura 4.11. Gaps G7, G8, G9 y G10 en la dirección "x"

Estos 10 gaps que se han definido serán nuestras Y's que nos ayudarán a alcanzar las grandes Y's para el cliente final, que son *ensamblabilidad* y *funcionalidad* de este subsistema.

---

## 4.8 VARIABLES VITALES DE ENTRADA X's

Cada uno de los gaps identificados previamente, dependen de otros factores, que en este caso son dimensiones lineales con las que se obtendrán las funciones de transferencia en la etapa de diseño. Al igual que en la definición de las variables de respuesta (Gaps), las X's vitales las definiremos por cada dirección, y más adelante, en la fase de diseño se relacionarán éstas con su respectivo gap mediante las funciones de transferencia.

Como son muchas las variables de respuesta, definiremos cada X con un número consecutivo, para no crear confusiones. En esta etapa sólo se describen dichas X's, pero en la fase de diseño se ilustrarán gráficamente para una mejor definición de las mismas.

Las X's vitales que se han identificado para los gaps en la dirección "z" son:

- X1: Espesor de la tarjeta, incluyendo una capa de conformal coating en ambas caras de la misma (figura 5.2)
- X2: distancia de la cabeza de snaps a los soportes tarjeta en el copete ( figura 5.2)
- X3: distancia de los soportes tarjeta a la cara del botón en el copete (figura 5.2)
- X4: altura del microswitch medido a partir del conformal coating de la tarjeta (figura 5.2)
- X5: altura de la burbuja en el overlay (figura 5.3)
- X6: altura del domo del botón en el copete (figura 5.3)

Las X's vitales para los gaps en la dirección "y" (figura 5.4) son:

- X7: distancia del centro del boss inferior a la pared del soporte rígido en el copete
- X8: distancia del centro del barreno a la pared del corte para soporte rígido en la tarjeta
- X9: distancia de la pared del soporte rígido a la pared del snap flexible en el copete
- X10: distancia de la pared del corte para soporte rígido a la pared del corte para snap flexible en la tarjeta
- X11: distancia de la pared del soporte rígido a la pared del tope en el copete
- X12: distancia de la pared del corte para soporte rígido a la pared del corte para el tope en la tarjeta

Las X's vitales para los gaps en la dirección "x" (figura 5.5) son:

- X13: distancia del centro del barreno a la pared del corte para snap superior izquierdo en la tarjeta
- X14: distancia del centro del boss a la pared del snap superior izquierdo en el copete
- X15: distancia de la pared del snap superior izquierdo a la pared del snap superior derecho en el copete

- 
- X16: distancia de la pared del corte para snap superior izquierdo a la pared del corte para snap superior derecho en la tarjeta
  - X17: distancia del centro del barreno a la pared del corte para soporte inferior izquierdo en la tarjeta
  - X18: distancia del centro del boss a la pared del soporte inferior izquierdo en el copete
  - X19: distancia de la pared del soporte inferior izquierdo a la pared del soporte inferior derecho en el copete
  - X20: distancia de la pared del corte para soporte inferior izquierdo a la pared del corte para soporte inferior derecho en la tarjeta

## 4.9 GAGE R&R

La metodología 6 Sigma está fundada en la idea de tomar decisiones basadas en datos. Los datos que alimentan esta decisión hacen que el proceso sea confiable. Las decisiones basadas en datos **no confiables** no son diferentes a las decisiones tomadas sin tener datos.

Como se vio en la parte introductoria de este proyecto, una de las actividades que debe realizarse en la etapa de Identificación de la metodología IDOV del DFSS es analizar la capacidad del sistema de medición, con el cual se verificará que las X's vitales cumplan con las especificaciones necesarias para cumplir con los requerimientos técnicos (gaps críticos). Dicho análisis se lleva a cabo mediante un estudio de Gage R&R

Un gage (equipo de medición) es cualquier instrumento usado para medir. El Gage R&R es un método usado para analizar un sistema de medición determinando la cantidad y tipo de variación (error) obtenido cuando se mide algo.

Un Gage R&R es importante porque proporcionará información acerca de los datos:

- El error de medición es **suficientemente pequeño y aceptable** relativo a la variación del proceso o especificación del producto
- Donde se **deberán enfocar** los esfuerzos de mejora si el sistema de medición es inaceptable
- Confianza en la "veracidad" de los datos
- Adecuada resolución del dispositivo de medición

Una medición es una comparación entre una cantidad desconocida y una cantidad conocida. Los datos de la medición se usan para tomar decisiones acerca de la aceptación de productos o los procesos de control, **tales datos deben tener:**

- **Exactitud**, diferencia entre el promedio observado de las mediciones y el promedio real.
- **Repetibilidad**, variación de la medición cuando una persona usa el mismo instrumento para medir la misma parte.

- 
- **Reproducibilidad**, variación en el promedio de las mediciones obtenidas cuando dos o más personas usan el mismo instrumento para medir las mismas partes.

El instrumento de medición por su parte deberá tener una resolución menor o igual al 10% de la especificación o variación del proceso. La *Resolución* es definida como la cantidad más pequeña que el instrumento de medición es capaz de leer.

Un Sistema de Medición es todo lo asociado con la toma de medidas: la gente, la herramienta de medición, el material, el método y el ambiente. El "Sistema de Medición" es un sub-proceso que puede agregar variación a los datos de medición. El objetivo es usar un proceso de medición que arroje al sistema la menor cantidad de error de medición.

La variación observada de cualquier grupo de datos es la suma de la variación real de las partes más la variación del sistema de medición y se expresa como [6]

$$\sigma^2_{Total} = \sigma^2_{parte-parte} + \sigma^2_{R\&R}$$

#### 4.9.1 PLAN DE ESTUDIO DEL GAGE R&R

En general, todo estudio de gage R&R dentro de esta empresa deberá seguir los siguientes pasos:

1. Identificar el tipo de datos, es decir, si son datos *continuos* o datos *discretos* binarios (pasa – no pasa) o por categorías.
2. Identificar las fuentes de variación.
3. Selección de Muestras. Si se tenemos datos continuos, como es nuestro caso, seleccionar muestras que cubran el rango completo de observaciones esperadas. En general la variación de la muestra deberá ser representativa de la variación real del proceso, por lo que se debe tener muestras fuera de especificación tanto a la máxima como a la mínima.
4. Recolección de datos. El orden de la medición deberá ser aleatorio en cada repetición. El *procedimiento* usado será el que típicamente se emplea. El instrumento de medición debe estar calibrado y tener la resolución adecuada. El número de operadores será de al menos dos. Se medirán 10 unidades y cada unidad será medida 2 o 3 veces por cada operador.
5. Análisis de los Datos. El método de análisis depende del tipo de datos. Para datos continuos se tienen dos opciones: método corto o ANOVA (Gage R&R con Minitab®)

---

## 4.9.2. ANÁLISIS DE DATOS

Los métodos que se describen a continuación sólo aplican para datos continuos (que es nuestro caso) y de ellos describimos con más detalle el ANOVA que fue el que se empleó en este proyecto.

### Método Corto:

- Proporciona un rápido estimado de la variación de la medición o  $\sigma_{\text{gage}}$
- Solo requiere de 5 piezas y 2 operadores
- Los cálculos son rápidos y a mano
- La contribución de Repetibilidad y Reproducibilidad no pueden separarse

### ANOVA:

- Da un mucho mejor estimado de  $\sigma_{\text{gage}}$
- Los errores producidos por Repetibilidad y Reproducibilidad se determinan por separado
- Requiere más recolección de datos

El ANOVA es un análisis estadístico de varianzas. El software que se utiliza para dicho análisis es el Minitab®. En la figura 4.12, se ilustra una salida de Minitab® donde se encuentran los resultados para  $\sigma_{\text{gage}}$ ,  $\sigma_{\text{repetibilidad}}$  y  $\sigma_{\text{reproducibilidad}}$ .

$\sigma_{\text{gage}}$  es calculado de los términos de la varianza de repetibilidad y reproducibilidad usando la siguiente relación.

$$\sigma_{\text{gage}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2$$

### % TOLERANCIA (%GR&R)

Se usa para comparar la variación de la medición con respecto a los límites de especificación. Es una medida de que tan bien el sistema puede determinar si un producto está fuera o dentro de especificación. Se calcula mediante la relación:

$$\%GR \& R = \frac{5.15\sigma_{\text{gage}}}{LSE - LIE} \times 100$$

donde

$\sigma_{\text{gage}}$  = Variación de la medición

LSE = Límite superior de especificación

LIE = Límite inferior de especificación

---

## % ESTUDIO DE VARIACIÓN

Se usa para comparar la variación de la medición y la variación del proceso. Es una medición de que tan bueno es el sistema de medición para usarse en el control de proceso. Se calcula mediante la relación

$$\% \text{Estudio de variación} = \frac{\sigma_{\text{gage}}}{\sigma_{\text{variación Total}}} \times 100$$

## NÚMERO DE CATEGORÍAS DISTINTIVAS

El **Número de Categorías Distintivas** representa el número de intervalos de confianza que no se traslapan y que abarcarán el rango de la variación del producto. Se considera también como el número de grupos dentro de sus datos de proceso que puede discernir el sistema de medición. Se calcula mediante la relación

$$\text{Categorías distintivas} = \frac{\sigma_{\text{parte a-parte}}}{\sigma_{\text{gage}}} \times 1.41$$

## Criterio de Evaluación del % del Gage R&R y % de Estudio de Variación

En los estudios de Gage R&R dentro de esta empresa los criterios son:

- Aceptable si es menor de 20%
- Condicional si está entre 20% to 30%
- Inaceptable si es mayor de 30%

## Criterio de Evaluación del número de categorías distintivas

Los lineamientos que se tienen en este caso son:

CATEGORIAS DISTINTIVAS	DECISIÓN / VALOR
<2	<u>NO VALIDO</u> para tomar decisiones del control de proceso
2-3	Decisiones Binarias ("Pasa/No Pasa")
≥ 5	Resolución Suficiente Aceptable para tomar decisiones del control de proceso

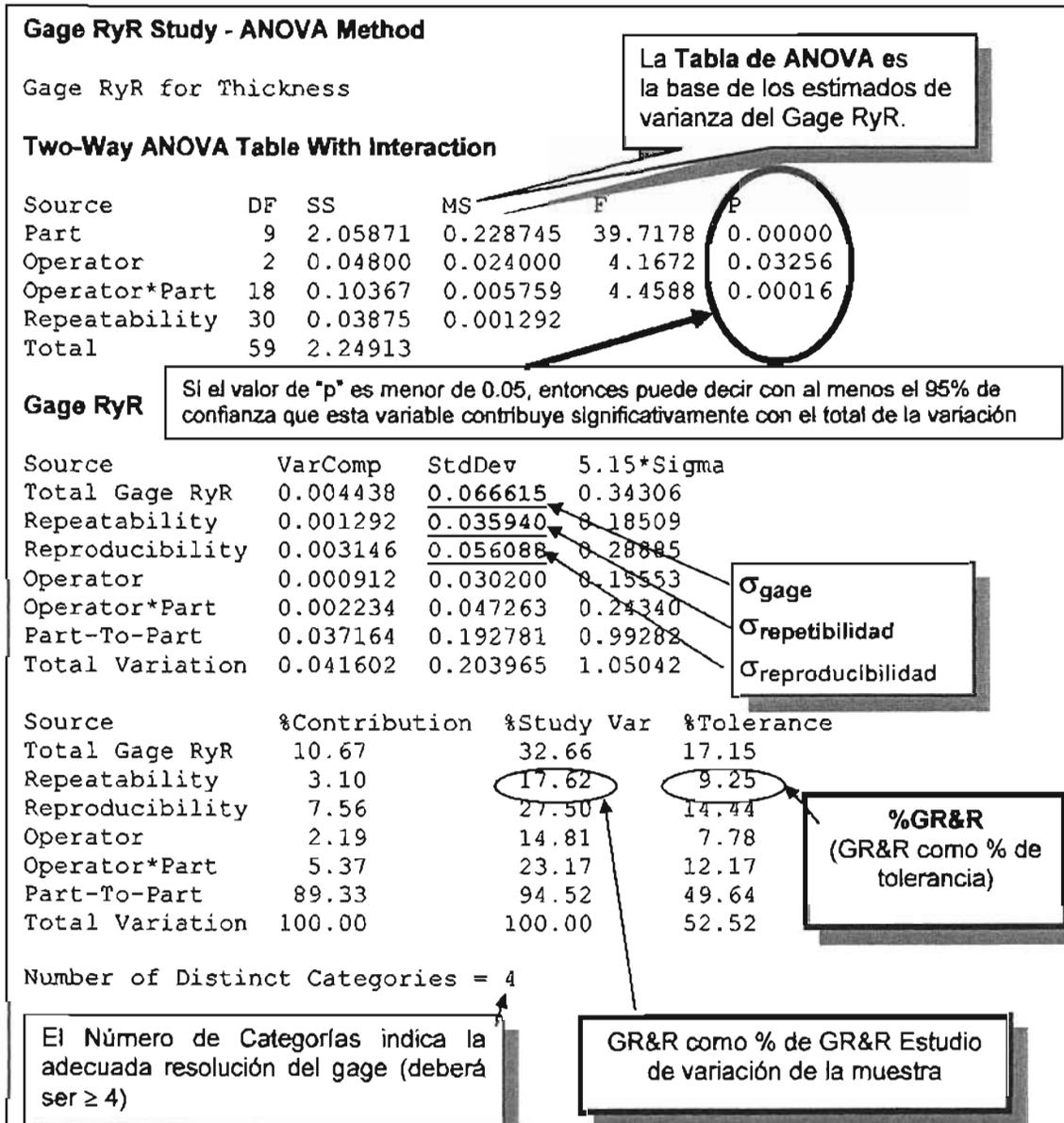


Figura 4.12 - Ejemplo de la salida de Minitab en un análisis de ANOVA para un estudio de gage R&R.

Durante el desarrollo de los proyectos Seis Sigma de esta empresa, uno de los pasos es la validación del gage o instrumento con el que se medirán las variable de entrada o de salida; sin embargo cuando dichas mediciones se harán con un instrumento que ya ha sido validado, no es necesario repetir el estudio para cada proyecto siempre y cuando se esté midiendo lo mismo, con los mismos operadores y con el mismo método.

En este caso lo que se mide son *distancias*, el equipo utilizado es una máquina de coordenadas, la cual ya ha pasado un estudio de gage R&R con las siguientes características:

---

---

Se utilizaron 10 piezas (partes plásticas), 2 operadores y 2 repeticiones por cada medición en cada operador.

El método empleado en la realización del estudio R&R fue:

- Paso 1: Identificar en la parte (en nuestro caso copete) la distancia a dimensionar
- Paso 2: Elaborar un programa para tomar mediciones en la máquina de coordenadas.
- Paso 3: Colocar la parte a medir (copete o tarjeta), en la plancha de la maquina de coordenadas
- Paso 4: Alinear la parte y sujetarla con reglas para mantenerlos fijos
- Paso 5: Tomar las mediciones

Los resultados obtenidos, como puede verse en la tabla 4.2 de la salida de Minitab® fueron:

- % Tolerancia 2.25%, lo que nos dice que el sistema es adecuado para aceptar o rechazar piezas
- % estudio de variación fue de 3.48% lo que indica que el sistema es además adecuado para el control de proceso.
- El número de categorías distintivas fue 41, lo cual es demuestra que la resolución del equipo de medición es más que suficiente.

### Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
PIEZA	9	1.28314	0.142571	2851.42	0.00000
OPERADOR	1	0.00000	0.000000	0.00	1.00000
OPERADOR*PIEZA	9	0.00045	0.000050	1.25	0.32149
Repeatability	20	0.00080	0.000040		
Total	39	1.28439			

### Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
PIEZA	9	1.28314	0.142571	3307.65	0.000
OPERADOR	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
Repeatability	29	0.00125	0.000043		
Total	39	1.28439			

### Gage R&R

Source	VarComp	StdDev	5.15*Sigma
Total Gage R&R	0.000043	0.006565	0.033811
Repeatability	0.000043	0.006565	0.033811
Reproducibility	0.000000	0.000000	0.000000
OPERADOR	0.000000	0.000000	0.000000
Part-To-Part	0.035632	0.188764	0.972137
Total Variation	0.035675	0.188879	0.972725

Source	%Contribution	%Study Var	%Tolerance
Total Gage R&R	0.12	3.48	2.25
Repeatability	0.12	3.48	2.25
Reproducibility	0.00	0.00	0.00
OPERADOR	0.00	0.00	0.00
Part-To-Part	99.88	99.94	64.81
Total Variation	100.00	100.00	64.85

Number of Distinct Categories = 41

TABLA 4.2. Resultados de Minitab® del estudio de gage R&R de la máquina de coordenadas.

Con lo anterior queda cubierto el paso de la validación del gage o instrumento de medición que se empleará para la verificación de las variables de entrada y de salida en el último paso de la metodología IDOV.

---

# 5. DISEÑO

---

---

## 5.1. OBJETIVO

El propósito de este capítulo es proporcionar las herramientas y técnicas necesarias para entender el proceso y requerimientos para la generación de un diseño de componente, en este caso del copete digital, tomando en consideración el flujo descendente de requerimientos (CTQ's) y el flujo ascendente de capacidad de proceso.

Además usaremos otras herramientas como análisis de resistencia de materiales (% de deformación) para validar el diseño de algunas características del copete como son los botones en forma de trampolín y los snaps para asegurar su funcionalidad.

Luego, en la fase de Optimización, haremos uso de un software CAE para simular el flujo del plástico en el molde del copete, analizando factibilidad de llenado, marcas de unión, y predicciones de calidad en la pieza inyectada, entre otros.

## 5.2. DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONALES (DBF)

Para poder diseñar un componente que es parte de un sistema, primeramente debemos entender cuál es la función que debe desempeñar dentro de dicho sistema y como interactúa con las otras partes que integran el ensamble.

En el diagrama de bloques funcionales que se muestra en la figura 5.1, vemos que el copete ensambla directamente con la cubierta y ésta a su vez al gabinete. Una de las funciones del copete es soportar a los controles de tal manera que estos queden bien ensamblados y sean funcionales. El copete es la parte del subsistema que sirve de interfase con el usuario, ya que en él se encuentran los botones de mando de los modelos digitales, que es el que nos ocupa en este proyecto.

Para lograr que el copete realice esas funciones se establece la relación entre las X's y la Y's identificadas. Estas relaciones las llamamos funciones de transferencia, las cuales se obtienen mediante el uso de los diagramas de vectores (vector loop). Luego se validan estas funciones con auxilio de ensambles virtuales realizados en un software de CAD, y posteriormente con el ensamble físico de las primeras piezas de herramental en la etapa de Confirmación de Diseño, del proceso NPI (*New Product Introduction*) de G.E.

DBF

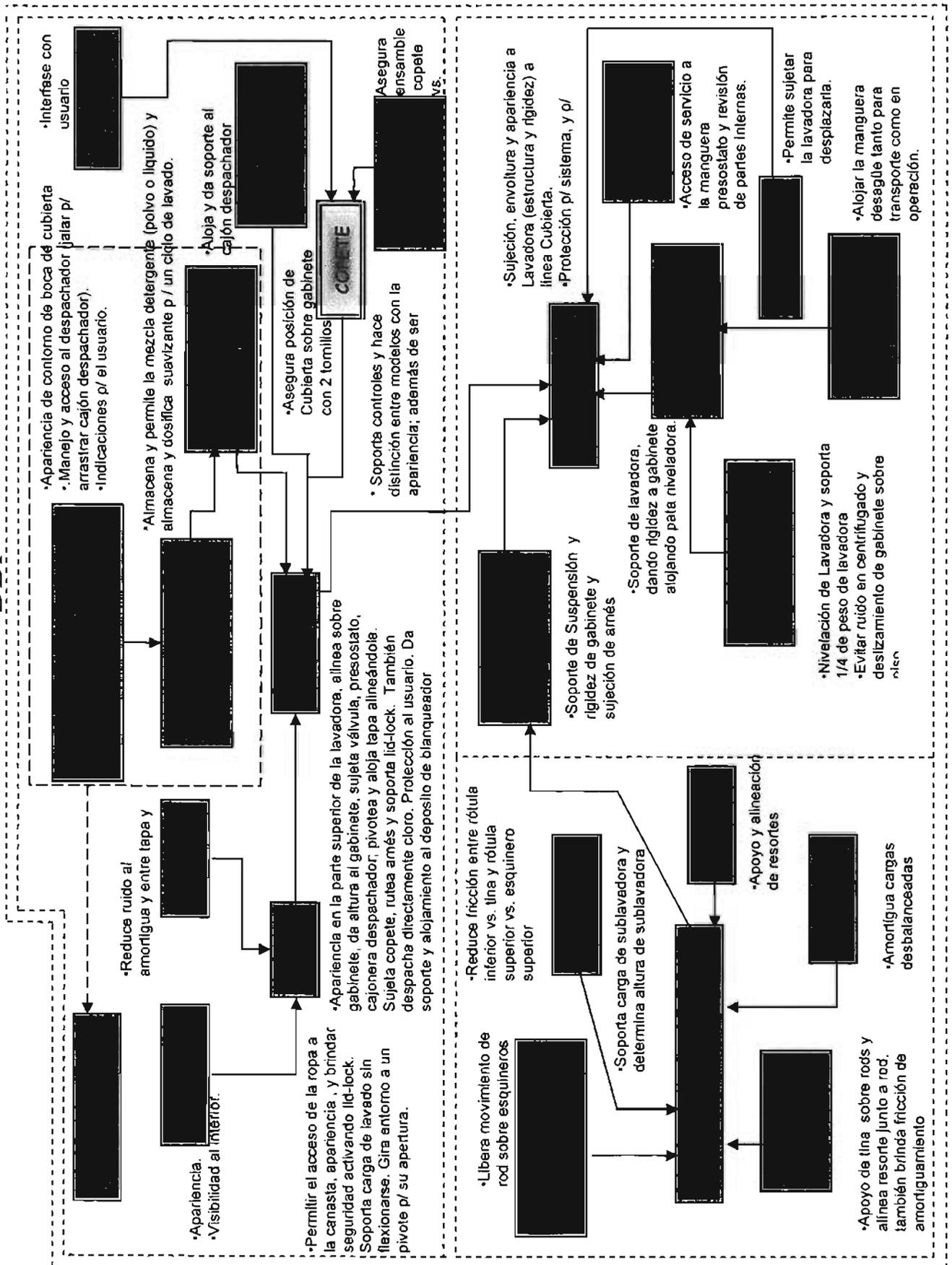


Figura 5.1. Diagrama de bloques funcionales del sistema completo de una lavadora automática.

---

### 5.3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Las funciones de transferencia son las que nos relacionan los atributos de los subsistemas a las propiedades de los sistemas, del mismo modo que lo hacen de los componentes a los subsistemas. Estas funciones nos ayudarán a definir las Y's en términos de las X's de una forma analítica.

Existen muchos tipos de funciones de transferencia como dimensionales (que son las que utilizaremos en este proyecto), de relaciones, físicas, las derivadas de experimentos y las que son proporcionadas por softwares especializados como ANSYS® (utilizado para hacer análisis de esfuerzos mediante el método del elemento finito), CE-TOL® (utilizado para hacer análisis de tolerancias tridimensionales), PRO/Engineer® (empleado para modelar paramétricamente el componente), etc.

De cualquier forma, veremos que:

*Funcionalidad y ensamblabilidad* =  $f(G_1, G_2, \dots, G_{10})$  y que  $G_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$

Así pues, se analizan las funciones de transferencia para cada variable de respuesta, es decir, para cada uno de los 10 gaps en las tres diferentes direcciones, que ya han sido descritos previamente en la fase de identificación.

Primeramente se definen las funciones de transferencia para los gaps en la dirección "z", quienes son los responsables de garantizar la *funcionalidad* del sistema overlay-botón-microswitch, es decir, garantizar la activación de los microswitches cuando el usuario oprima los botones del panel de control.

Luego se definen las funciones de transferencia para los gaps en el plano x-y, los que nos ayudan a alcanzar un adecuado ensamble que evite el problema de tarjeta floja o caída, buscando con esto la seguridad del componente en los casos donde se presente mucha vibración, como puede ser en transporte o en los ciclos de lavado o centrifugado del equipo.

Como puede verse en la figura 5.2, la función de transferencia para el gap G1 es:

$$G_1 = X_2 - X_1 \quad \dots(1)$$

Mientras que para el gap G2, la función de transferencia es:  $G_2 = X_3 + G_1 - X_4$ ; sustituyendo el valor de G1 se tiene que

$$G_2 = X_3 + X_2 - X_1 - X_4 \quad \dots(2)$$

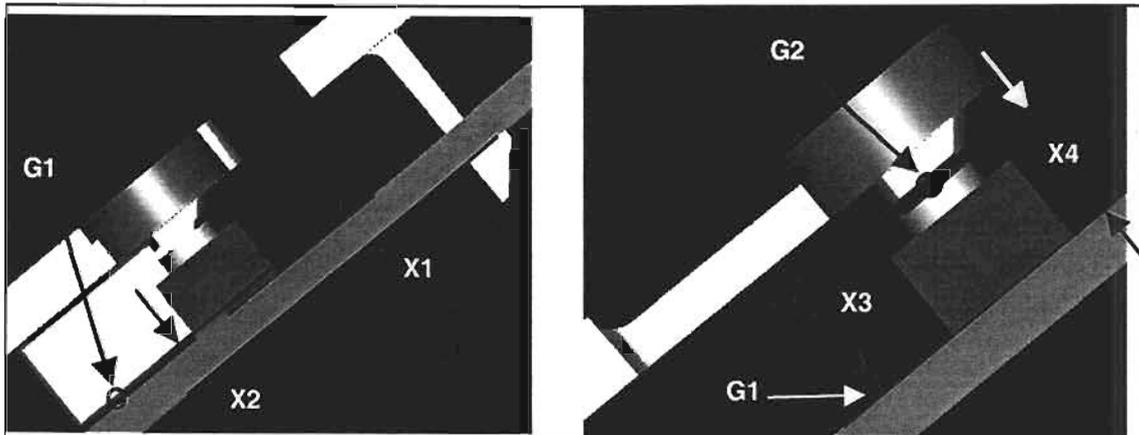


Figura 5.2. Diagrama de vectores de las funciones de transferencia para G1 y G2

Para el caso del último gap en dirección "z", la función de transferencia queda definida como:

$$G3=X5-X6 \quad \dots(3)$$

donde X5 es la altura del domo del overlay y X6 es la altura del domo de los botones del copete, medida desde la parte plana del botón hasta la parte mas alta del mismo, como se muestra en la figura 5.3.

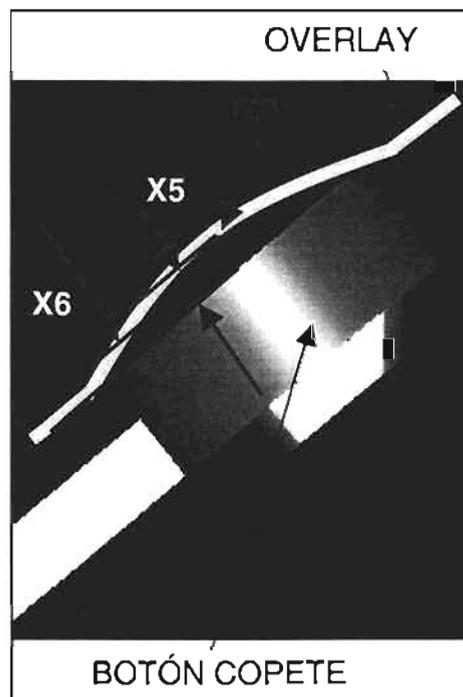


Figura 5.3. Diagrama de vectores para la función de transferencia de G3.

Pasando ahora a los gaps en la dirección “y”, los que nos ayudan a alcanzar la *ensamblabilidad* de la tarjeta control, y con la ayuda de la figura 5.4, podemos ver que:

$$G4 = X7 - X8 \quad \dots(4)$$

Además vemos que  $G5 = X10 + G4 - X9$ , o bien

$$G5 = X10 - X9 + X7 - X8 \quad \dots(5)$$

Mientras que para el gap G6 podemos obtener lo siguiente:

$G6 = X11 - G4 - X12$ , lo cual resulta en

$$G6 = X11 - X12 + X8 - X7 \quad \dots(6)$$

Finalmente, considerando los gaps en la dirección “x” y el diagrama de vectores de la figura 5.5, vemos que:

$$G7 = X13 - X14 \quad \dots(7)$$

Mientras que  $G8 = X16 - G7 - X15$ , o sea

$$G8 = X16 - X15 + X14 - X13 \quad \dots(8)$$

De manera análoga, es fácil ver que:

$$G9 = X17 - X18 \quad \dots(9)$$

y que

$$G10 = X20 - X19 + X18 - X17 \quad \dots(10)$$

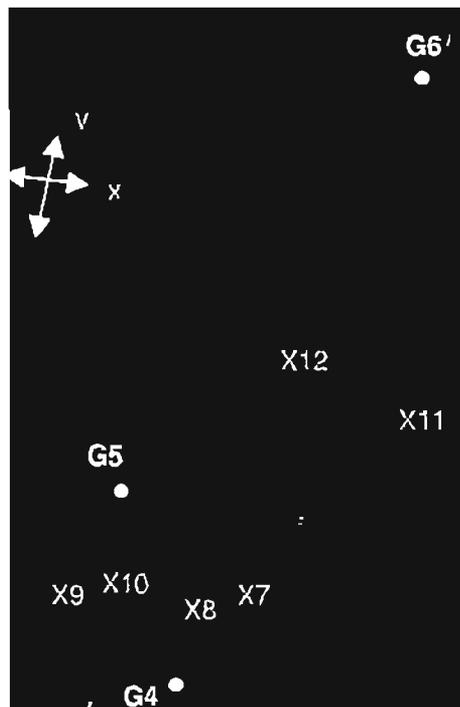


Figura 5.4. Diagrama de vectores para las funciones de transferencias de los gaps G4, G5 y G6 en la dirección “y”.

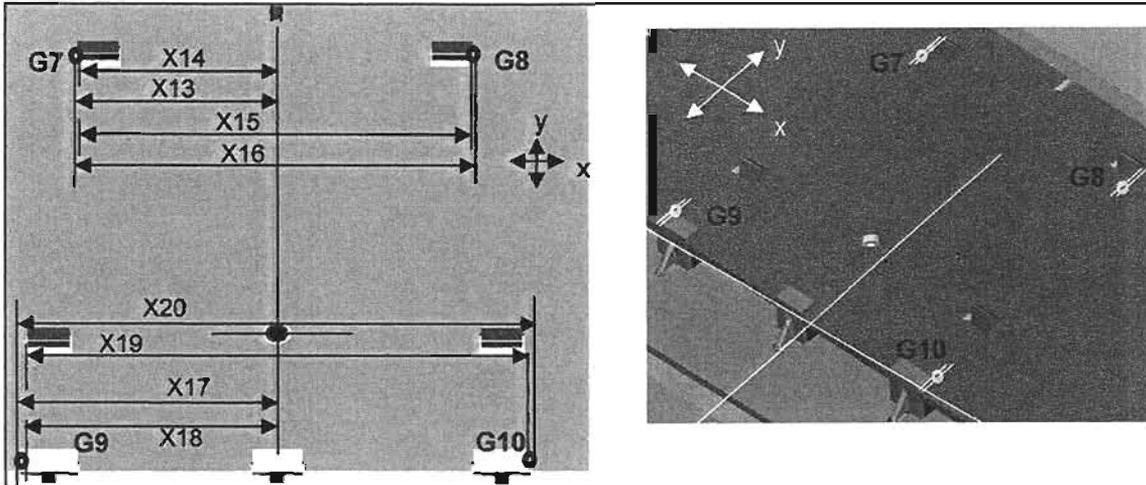


Figura 5.5. Diagrama de vectores para las funciones de transferencias de los gaps G7, G8, G9 y G10 en la dirección "x".

En la tabla 5.1 se listan las especificaciones para los gaps críticos que a criterio de los integrantes del equipo de apoyo técnico nos pueden ayudar a alcanzar las respuestas deseadas por el cliente (*ensamblabilidad y funcionalidad*)

Variable de respuesta	Especificación
Gap G1	$0.0015'' \leq G1 \leq 0.020''$
Gap G2	$0.002'' \leq G2 \leq 0.032''$
Gap G3	$-0.002'' \leq G3 \leq 0.012''$
Gap G4	$0.005'' \leq G4 \leq 0.025''$
Gap G5	$0.002'' \leq G5 \leq 0.027''$
Gap G6	$0.002'' \leq G6 \leq 0.027''$
Gap G7	$0.005'' \leq G7 \leq 0.025''$
Gap G8	$0.002'' \leq G8 \leq 0.027''$
Gap G9	$0.005'' \leq G9 \leq 0.025''$
Gap G10	$0.002'' \leq G10 \leq 0.027''$

Tabla 5.1. Especificaciones para las variables de respuesta

---

---

## 5.4. LINEAMIENTOS DE DISEÑO PARA MANUFACTURA Y ENSAMBLE

El diseño para manufactura y ensamble es un concepto que ha crecido a partir de las necesidades de la industria para competir a una escala internacional y minimizar el tiempo de desarrollo de un nuevo producto y su introducción al mercado.

Como se vio previamente, las consideraciones tomadas en la etapa de diseño de un producto pueden influir alrededor de un 70 % en el costo final del mismo, por tanto, vale la pena tomar este enfoque seriamente en consideración.

El concepto de diseño para manufactura y ensamble (DFM & DFA) enfatiza en la necesidad de considerar los procesos de manufactura y ensamble durante la etapa de diseño. Incorporar características que permitan fabricar y ensamblar el producto. Esto se puede lograr mediante el establecimiento de equipos interdisciplinarios que diseñen el producto y el proceso de manufactura simultáneamente, lo que comúnmente se denomina el enfoque de ingeniería simultánea (concurrente).

Los lineamientos para el DFM y el DFA han sido desarrollados a través de los años, con experiencia de diseño y manufactura, y Pearse & Stoll [10] recomiendan los que se muestran a continuación:

- a) Minimizar el número total de partes
  - Reducir el número total de partes que forman el producto, reduce el costo de manufactura. Se puede lograr eliminando: tornillos, instrucciones de ensamble e infamación de interfase. Normalmente contribuye a reducir peso, requerimientos de material, así como la complejidad del sistema.
- b) Usar un diseño modular
  - Productos hechos de 4 a 8 módulos con 4 a 12 partes cada uno, comúnmente pueden ser automatizados mas eficientemente. Mantener una configuración genérica del producto a través del proceso de ensamble en la medida de lo posible e instalar los módulos especializados durante etapas posteriores. En nuestro caso, el copete digital se ensambla a una cubierta que debe ser modular, es decir, que pueda ensamblarse con diferentes apariencias de copetes, tanto digitales como de perillas.
- c) Minimizar las variaciones de las partes
  - Las partes estandarizadas deberán ser usadas siempre que sea posible. Esto es especialmente verdadero en cuanto a partes tales como: tuercas, tornillos, pernos, rondanas, cuñas y sellos. El uso de partes estandarizadas elimina el diseño, fabricación e inspección de

---

partes especializadas, así como la necesidad de tener números de partes adicionales en el sistema de inventario. Estas partes son fáciles de encontrar y su confiabilidad y calidad usualmente están bien establecidas.

d) Usar un diseño multifuncional

- Diseñar componentes que desempeñen más de una función.
- Como ejemplo tenemos el copete digital, que además de ser un componente de apariencia, también debe ser el soporte de la tarjeta y del overlay, dando además estructura al producto.
- Otro ejemplo puede ser la cabeza de cilindro de un motor que puede diseñarse para fungir como un recipiente a presión, permitir instrumentación y para montar otros componentes, hacer las veces de intercambiador de calor y un miembro estructural.
- Algunas características que pueden incorporarse en el diseño para facilitar el ensamble son: guías para auto-alineamiento, dientes, pernos no simétricos y patrones de sujeciones.

e) Diseño de partes para uso múltiple

- Muchas partes que desempeñan funciones básicas, se prestan para usarse en más de una ocasión. Se puede establecer un programa de estandarización de partes e incluir nuevos diseños de partes que se prestan a estandarizarse.

f) Diseñar para simplificar la fabricación

- El diseño de partes debe usar el menor costo de material que satisfaga los requerimientos y minimice desperdicio y tiempo del proceso de producción. En la medida de lo posible, debe usarse procesos de fabricación que evitan tratamientos superficiales como el pospintado y procesos secundarios como el pulido. El diseño deberá estar basado en el uso de procesos sencillos de fabricación.

g) Uso de sujetadores ( *fasteners* )

- Todo tipo de sujeciones agregan un costo significativo al costo total de manufactura. El costo de instalación de tornillos y otros sujetadores excede significativamente el costo del sujetador como tal (Se estima un tiempo de 4 seg. por tornillo sobre la línea, esto impacta directamente en costos de mano de obra que se suman al costo total del producto). Si es necesario el uso de sujetadores, el número y variedad en tamaño y tipo debe ser minimizado. No deben usarse sujetadores y partes individuales que son muy pequeñas y/o difíciles de manejar durante la fabricación. El uso de rondanas atrapadas y tornillos auto-roscantes ayudarán a esto.

---

h) Minimizar las direcciones de ensamble

- Para minimizar el tiempo de ensamble, las partes deben ser ensambladas en una sola dirección. La mejor forma para lograrlo es ensamblar las partes de lo general a lo particular (top down) en el sentido del eje z, como haciendo un sándwich.

i) Maximizar la manufacturabilidad

- Para vencer los problemas relacionados con acumulación de tolerancias, alineamiento al casar partes e inserción de partes durante el ensamble, el diseño debe incluir el uso de chaflanes, filos, puntos localizados de sujeción para manufactura, guías y muchos radios.

j) Minimizar el manejo

- El posicionamiento de partes durante la manufactura es costoso. Entonces, la parte debe ser diseñada de manera que sea fácil de llegar a la posición correcta. Esto se puede alcanzar usando diseños simétricos o identificando la posición correcta mediante marcas en la parte. El número de posiciones en que la parte debe colocarse durante la fabricación, también deben ser minimizadas (poka-yoke).

k) Eliminar o simplificar ajustes

- Ajustes mecánicos agregan costo a la fabricación y causan problemas de ensamble, prueba o confiabilidad. La necesidad de estos ajustes pueden omitirse a menudo usando puntos donde detenerse, muescas o componentes montados en resortes.

l) Evitar componentes flexibles

- Cables y otros componentes flexibles son difíciles de manejar durante el ensamble. El uso de sellos rígidos o aplicados en el proceso, clavijas o conectores para reemplazar cables, o tarjetas eléctricas en vez de cableado suelto, pueden ayudar a minimizar este problema.

## 5.5. DISEÑO PARA ENSAMBLES CON SNAP FIT

Una alternativa para un ensamble rápido y económico en partes plásticas de alto volumen de producción es el uso de snaps. En muchos productos, los snaps son diseñados para ser ensamblados una sola vez porque su aplicación así lo requiere, como es el caso de los snaps del copete digital para sujetar a la tarjeta control. Otros diseños de snaps como aquellos usados en las tapas de compartimiento de baterías de calculadoras, radios, controles remotos, etc, están pensados para desensamblarse rápidamente y volver a ensamblarlos incluso durante miles de ciclos.

En todos los diseños de los snaps, alguna porción de la parte moldeada debe flexionarse como un resorte, generalmente pasan por una interferencia por diseño y luego regresan a su posición original o muy cerca de ella para crear el ensamble entre dos o más partes. La clave para tener un diseño exitoso del snap es darle el suficiente agarre en la cabeza pero sin exceder el límite elástico o de fatiga del material. En nuestro caso hemos considerado 0.060" para agarre. Los cálculos se muestran más posteriormente.

En la figura 5.6 se muestra un diseño típico de un snap. Usando las ecuaciones de una viga podemos calcular el esfuerzo máximo durante el ensamble. Si nos mantenemos por debajo del punto de cedencia del material, la pierna del snap regresa a su posición original. Sin embargo, en muchos materiales plásticos el esfuerzo de flexión calculado puede exceder por mucho el esfuerzo de cedencia si el ensamble ocurre rápidamente. En otras palabras, la pierna del snap flexible pasa solo momentáneamente por su máxima deflexión o deformación y el material no responde como si el esfuerzo de cedencia hubiera sido altamente excedido. Por lo tanto, una práctica común para evaluar los snaps es mediante el cálculo de la deformación en lugar de los esfuerzos. Luego se compara este valor con el límite de deformación dinámica permisible para el material en particular. En este caso, dicha comparación se hará contra el ABS cuyos límites son de 2.6 y 5.0 para ensamble múltiple y ensamble único, respectivamente.

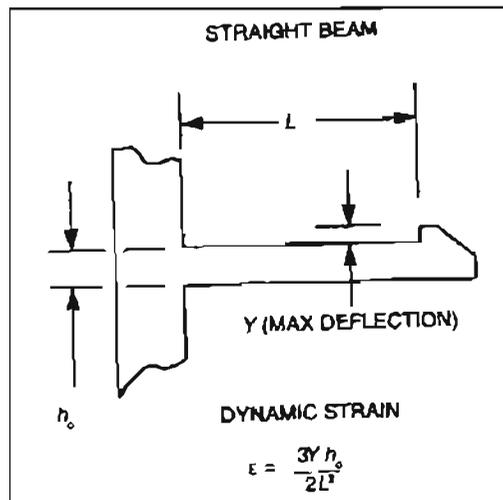


Figura 5.6\*. Diseño típico de un snap como viga en cantiliver con sección rectangular constante

Debido a que generalmente el snap forma un negativo en la cabeza, frecuentemente se requiere de un mecanismo lateral para desmoldarlo, como se muestra en la figura 5.7. Sin embargo, en algunas ocasiones existe una alternativa para no usarlo cuando no nos afecta que en la base de la pierna del snap haya una abertura como se muestra en la figura 5.8, donde el desmolde se realiza de manera natural.

\* Designing With Plastics The Fundamentals, Hoechst Celanese Corp, Engineering Plastics Div., Pag. 9-2

En el caso del copete digital, no nos afecta en lo más mínimo el hecho de tener aberturas en las bases de los snaps, debido a que éstas quedan cubiertas con el overlay. Por lo tanto, para facilitar el diseño del herramental y hacerlo menos caro, se decide utilizar el segundo concepto en el diseño de los snaps. Con esto también se le da cumplimiento al lineamiento de maximizar la manufacturabilidad del diseño para manufactura y ensamble establecido en la sección 5.4.

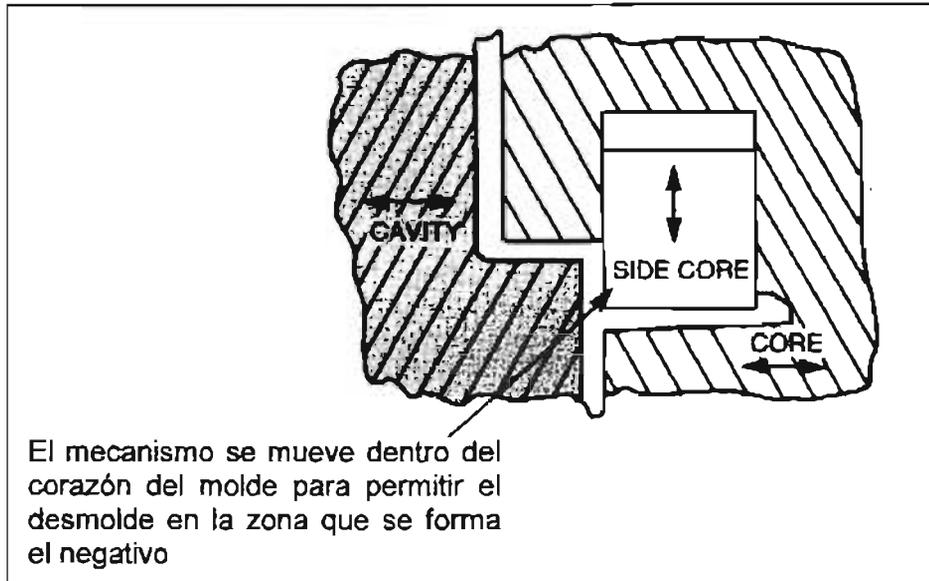


Figura 5.7\*. Desmolde de la cabeza de un snap con la ayuda de un mecanismo

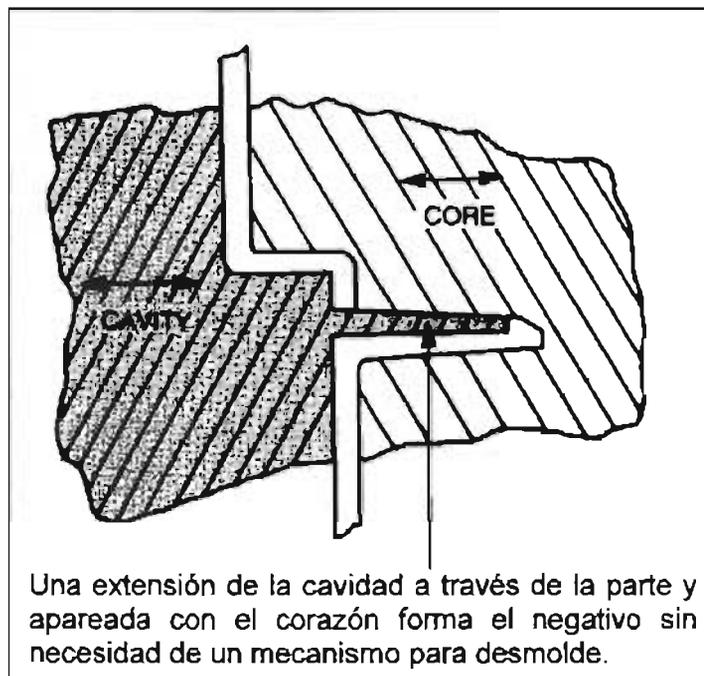


Figura 5.8\*. Desmolde de la cabeza de un snap sin necesidad de un mecanismo

## 5.6. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN DE SNAPS Y BOTONES

Para tener un ensamble exitoso, además de cuidar los gaps críticos, debe cuidarse el aspecto funcional del diseño conceptual manejado, por ello dedicamos tiempo importante para el estudio del comportamiento de los snaps y los botones del copete, de acuerdo al respectivo diseño.

### 5.6.1. ANÁLISIS DE SNAPS

Para el análisis de los snaps y botones, haremos uso de una hoja de cálculo de G.E.[2], como la que se muestra en la figura 5.9, donde se considera a estos como una simple viga empotrada, lo cual se aproxima a la situación en la que estos trabajan.

Analizando primeramente el diseño preliminar de los snaps, vemos que estos tienen un espesor de 0.060", una longitud mínima de pierna de 0.332" y una deflexión de 0.060", la cual se considera suficiente para dar soporte a la tarjeta y relativamente fácil de abatir. Como el copete tiene cierta curvatura y las cabezas de los snaps deben quedar en un mismo plano por la planicidad de la tarjeta, estos quedan con diferentes longitudes de pierna, así que en el análisis consideramos a los mas cortos ( $L= 0.332$ "), que son los mas críticos en cuanto a porcentaje de deformación.

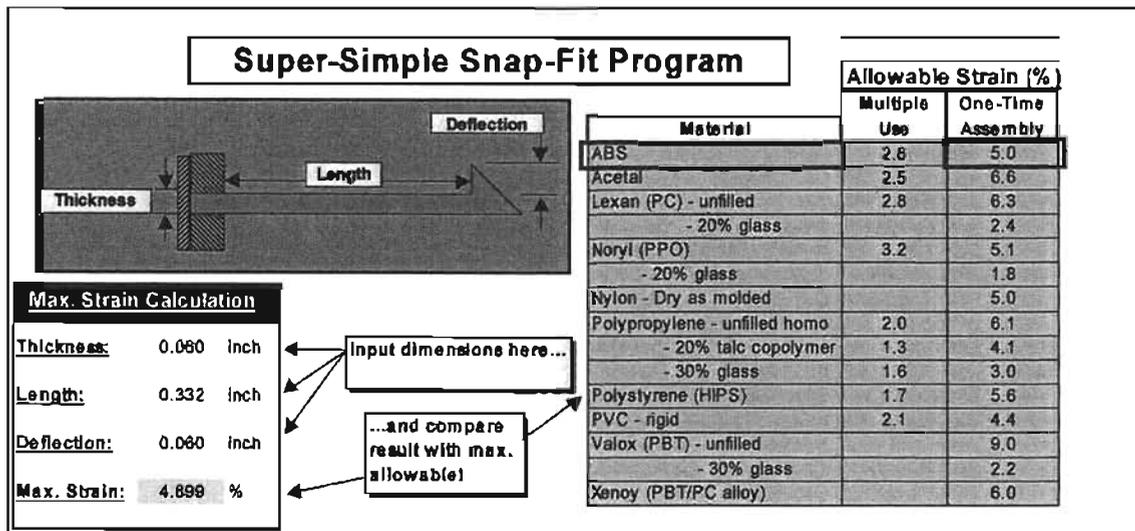


Figura 5.9. Cálculo del porcentaje de deformación en snaps flexibles

Con estos datos de entrada vemos que la deformación máxima a la que someteríamos a cada uno de los snaps flexibles sería de 4.89% que si lo comparamos con la deformación permisible para ensambles de una sola vez en snaps de ABS es marginalmente inferior.

---

Por lo anterior, en la fase de optimización se hace un pequeño ajuste en el diseño de estos snaps, donde la sección transversal tendrá un espesor variable, con el fin de reducir en lo posible el porcentaje de deformación para no estar tan cerca del límite permisible y que eventualmente se llegue a rebasar por la variabilidad que se pudiera tener en esta característica.

La fórmula utilizada en la hoja de G.E[2] para el cálculo de deformación de los snaps es:

$$\varepsilon = \frac{3\gamma c}{L^2} = \frac{3(0.060)(0.030)}{.332^2} = 0.04899$$

Donde  $\gamma$  es la deflexión,  $c = t/2$  y  $L$  la longitud de la pierna del snap. Como porcentaje de deformación  $\varepsilon = 4.89\%$ , valor que arroja la hoja de cálculo.

### 5.6.2. ANÁLISIS DE BOTONES

Para el caso de los **botones** del copete, hacemos un análisis similar, es decir, consideramos al botón como una viga en cantiliver como se ve en la figura 5.10, donde  $L=0.550"$ ,  $\gamma=0.030"$  y  $t=0.080"$ . El valor de  $\gamma$  se obtiene de sumar el valor que se define para el gap G2 más la carrera del microswitch, mientras que los valores de  $L$  y  $t$ , son una primera propuesta de diseño. En este caso G2 se ha definido con un valor nominal de  $0.020"$  (ver tabla 5.1) y la especificación por diseño para la carrera del componente electrónico es de  $0.010"$ .

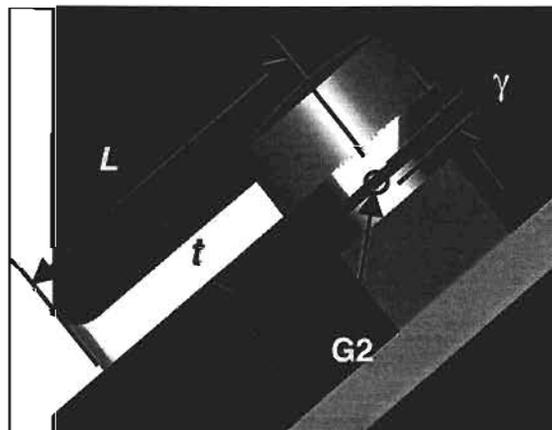


Figura 5.10. Variables para el cálculo de deformación en los botones

Con estos datos, vemos que el porcentaje de deformación sería de  $1.19\%$ , que es menor al  $2.6\%$  permisible para el ABS para una aplicación de uso múltiple como lo son los botones; a pesar de que este resultado es aceptable, en la fase de optimización se hacen algunos pequeños ajustes al diseño de tal manera que pueda reducirse el porcentaje de deformación pero sobre todo la fuerza requerida para lograr la deflexión necesaria para la activación de los microswitches, cuidando a la vez que no se limite el aspecto de manufacturabilidad de la parte, como pudiera ser dificultad para llenado en la inyección en la zona de los botones en el copete.

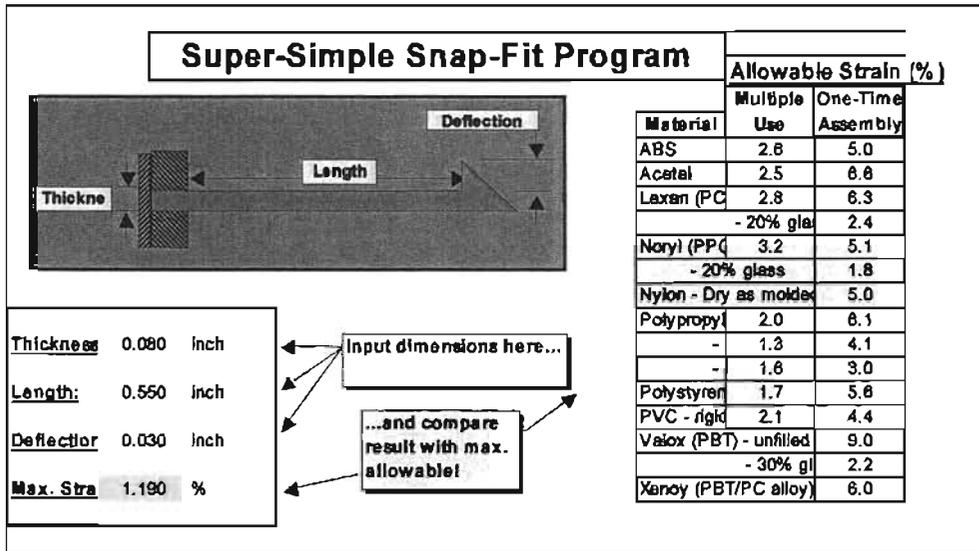


Figura 5.11. Cálculo del porcentaje de deformación en botones

Considerando el límite superior de especificación de 0.032" para el gap G2 que se maneja en la tabla 5.1 y la carrera del microswitch de 0.010", se tendría una deflexión máxima de los botones de 0.042". Con este valor de deflexión y conservando las variables de longitud y espesor de la figura 5.11, se obtiene un porcentaje de deformación máximo de 1.66%, el cuál sigue siendo menor a 2.6. Con esto se ve que aún en el peor caso la propuesta inicial podría funcionar adecuadamente, pero como se ha mencionado, en la fase de optimización se hacen ajustes al diseño para mejorar estos resultados.

El valor límite de 5% en el porcentaje de deformación para una resina ABS que se maneja en la hoja de cálculos de G.E.[2] para el diseño de snaps y botones, en aplicaciones de un solo uso, está respaldada en nuestro caso, por la carta técnica que el proveedor del material nos presenta. En ella, podemos encontrar una gráfica de esfuerzo-deformación (figura 5.12), donde se observa que el límite de proporcionalidad para este material es de aproximadamente 5% a diferentes temperaturas y a una velocidad de prueba de 50 mm/min.

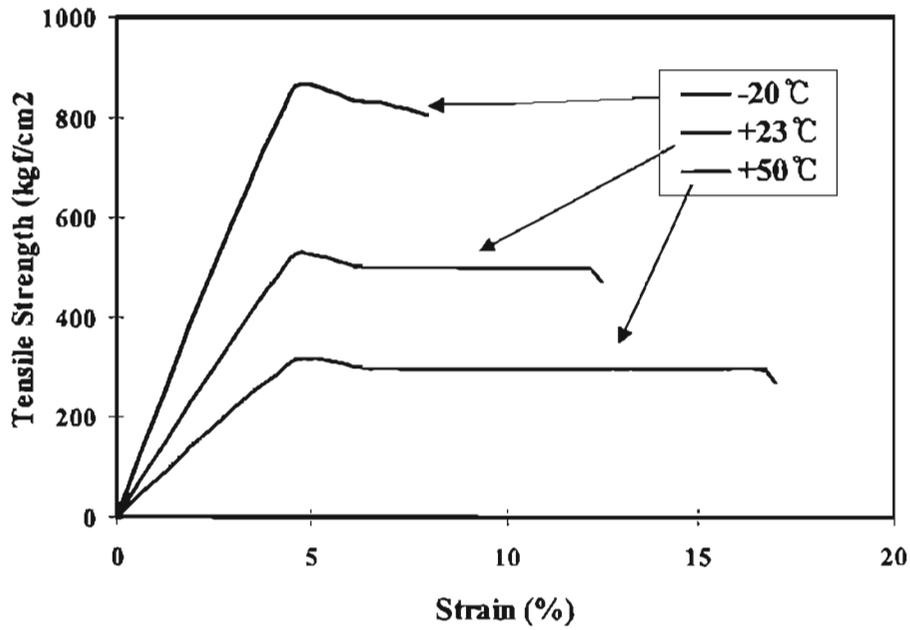


Figura 5.12. Gráfica esfuerzo-deformación a diferentes temperaturas del ABS grado: SD-0150U, con una velocidad de la prueba de 50 mm/min

---

# 6. OPTIMIZACIÓN

---

---

## 6.1. OBJETIVOS Y GENERALIDADES

En esta etapa de la metodología IDOV del DFSS enfocaremos los esfuerzos en los análisis del impacto que tiene la variación de las entradas sobre los resultados para una función de transferencia dada. Cada forma de análisis requiere de ciertas suposiciones por lo que no existe un solo método que sea apropiado para todas las circunstancias. Los métodos que podemos utilizar para hacer los análisis son: máximos y mínimos, Raíz de Suma de Cuadrados (RSS por sus siglas en inglés), análisis de sensibilidad y el de Monte Carlo [6].

El método de máximos y mínimos no considera la variabilidad de las partes, simplemente considera el peor caso, es decir cuando las partes vienen en los límites de especificación. La RSS toma en cuenta que cada parte tiene alguna distribución estadística y es deseable su aplicación en los casos donde se conoce la verdadera capacidad del proceso o bien pueden usarse datos históricos para su uso, pero siempre y cuando la función de transferencia sean lineales (como en nuestro caso). El análisis de sensibilidad considera que las derivadas parciales con respecto a las X's proveen la aproximación de primer orden de los coeficientes de sensibilidad para cada X. Si la capacidad de proceso nos indica que las distribuciones de las entradas no son normales, podemos usar una simulación Monte Carlo, para ver como impactarían diferentes distribuciones en las entradas sobre la distribución de la salida o respuesta.

El método de análisis que se utiliza en este proyecto es el de RSS, donde se asume que los factores tienen una distribución normal o bien una uniforme. Estos análisis se realizaron con la ayuda de la hoja de cálculo de Berryman [1] y se hicieron para cada una de las Y's (tablas 6.2 a 6.11) definidas previamente. Esta hoja de cálculo de Excel, permite predecir el nivel de Z esperado de la variable respuesta (GAP) en función de las capacidades de proceso, medidas como la desviación estándar, y de los límites de especificación que se tenga definido para cada variable de entrada (X's). Como la distribución de las X's es desconocida en la etapa de diseño, las tolerancias se fijaron a 3 desviaciones estándares de la media.

Los valores de las desviaciones estándares para las X's correspondientes al copete digital usados inicialmente en los análisis de tolerancias, se tomaron de la base de datos de G.E.[9] para procesos similares (proceso de inyección de plástico con material ABS). Esta base de datos se generó por personal de G.E. como una recopilación de información concerniente a capacidades de diferentes procesos de manufactura como inyección de plástico, troquelados, maquinados, etc. y dado que esos procesos son similares a los nuestros, se ocupa dicha información en el desarrollo del diseño como una aproximación a las capacidades de proceso que tendrán los componentes provenientes de herramental final. En lo que respecta a la tarjeta y al overlay, las desviaciones estándares se estipulan como requeridas por diseño, a las cuales los proveedores de esas partes se deben apegar (o incluso superar).

Los límites de especificación para las Y's se determinaron en forma conjunta con el equipo de apoyo técnico del proyecto "*Ensamblabilidad y Funcionalidad Tarjeta*

---

de Control en Copete Digital”, con base en la experiencia de cada uno y a los requerimientos del cliente, mientras que las medias de cada X se obtiene del planteamiento inicial que por diseño se tiene para alcanzar la respuesta deseada.

Con el fin de optimizar el desempeño de todo el sistema overlay-botón-tarjeta, en esta etapa, se hacen algunos ajustes tanto en snaps como en botones para minimizar en lo posible el porcentaje de deformación al que serán sometidos, considerando en cada caso el tipo de aplicación de que son objeto, es decir, si son de uso múltiple (botones) o de uso único (snaps).

## 6.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA DISEÑO ESTADÍSTICO

Como se planteó en un inicio del proyecto, una de las intenciones de la metodología de DFSS es migrar del diseño determinístico al diseño probabilístico, donde se considera que todo tiene cierta variabilidad y cierta distribución, en algunos casos conocida y en otras desconocida.

A continuación, se presentan los análisis de tolerancias realizados en el proyecto de ensamblabilidad y funcionalidad tarjeta de control, para cada uno de los gaps que intervienen en estas respuestas, tal como se planteo en la fase de identificación.

La hoja de cálculo de Excel con la que se hacen los análisis de tolerancias fue desarrollado por Maurice Berryman y es propiedad de General Electric. En la tabla 6.1, se describe la manera en que deben alimentarse los datos de entrada y como se interpretan cada una de las celdas de salidas.

En las celdas correspondientes a la columna de *Factor Description* se describen cada una de las X’s que intervienen en la función de transferencia de la respuesta (GAP), la cual se introduce en la celda de Media de la respuesta. Debajo de esta celda se alimentan los límites superior e inferior de especificación para cada GAP. En la columna *Mean* se introducen los valores nominales de las X’s. Luego se alimentan sus desviaciones estándares, así como sus tolerancias. Las salidas principales como  $Z_{SH}$  y DPU tanto de la respuesta como de los componentes se encuentran en la sección de la *Summary Table*.

Aunque la metodología de DFSS tiene como objetivo alcanzar una Z de corto plazo ( $Z_{ST}$ ) de 6, en este proyecto se planteó como objetivo inicial que este indicador alcanzara una  $Z_{ST}$  de 4.5, y dado que la  $Z_{SHIFT}$  para la empresa es de 1.5, la Z de largo plazo ( $Z_{LT}$ ) por diseño del copete digital fue de 3.0

Los análisis de tolerancias que se presentan en esta etapa de *Optimización* emplean valores de desviaciones estándares tomadas de los reportes de primeras muestras proporcionadas por el proveedor del herramental. Las tablas de los análisis de tolerancias iniciales, donde se emplearon datos de capacidades de procesos similares, no se presentan en este trabajo.

**Paso de la parte o proceso** Valor objetivo de la media  
**Campo de descripción del factor** ajuste inicial  
**Capturar las X's aquí**

**El coeficiente de sensibilidad es un** peso relativo de la influencia de este factor en el cambio de la respuesta

**Std. Dev. inicialmente basado en las tolerancias de este factor en el cambio de la respuesta**  
**DPU** esta probabilidad de que esas partes serán producidas fuera del rango de tolerancias.

**Periodo de colección dividido en 6.** Capturar directamente después de medir el factor

**Factor** Descripción

**Variable Information**

Variable Information		Tolerancia		Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU	Z <sub>JT</sub>		
Mean	Short or Long Term	Lower Limit	Upper Limit						% or Actual	
Block 1	4	6	2	2	A	N	35.00%	-1	2.1E-02	3.53
Block 2	2	S	1	1	A	U	25.00%	-1	0.0E+00	N/A
Block 3	4	S	4	4	%	N	40.00%	-1	2.1E-02	3.53

**ENVELOPE** El botón izquierdo ejecuta la macro para calcular los coeficientes de sensibilidad. El botón derecho limpia la sensibilidad actual. Siempre limpie los valores de sensibilidad previos antes de calcular unos nuevos

**Tolerancia - el "Actual" (A) número de unidades por arriba y por abajo que la media de "X" se le permite variar. Introduzca solo números positivos o un porcentaje [%] del valor de la media permitido**

**Media de la respuesta** 3

**LSE de la respuesta** 6

**LIE de la respuesta** 0

**Clear Sensitivities**

**Hide Flows**

**Unhide Flows**

**Introdujo la ecuación que define como las X's están relacionadas con la respuesta**

**Introdujo los valores reales de los límites inferior y superior de especificación**

**Mismo número que el de la celda "Media de la respuesta" y el coef. De sensibilidad**

**Probabilidad de que la respuesta estará fuera del rango de especificación, basado en la media y la Std Dev en la tabla del Summary Table**

**Variancia de salida esperada basada en la Std Dev de las X's y el coef. De sensibilidad**

**Probabilidad de que la respuesta estará fuera del rango de especificación, basado en la media y la Std Dev en la tabla del Summary Table**

**Summery Table**

Response		Worst Case		Components			
Mean	Std Dev	DPU	Z <sub>JT</sub>	Lower Limit	Upper Limit	DPU	Z <sub>JT</sub>
3	1.139	0.009	3.866	-0.160	6.160	4.20E-02	3.81

**Porcentaje de contribución que el componente individual (X) tiene en la drsv. Estandar de todo el sistema**

**Z de corto plazo equivalente para los DPU de los componentes para los DPU de todos los DPU's de la columna K**

**Suma total de todos los DPU's de la columna K**

**Z de corto plazo equivalente para los DPU de los componentes**

**Cuál de estos límites de especificación se pondría si se usara la fórmula del peor caso para establecerlos**

**Rev 2.0a**

**Pulse el botón apropiado para ocultar o desocultar todas las filas. Hay 20 filas disponibles para las X's.**

Tabla 6.1. Descripción de la forma de uso de la hoja de Berryman



## 6.2.2. ANÁLISIS DE TOLERANCIAS PARA "GAP G2 ENTRE BOTÓN COPETE Y MICROSWITCH DE LA TARJETA EN LA DIRECCION Z"

### Statistical Design Analysis Spreadsheet

Response Description:

G2 = GAP ENTRE BOTON Y MICROSWITCH

Analyst: R.P.Meza / E. Santa Cruz

Date: 02-Oct-02

Analysis Table											
Variable Information				Tolerance			Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU??	Z <sub>ST</sub>
Factor Description	Mean	Short or Long Term	Std Dev	Lower	Upper	% or Actual					
Distancia snap a soporte tarjeta	0.093	s	0.0007	0.002	0.002	A	N	5.48%	1	2.796E-02	3.41
espesor tarjeta al conformal ambos lados	0.083	s	0.0020	0.006	0.006	A	N	44.54%	-1	2.102E-02	3.53
Distancia soporte tarjeta a boton en copete	0.205	s	0.0007	0.002	0.002	A	N	5.46%	1	2.796E-02	3.41
Altura microswitch hasta el conformal	0.196	s	0.0020	0.006	0.006	A	N	43.54%	-1	2.102E-02	3.63
Mean Response→	0.02										
Response Upper Spec Limit	0.032										
Response Lower Spec Limit	0.002										
		Calc	Clear			Hide	Unhide				
		Sensitivities	Sensitivities			Rows	Rows				

Summary Table							
Response					Components		
Mean	Std Dev long term	PPM's LT	Z <sub>ST</sub>	Worst Case Limits		DPU	Z <sub>ST</sub>
				Lower	Upper		
0.02	0.003896	1.036E-03	4.58	0.004	0.036	9.796E-02	3.47

Rev: GEA 9/1/98 B. Mellory

© Dr. Maurice L. Berryman, 1998. All rights reserved.

Tabla 6.3. Análisis de tolerancias para el gap G2 entre el botón del copete y el microswitch de la tarjeta en la dirección "z"

El gap G2 es sin duda el más interesante para alcanzar la **funcionalidad** de los controles de la tarjeta, ya que de él depende que la carrera del overlay sobre los botones del copete sea suficiente para lograr la activación de los microswitches.

Como puede verse en el análisis de tolerancias de la tabla 6.3 se repiten los factores que intervienen en el gap G1 (tabla 6.2). Con esto se establece el gap G2 está en función del gap G1 y de dos factores más que son la distancia del soporte tarjeta al botón en el copete y la altura del microswitch.

Vemos que a pesar de que la desviación que se predice para esta respuesta (Gap G2) es mayor que para la anterior, el nivel de Z (4.58) es relativamente mejor, debido sobre todo a la mayor tolerancia que ésta tiene y donde se considera que no pierde la funcionalidad, ya que la carrera del botón del copete permite desplazamientos que pueden alcanzar al microswitch hasta en los peores casos del análisis.

Como se planteó en un inicio del proyecto, una de las intenciones de la metodología de DFSS en general es migrar del diseño determinístico al diseño probabilístico, donde se considera que todo tiene cierta variabilidad y cierta distribución, en algunos casos conocida y en otras desconocida.

Vemos nuevamente que los mayores contribuyentes a la variabilidad predicha para la respuesta siguen siendo los relacionados a la tarjeta de control, por lo que ahí es donde se deberán enfocar los esfuerzos de mejora y control estadístico.

### 6.2.3. ANÁLISIS DE TOLERANCIAS PARA “GAP G3 ENTRE DOMO BOTÓN COPETE Y DOMO BURBUJA OVERLAY EN LA DIRECCION Z”

Statistical Design Analysis Spreadsheet

Response Description:

G3 = GAP ENTRE DOMO BOTON COPETE Y DOMO BURBUJA M3

Analyst: R.P.Maza / E. Santa Cruz

Date: 02-Oct-02

Analysis Table											
Variable Information				Tolerance			Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU??	$Z_{gr}$
Factor Description	Mean	Short or Long Term	Std Dev	Lower	Upper	% or Actual					
altura domo en boton copete	0.02	S	0.0007	0.002	0.002	A	N	25.39%	-1	2.798E-02	3.41
altura domo en mylar	0.025	S	0.0012	0.0038	0.0036	A	N	74.61%	1	2.102E-02	2.53
Mean Response →	0.005										
Response Upper Spec Limit	0.012										
Response Lower Spec Limit	-0.002										

Summary Table							
Response				Components			
Mean	Std Dev Long Term	PPMs LT	$Z_{gr}$	Worst Case Limits		DPU	$Z_{gr}$
				Lower	Upper		
0.005	0.001806	1.065E-04	5.20	-0.0006	0.0106	4.898E-02	3.47

Rev: GEA 07/08 B.Malory

© Dr. Maurice L. Berryman, 1996 All rights reserved.

Tabla 6.4. Análisis de tolerancias para el gap G3 entre el domo de botón copete y el domo burbuja overlay en la dirección “z”

Al igual que en el caso del análisis para el gap G1, el valor para la desviación estándar a corto plazo para la altura del domo en el overlay, aquí será un requerimiento de diseño para poder alcanzar los objetivos. El motivo principal para cuidar este gap es el de evitar la sensación de un doble “click” en el momento de activar el botón, ya que si este gap es considerable, se sentirá un efecto de activación al deformar la burbuja y otro al deformar el botón del copete. Es de menor importancia que el anterior, pero se considera aquí porque se trata de optimizar en todos los aspectos el desempeño del sistema de activación de los controles.

En la tabla 6.3 se ve que el nivel de Z a corto plazo que se predice para el gap G3 es de 5.20, lo cual es muy satisfactorio si se considera el mínimo aceptable de 4.5.

### 6.2.4. ANÁLISIS DE TOLERANCIAS PARA “GAPS EN LA DIRECCIÓN X-Y DEL ENSAMBLE TARJETA CONTROL AL COPETE DIGITAL”

A continuación se presentan los análisis realizados para los gaps que influyen de manera más significativa sobre la ensamblabilidad de la tarjeta (tablas 6.4 a 6.11). La importancia de estos gaps (G4 a G10), como se ha descrito previamente, es que nos ayudarán a prescindir de 5 tornillos utilizados en productos actuales, además de que permitirán la alineación de los leds de la tarjeta con las correspondientes guías de luz del copete digital.



Los análisis de las tablas 6.5 y 6.6 están relacionados, ya que en el segundo está implícito primero. Vemos que de manera individual, para el gap G4 se predice una Z de corto plazo de 4.95; sin embargo, al considerarlo como parte del gap G5, como se describió en la función de transferencia, dicho indicador decrece a 4.51 (tabla 6.6), valor que aún se encuentra dentro de los requerimientos técnicos de este proyecto.

Nuevamente, se puede ver que las X's que mayormente contribuyen a la variabilidad de la respuesta predicha, son las relacionadas a la tarjeta control.

Si analizamos los peores casos del análisis de la tabla 6.6, vemos que en realidad no son tan malos, ya que si consideramos por ejemplo el peor caso superior, con un gap de 0.035" no es tan crítico porque en promedio aún quedaría 0.025" de agarre en la cabeza de los snaps.

Además, como no se están analizando los gaps en cada uno de los snaps y soportes rígidos en esta dirección, al hacerlo y considerando que ellos también tendrían la misma probabilidad de resultar "defectuosos", para que el sistema fallara por los gaps en esta dirección se necesitaría que todos fallaran simultáneamente, ya que puede considerarse que tienen un arreglo en paralelo, lo que hace que la confiabilidad en el agarre de los snaps sea mucho mayor que si se consideraran como un arreglo en serie.

En la tabla 6.7 se presenta el análisis correspondiente al gap G6, entre la pared del tope superior en el copete y el corte correspondiente en la tarjeta en la dirección "y". Puede verse aquí que el nivel de  $Z_{ST}$  que se predice para este gap es de 4.48 con su respectivo PPM de 0.001457 (aproximadamente 1.4 defectos por cada mil oportunidades). Se observa una vez más que los factores que más contribuyen a la variabilidad de la respuesta son los relacionados a la tarjeta de control, 44.64% contra 6.48% de los factores pertenecientes al copete digital.

#### Statistical Design Analysis Spreadsheet

Response Description: G6 = GAP ENTRE PARED TOPE SUPERIOR DEL COPETE Y COR Analyst: R.P. Maza / E. Santa Cruz Date: 02-Oct-02

Analysis Table											
Variable Information				Tolerance			Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU??	$Z_{ST}$
Factor Description	Mean	Short or Long Term	Std Dev	Lower	Upper	% or Actual					
Distancia de centro bota a pared soporte en copete	1.002	s	0.0007	0.004	0.004	A	N	5.46%	-1	1.118E-05	5.74
Distancia de centro barreno a pared corte en tarjeta	0.987	s	0.0020	0.006	0.006	A	N	44.64%	1	2.102E-02	3.63
Distancia de pared soporte a pared tope en copete	3.372	s	0.0007	0.004	0.004	A	N	5.46%	1	1.118E-05	5.74
Distancia de corte soporte a corte tope en tarjeta	3.342	s	0.0020	0.006	0.006	A	N	44.64%	-1	2.102E-02	3.63
Mean Response →	0.015										
Response Upper Spec. Limit	0.027	Calc	Clear			Hide	Unhide				
Response Lower Spec. Limit	0.002	Sensitivities	Sensitivities			Rows	Rows				

Summary Table							
Response					Components		
Mean	Std Dev long term	PPMs LT	$Z_{ST}$	Worst Case Limits		DPU	$Z_{ST}$
				Lower	Upper		
0.015	0.003896	1.457E-03	4.48	-0.005	0.035	4.205E-02	3.81

Rev. GEA 9/1/98 B.Mallory

© D. Maurice L. Berryman, 1998. All rights reserved.

Tabla 6.7. Análisis de tolerancias para el gap G6 entre la pared del tope superior en el copete y el corte correspondiente en la tarjeta en la dirección "y"



G8 que es más general. Con una  $Z_{ST}$  de 4.51 y un PPM de 0.00128 (1.2 defectos por cada 1000 oportunidades) aún se está dentro de los límites establecidos como requerimientos del proyecto.

**Statistical Design Analysis Spreadsheet**

Response Description: G9 = GAP ENTRE PARED LATERAL SOPORTE INF. IZQ. DEL COP Analyst: R.P.Meza / E. Santa Cruz Date: 02-Oct-02

Analysis Table											
Variable Information				Tolerance			Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU??	$Z_{ST}$
Factor Description	Mean	Short or Long Term	Std Dev	Lower	Upper	% or Actual					
Distancia de centro boss a pared soporte inferior	1.55	S	0.0007	0.004	0.004	A	N	6.76%	-1	1.288E-08	7.07
Distancia de centro barrenos a pared corte p/ sop	1.565	S	0.0020	0.006	0.006	A	N	93.24%	1	2.102E-02	3.53
Mean Response →	0.015										
Response Upper Spec Limit	0.025	Calc	Clear			Hide	Unhide				
Response Lower Spec Limit	0.005	Sensitivities	Sensitivities			Rows	Rows				

Summary Table							
Response				Components			
Mean	Std Dev long term	PPMs LT	$Z_{ST}$	Worst Case Limits		DPU	$Z_{ST}$
				Lower	Upper		
0.015	0.002693	2.043E-04	5.03	0.005	0.025	2.102E-02	3.81

Rev: GEA 9/1/98 B.Melroy  
© Dr. Maurice L. Barryman, 1996. All rights reserved.

Tabla 6.10. Análisis de tolerancias para el gap G9 entre la pared lateral del soporte rígido inferior izquierdo en el copete y el corte correspondiente en la tarjeta en la dirección "x"

**Statistical Design Analysis Spreadsheet**

Response Description: G10 = GAP ENTRE PARED LATERAL SOPORTE INF. DER. DEL CO Analyst: R.P.Meza / E. Santa Cruz Date: 02-Oct-02

Analysis Table											
Variable Information				Tolerance			Dist. Type Normal or Uniform	% Cont. to $\sigma$ Response	Sensitivity Coef.	DPU??	$Z_{ST}$
Factor Description	Mean	Short or Long Term	Std Dev	Lower	Upper	% or Actual					
Distancia de centro boss a pared soporte inferior	1.55	S	0.0007	0.004	0.004	A	N	3.30%	1	1.288E-08	7.07
Distancia de centro barrenos a pared corte p/ sop	1.565	S	0.0020	0.006	0.006	A	N	45.56%	-1	2.102E-02	3.53
Distancia pared soporte inf. izq a pared soporte	3.1	S	0.0007	0.004	0.004	A	N	5.58%	-1	1.118E-06	5.74
Distancia de corte p/soporte inf. izq. A corte p/c	3.13	S	0.0020	0.006	0.006	A	N	45.56%	1	2.102E-02	3.53
Mean Response →	0.015										
Response Upper Spec Limit	0.027	Calc	Clear			Hide	Unhide				
Response Lower Spec Limit	0.002	Sensitivities	Sensitivities			Rows	Rows				

Summary Table							
Response				Components			
Mean	Std Dev long term	PPMs LT	$Z_{ST}$	Worst Case Limits		DPU	$Z_{ST}$
				Lower	Upper		
0.015	0.003852	1.238E-03	4.51	-0.005	0.035	4.204E-02	3.81

Rev: GEA 9/1/98 B.Melroy  
© Dr. Maurice L. Barryman, 1996. All rights reserved.

Tabla 6.11. Análisis de tolerancias para el gap G10 entre pared lateral soporte rígido inferior derecho en el copete y corte correspondiente en la tarjeta en la dirección "x"

En las tablas 6.10 y 6.11 se presentan los análisis de tolerancias correspondientes a los gaps G9 y G10, respectivamente. La Z de corto plazo para el gap G9 fue de 5.03 contra 4.51 para el gap G10. Ambos casos son aceptables considerando el requerimiento mínimo de 4.5 de este proyecto.

Con todos estos análisis desarrollados y considerando que las capacidades de proceso fueron obtenidos sobre las primeras muestras de herramental final, se puede garantizar la ensamblabilidad y la funcionalidad del copete digital con el overlay y la tarjeta de control.

### 6.3. DISEÑO DETALLADO DE SNAPS

Como parte de la optimización del concepto de ensamble de tarjeta mediante snaps para prescindir de tornillos, buscaremos ahora minimizar el porcentaje de deformación de los snaps alcanzado en el diseño preliminar. Para esto hacemos el cambio de snaps de sección rectangular constante a snaps de sección rectangular variable (*tapered snaps*), donde  $h_s = 0.060''$  y  $h_0 = 0.050''$ .

La ecuación para el porcentaje de deformación en una viga de sección rectangular variable (afilada), como se muestra en la figura 6.1 es:

$$\varepsilon_i = \frac{3y_i h_s}{2K_s L^2} (\times 100\%)$$

Donde  $K_s$  es un factor que puede obtenerse de la gráfica que se muestra en la figura 6.2 teniendo la relación entre espesores  $R = h_0/h_s$ . En nuestro caso particular,  $R = 0.050/0.060 = 0.8333$ , entonces  $K_s \cong 1.2$ , mientras que  $L = 0.332$ ,  $y_i = 0.060$

Por lo tanto  $\varepsilon = 4.08\%$ .

Con esto, logramos bajar este indicador en 0.8 puntos porcentuales del valor original de 4.89%.

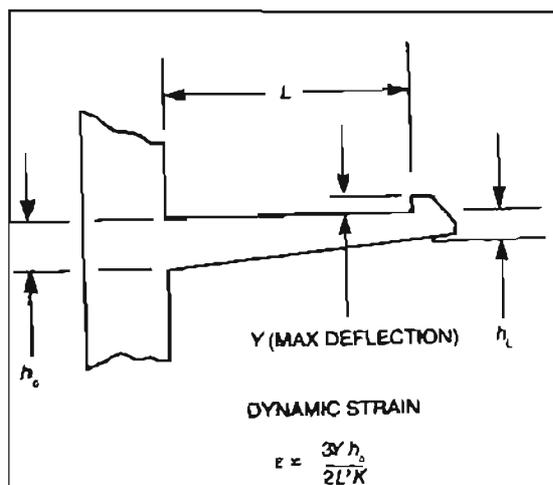


Figura 6.1\*. Diseño de snap como viga en cantiliver con una sección rectangular variable

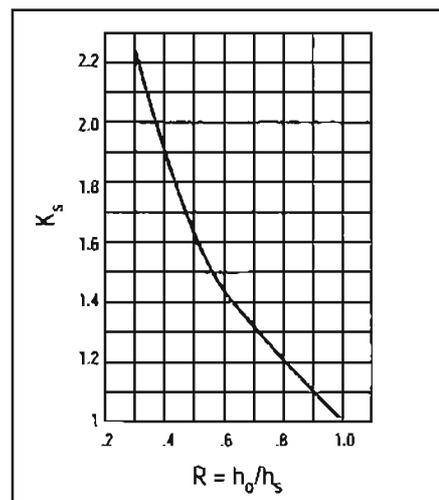


Figura 6.2\*. Constante de proporcionalidad  $k_s$ , para vigas afiladas

\* Designing With Plastics The Fundamentals, Hoechst Celanese Corporation, Engineering Plastics Division, Pag. 9-2

---

Estos análisis también se realizan en un software de elemento finito de uso común en la compañía. Primeramente se establecen las condiciones de frontera bajo el cual se analiza una porción del copete que incluye uno de los snaps que sirven para sujetar a la tarjeta de control (Figura 6.3). La carga utilizada es producto de iteraciones hechas en el análisis hasta alcanzar la deformación necesaria en la cabeza del snap para ensamblar la tarjeta.

En nuestro caso, necesitamos una deformación de 0.060 pulgadas en la cabeza de los snaps para poder ensamblar la tarjeta. Esto se logra con una fuerza de 4.7 lb en la dirección que se indica en la figura 6.3.

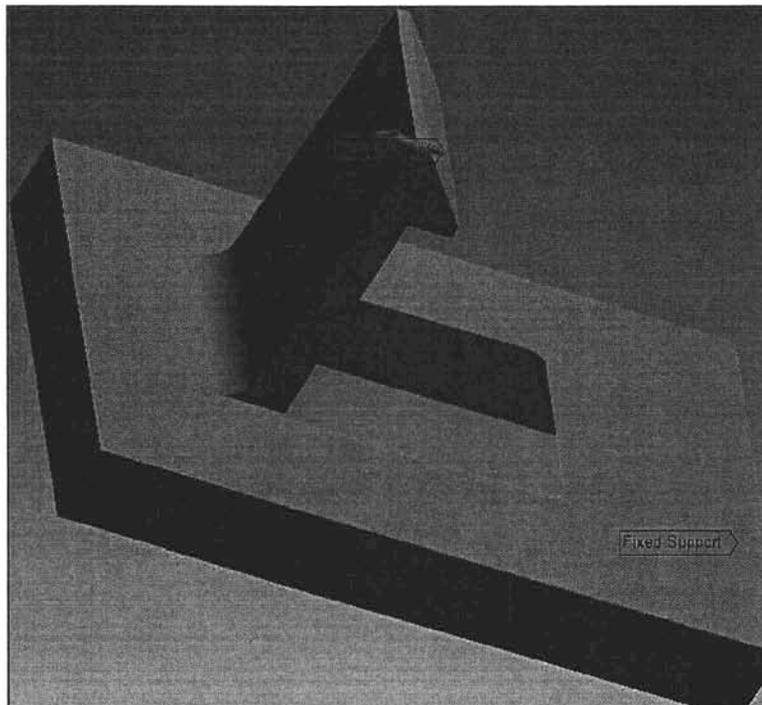


Figura 6.3.- Condiciones de frontera para el análisis de los snaps

El porcentaje de deformación máximo que se obtiene del análisis es de 3.39% como se muestra en la figura 6.4, el cuál difiere ligeramente contra el obtenido manualmente de 4.08%. Esto se debe principalmente a que el modelo 3D no es exactamente una viga en cantiliver ya que se tiene un radio y un agujero en la base de los snaps utilizado para desmoldarlos sin necesidad de mecanismos.

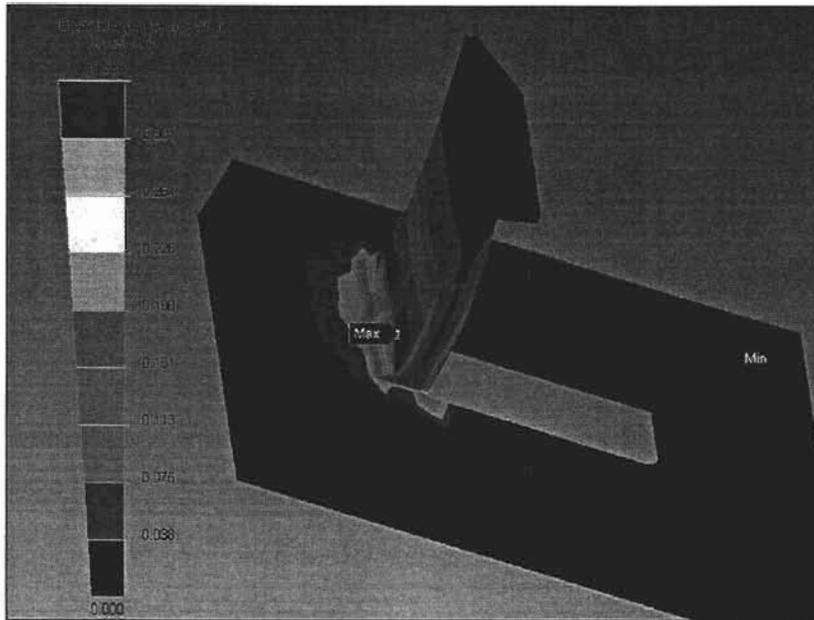


Figura 6.4 Deformación equivalente en los snaps del copete digital

En la figura 6.5 se observa que, al igual que el porcentaje de deformación máximo, el esfuerzo máximo se encuentra en la base de los snaps. El valor de dicho esfuerzo es de 9800 psi. La resistencia a la tensión del material empleado en el copete es de 6800 psi, pero teniendo en cuenta que para el diseño de los snaps utilizamos el criterio del porcentaje de deformación, utilizamos este dato solo de manera informativa.

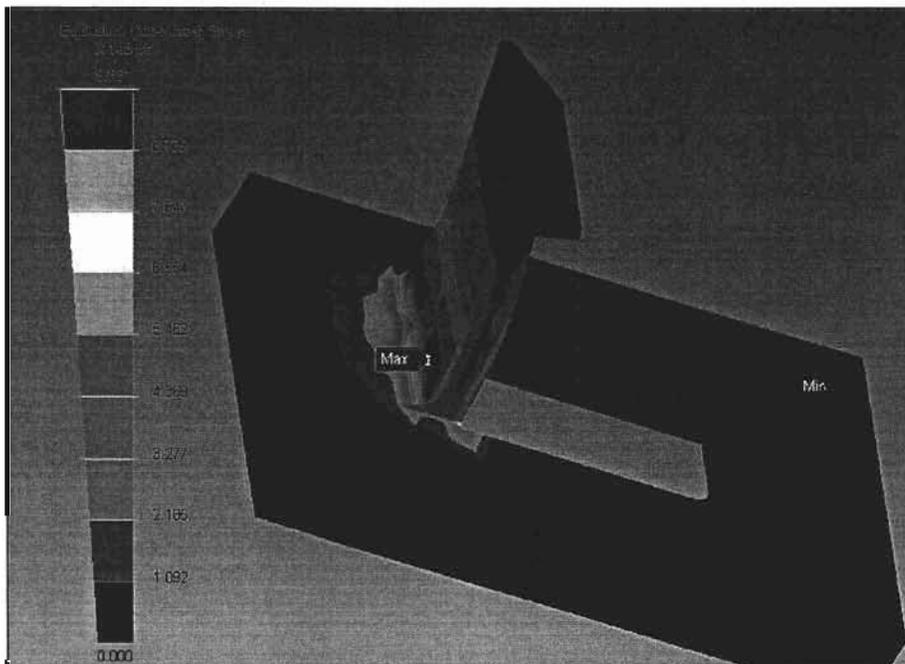


Figura 6.5- Esfuerzo equivalente en los snaps del copete digital

---

La tercera banda de deformaciones de la figura 6.6 muestra un valor de 0.060 pulgadas en la cabeza del snap que se obtendría con las condiciones de la figura 6.3 al momento de realizar el ensamble de la tarjeta en el copete digital.

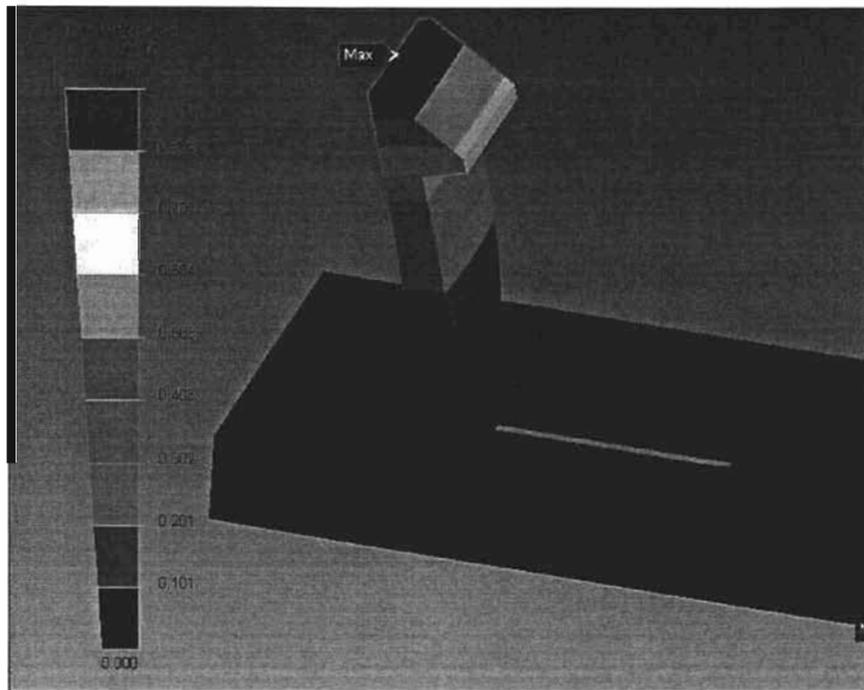


Figura 6.6- Deformación total en los snaps del copete digital

#### 6.4. DISEÑO DETALLADO DE BOTONES

En lo que respecta al diseño de los botones, buscaremos también minimizar el porcentaje de deformación de los botones, obtenido en el diseño preliminar, pero sobre todo se busca reducir la fuerza necesaria para lograr la deflexión necesaria para la activación de los microswitches, ya que a ésta habrá que agregarle la fuerza para deformar la burbuja del overlay.

Esto se puede alcanzar disminuyendo el espesor de la pierna del botón, siempre y cuando no sea tanto que llegue a generar problemas de llenado de la cabeza del botón. Un espesor que puede darnos este requerimiento es 0.070", con el que bajamos de 1.19% a 1.041% como puede verse en la hoja de cálculo de G.E.[2] de la figura 6.7.

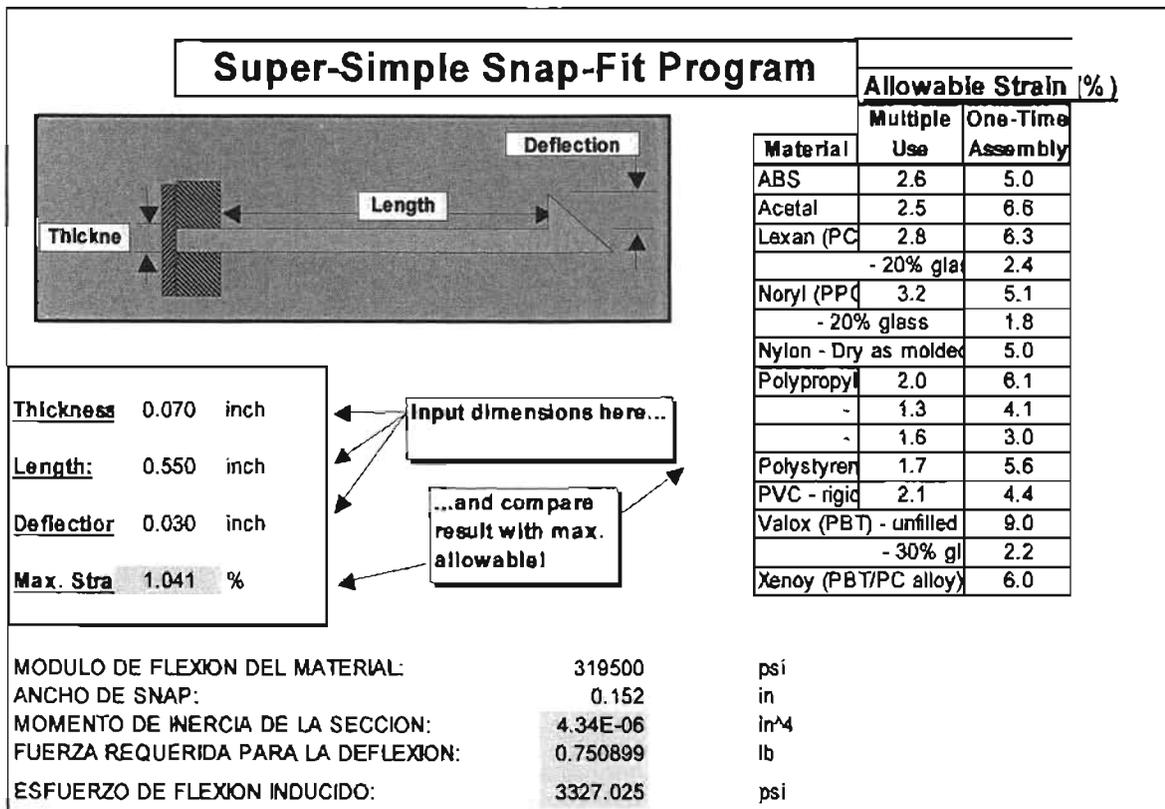


Figura 6.7. Cálculo de % de deformación en botones del copete

En la parte inferior de la hoja de cálculo de la figura 6.7, se encuentran otros cálculos que no vienen contemplados en la hoja original. Esto se hizo con el fin de calcular la fuerza aproximada que se necesita para alcanzar la deflexión requerida para la activación de los microswitches. A esta fuerza habrá que agregarle la necesaria para deformar el domo del overlay y juntos no deberán sumar más de 2 libras.

Con la reducción del espesor de la pierna de los botones del copete de 0.080" a 0.070" se logra reducir dicha fuerza teórica de 1.12 lb a 0.75 lb, es decir, se logra una reducción de aproximadamente 33% en dicho parámetro a pesar de que la reducción en el porcentaje de deformación no haya sido tan significativo.

Actualmente no se tienen datos de la resistencia del material empleado en el overlay, por lo que por diseño, la fuerza requerida para deformar el domo hasta su máxima carrera no deberá exceder 1.25 lb en promedio.

También en el caso de los botones se hicieron análisis similares en el software de elemento finito usado en la compañía. Las condiciones de frontera se establecen considerando 4 soportes rígidos y una carga sobre la cabeza de los botones de 0.75 lb (figura 6.8), de acuerdo a lo calculado en la figura 6.7.

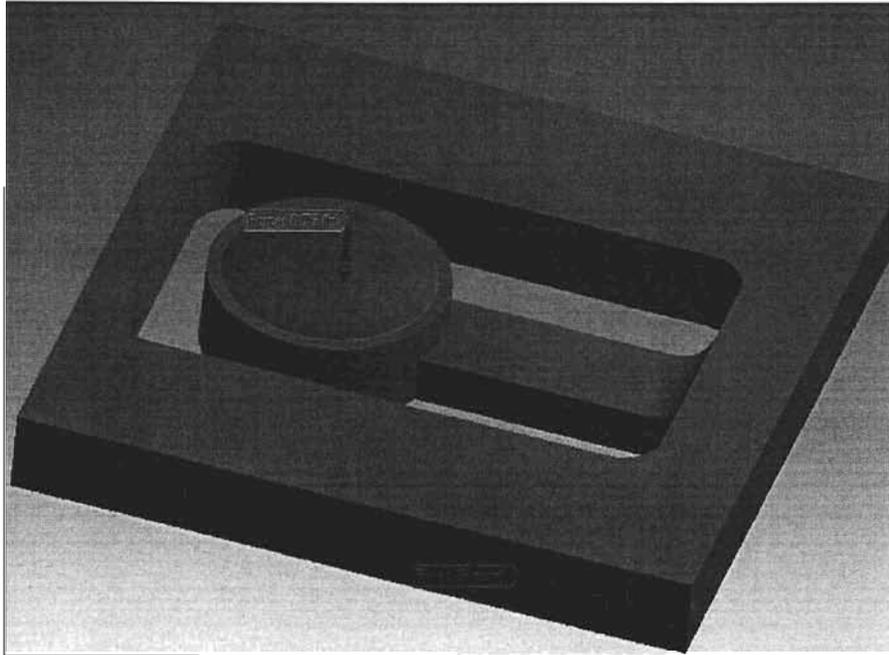


Figura 6.8- Condiciones de frontera para el análisis de los botones del copete digital

Como puede verse en la figura 6.9, el porcentaje de deformación máximo obtenido en este análisis fue de 1.09% que es muy parecido al valor de 1.04% obtenido en el análisis de la figura 6.7. La gran similitud en estos resultados se debe a que la geometría de los botones en el copete digital asemeja más a una viga en cantiliver que lo que lo asemejan los snaps de sujeción.

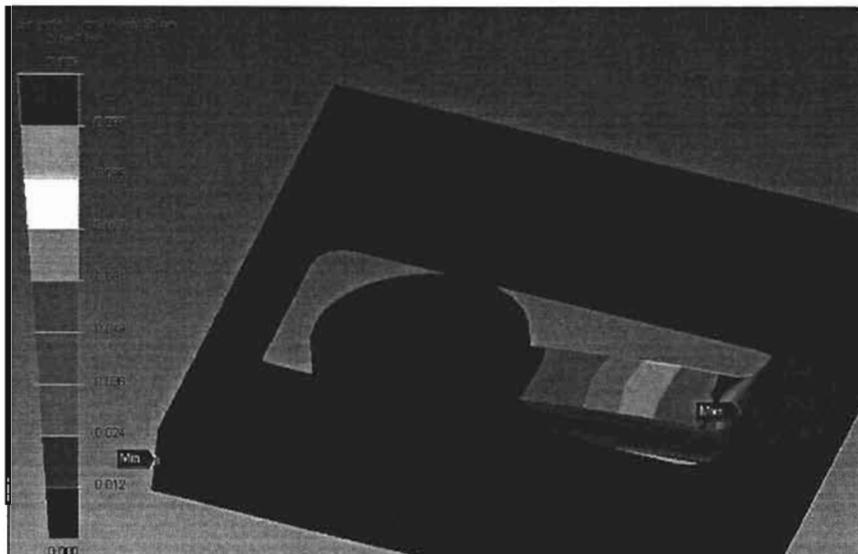


Figura 6.9- Deformación equivalente en los botones del copete digital

El porcentaje de deformación máximo y los esfuerzos máximos están localizados en la misma zona, la base de los botones. Como se muestra en la figura 6.10 el esfuerzo máximo inducido es de 3169 psi que es ligeramente menor al valor de 3327 psi obtenido en el análisis de la figura 6.7. Aunque, el criterio que nos rige

nuevamente es el del porcentaje de deformación que para aplicaciones múltiples no debe rebasar el 2.6 % para el material empleado en el copete, debe prestarse atención en la zona que aparecen con mayores niveles de esfuerzo y de porcentaje de deformación, ya que son las más propensas a presentar falla por fatiga, como se verá en la fase de validación cuando se realizan pruebas de vida.

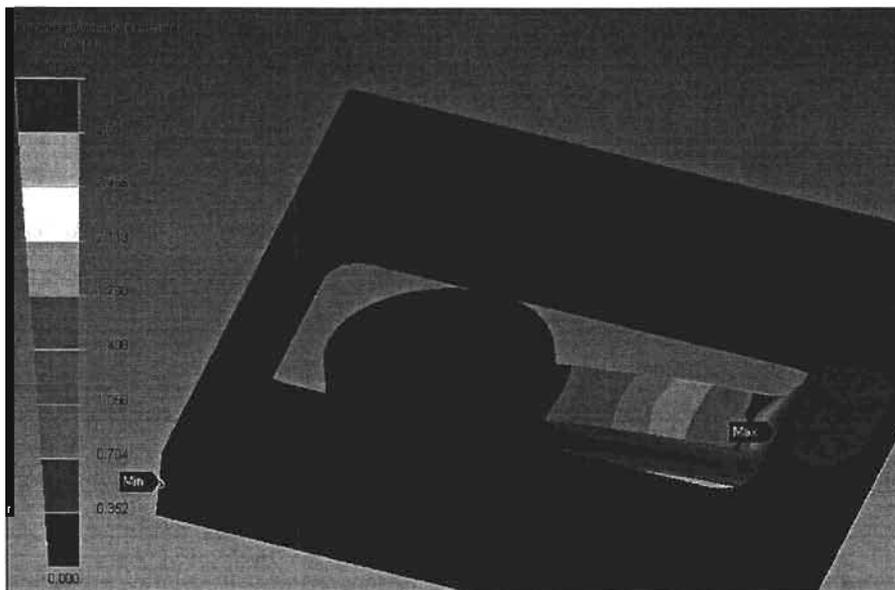


Figura 6.10- Esfuerzo equivalente en los botones del copete digital

Por último, para validar que la deformación que se obtiene en la cabeza de los botones es la requerida (0.030 pulgadas) se hace el análisis de deformación total (figura 6.11) donde puede verse que la deformación inducida en dicha zona con las condiciones de la figura 6.8 es de 0.032 pulgadas.

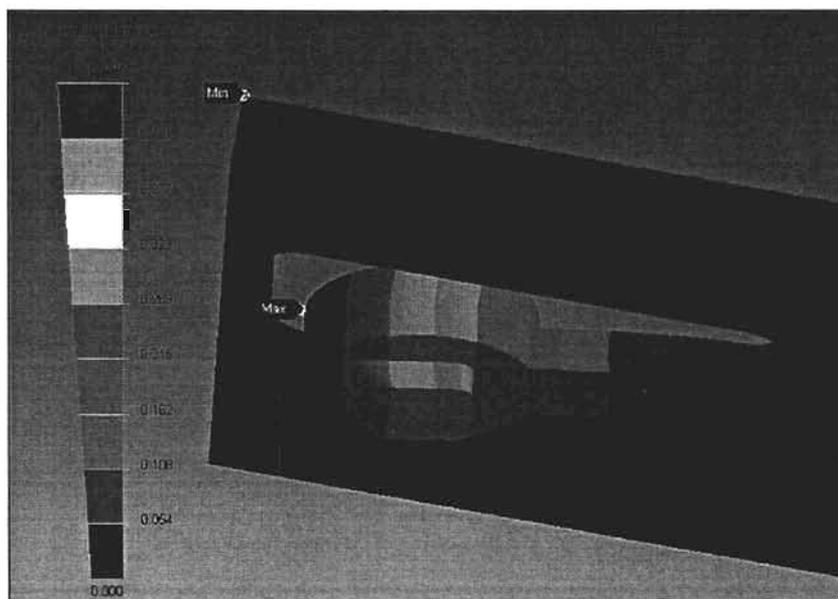


Figura 6.11- Deformación total en los botones del copete digital

---

## 6.5. ANÁLISIS DE LLENADO Y PREDICCIÓN EN LA CALIDAD PERCIBIDA DEL COPETE DIGITAL.

Para cerciorarnos que no tendremos problemas de llenado al adelgazar las piernas del botón, y para hacer un análisis de moldeo general de la parte, se decidió correr una simulación del llenado del copete con la ayuda de un software utilizado en la compañía para este propósito.

Se pudo ver que no existen zonas críticas para llenado, como lo ilustra la figura 6.12, la cual indica la confianza de llenado del copete digital.

El análisis se corrió con un material ABS Starex SD0150 con un índice de fluidez de 1.8 g/10min, mientras que el ABS a utilizar es el SD0150U con un índice de fluidez del 1.9 g/10 min. El resultado de tal análisis muestra que solo en algunas zonas tenemos una confiabilidad media de llenado, mientras que en el resto del copete ésta es alta; sin embargo como el material que se usara en el copete es de menor viscosidad que se usó en la simulación, es de esperarse que las zonas de mediana confianza de llenado sean aún menores.

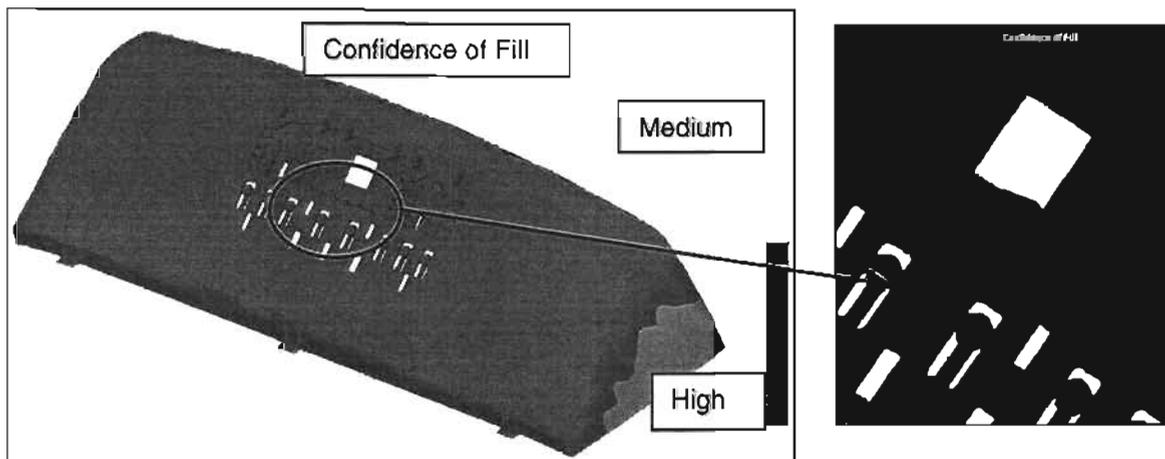


Figura 6.12- Confiabilidad de llenado del copete digital

Además del resultado de confiabilidad de llenado, el análisis nos permitió obtener otros resultados como el que se muestra en la figura 6.13, concerniente a la predicción de la calidad de la parte.

En esa figura vemos que la zona donde se predice baja calidad, es principalmente donde se encuentran las guías de luz y los botones. Sin embargo, esto no es preocupante, ya que esta zona irá cubierta con el maylar u overlay. Las zonas que si serán de apariencia están en color verde o en el peor de los casos en amarillo, es decir se predice una alta calidad o mediana en el peor de los casos.

Mas aun, considerando nuevamente el hecho de que el material a utilizarse es de menor viscosidad que el usado en la simulación y de que los parámetros de

inyección pueden ajustarse de acuerdo a las necesidades (como en este caso, aumentar temperatura de molde o de fusión, o bien reducir el tiempo máximo de inyección), las zonas con una predicción de calidad media tienden a volverse zonas de alta calidad predicha.

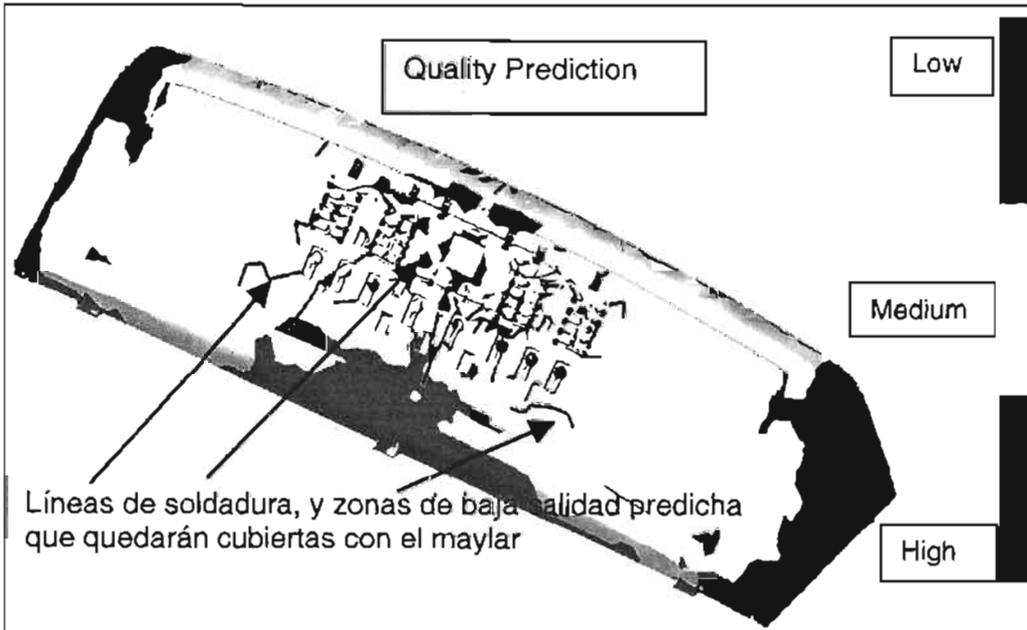


Figura 6.13. Predicción de calidad percibida en el copete digital

## 6.6. CONCLUSIÓN

Con base en las especificaciones establecidas previamente para cada "Y" con el equipo de apoyo técnico, se hicieron los ajuste pertinentes para dejar el modelo 3D con las medias de las X's, centradas en el rango de especificación, para obtener mejores niveles de z, las cuales nos aseguran un buen ensamble de la tarjeta contra el copete y un adecuado desempeño de los botones de control en el momento que el usuario interactúe con la lavadora.

Además, con los ajustes hechos en los botones y snaps, se espera tener resultados aun mejores que los iniciales, sobre todo después de haber hecho los análisis de resistencia de materiales y las simulaciones de moldeo, en los que no encontramos puntos críticos que nos dieran indicios de una mala calidad de la parte.

Todo esto nos ayuda a reducir el riesgo de una insatisfacción de nuestros clientes, que es finalmente uno de los objetivos de este proyecto.

---

# 7. VERIFICACIÓN

---

---

## 7.1. OBJETIVOS Y GENERALIDADES

En esta etapa enfocamos los esfuerzos para verificar que los valores de las X's vitales que intervienen en las funciones de transferencia, se encuentren en su valor nominal, tanto en las hojas de Berryman [1] como en los planos de las partes involucradas en el ensamble (copete-overlay-tarjeta).

Para verificar que desde el diseño estamos alcanzando la respuesta requerida, es decir la *ensamblabilidad y funcionalidad* de la tarjeta de control (la gran Y), hacemos uso de la herramienta CAD para corroborar que efectivamente en el ensamble virtual traemos los valores de gaps definidos desde principio del proyecto como las variables de respuesta.

Además, se verifica que en los planos, dichas cotas se encuentren identificadas como CTQ's y referenciadas a la tabla de CTQ's del Lay Out de las partes, donde se establecen las tolerancias en niveles de Z, para estas variables. Esto es importante, ya que las tolerancias dimensionales no serán más el criterio de aceptación o rechazo de una parte, sino el nivel de Z en que se encuentre el proceso del proveedor en las cotas críticas.

## 7.2. VERIFICACIONES EN COPETE DIGITAL

A continuación se realiza la verificación de los CTQ's en planos del **copete** digital. Las X's correspondientes a esta parte a verificarse son: para la dirección "z" X2, X3 y X6, en la dirección "y" X7, X9 y X11, y para la dirección "x" X14, X15, X18 y X19.

Los correspondientes a la **tarjeta control** y el **overlay** (maylar) quedarán pendientes hasta el momento de liberación de los planos; sin embargo, estas cotas críticas ya han quedado identificadas y definidas en la fase de *Identificación* y se remarcan nuevamente al final de esta fase.

### 7.2.1. VERIFICACIÓN DE LAS X's EN DIRECCIÓN "z"

Como puede verse en la figura 7.1 el valor para la X2 (distancia de la cabeza de los snaps a los soportes tarjeta en el copete) de la Y1 (GAP G1) corresponde al manejado en la tabla 6.2 del capítulo anterior que fue de 0.093" y se encuentra identificado como CTQ  $\diamond$ . En total, las entidades que tendrán este valor son 8, 5 soportes y 3 bosses, que también funcionan como soportes para la tarjeta control, por eso en el plano se dimensiona esta variable como 5 X 0.093 y 3 X 0.093.

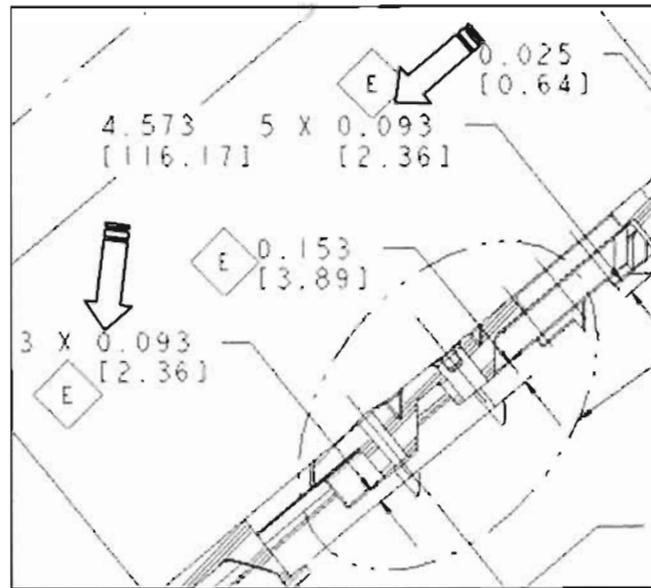


Figura 7.1.- Valor nominal de la X2 del copete digital en la dirección "z"

Mientras tanto, el valor de X6 (altura del domo botón) usado en la función de transferencia del gap G3, fue de 0.020" como se muestra en la figura 7.2. Esta cota deberá verificarse en los 8 botones del copete.

Por su parte, el valor de X3 (distancia de soporte tarjeta a cara botón en copete) para la Y2 (Gap G2) fue de 0.205" como puede verse en la figura 7.2. Esta distancia también debe verificarse con cada uno de los 8 botones.

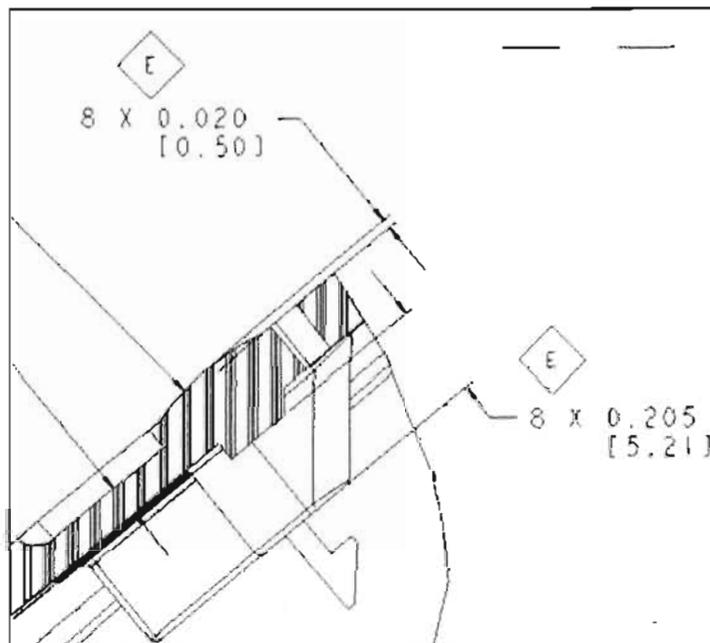


Figura 7.2 Valor nominal de la X3 y X6 en el copete digital en la dirección "z"

## 7.2.2. VERIFICACIÓN DE LAS X's EN DIRECCIÓN "y"

Pasando ahora a las X's que intervienen en los gaps en **dirección "y"** en el copete (G4, G5 y G6), verificamos que los valores finales de éstas correspondan a las manejadas en los análisis de tolerancia. Las X's vitales correspondientes al copete digital en esta dirección fueron: X7, X9 y X11 con valores de 1.002", 0.982" y 3.372", respectivamente, como pueden verse en la figura 7.3.

Además, aunque no entran en los análisis de tolerancias, se marcan otras dimensiones como CTQ's, ya que como se dijo previamente nos interesa cuidar todos los gaps en esta dirección para asegurar el máximo agarre de los mismos en la tarjeta, para poder prescindir de los tornillos; así que estas dimensiones deberán cuidarse en los 6 snaps superiores y en los cuatro centrales.

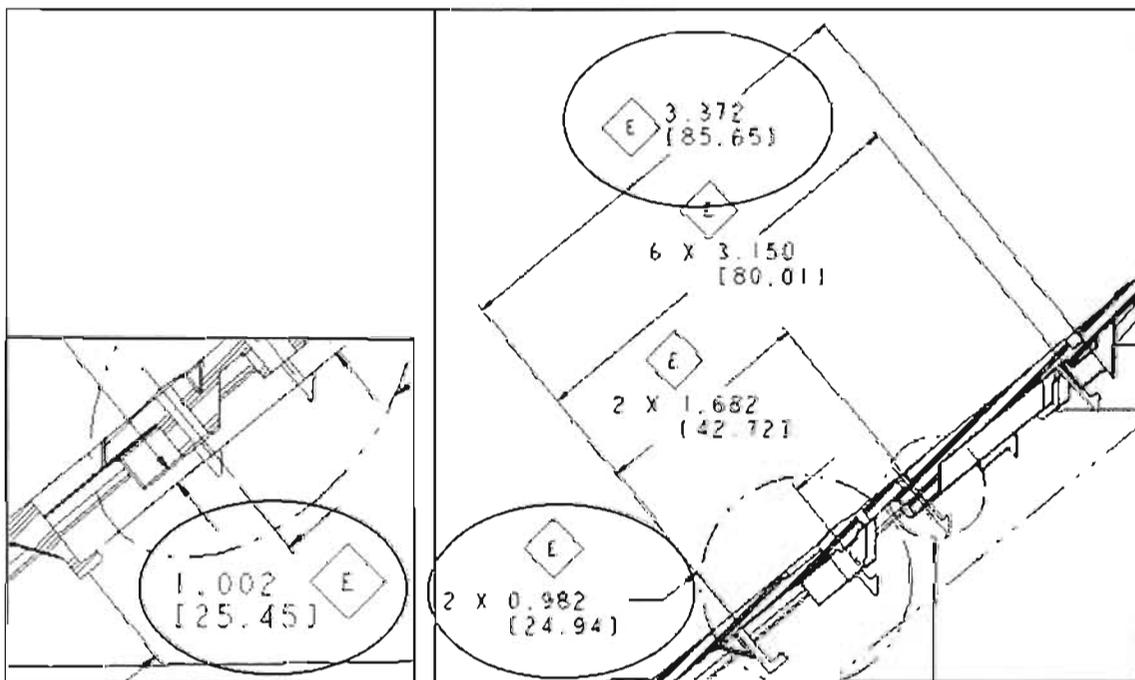


Figura 7.3 Valor nominal de la X7, X9 y X11 en el copete digital en la dirección "y"

## 7.2.3. VERIFICACIÓN DE LAS X's EN DIRECCIÓN "x"

Considerando las X's que intervienen en los gaps (G7, G8, G9 y G10) en **dirección "x"** en el copete, vemos que los valores de éstas efectivamente corresponden a las manejadas en los análisis de tolerancia del capítulo anterior. Las X's vitales correspondientes en esta dirección fueron: X14, X15, X18 y X19 con valores de 1.200", 2.400", 1.550" y 3.100", respectivamente, como pueden verse en la figura 7.4.

Cabe mencionar que con que se cuiden estos gaps críticos, se estará asegurando el posicionamiento adecuado de la tarjeta en la dirección "x", por lo que en el resto de snaps y soporte rígidos estos gaps pueden quedar holgados.

Una consideración importante en la etapa de verificación es que los CTQ's de la tarjeta control asociados a los gaps en la dirección "x" y "y" deberán medirse antes de la aplicación del *conformal coating*, ya que, en los análisis de tolerancia para los gaps en estas dos direcciones no se considera dicho recubrimiento. Solamente está considerado en el análisis de tolerancia para los gaps G1 y G2 en la dirección "z".

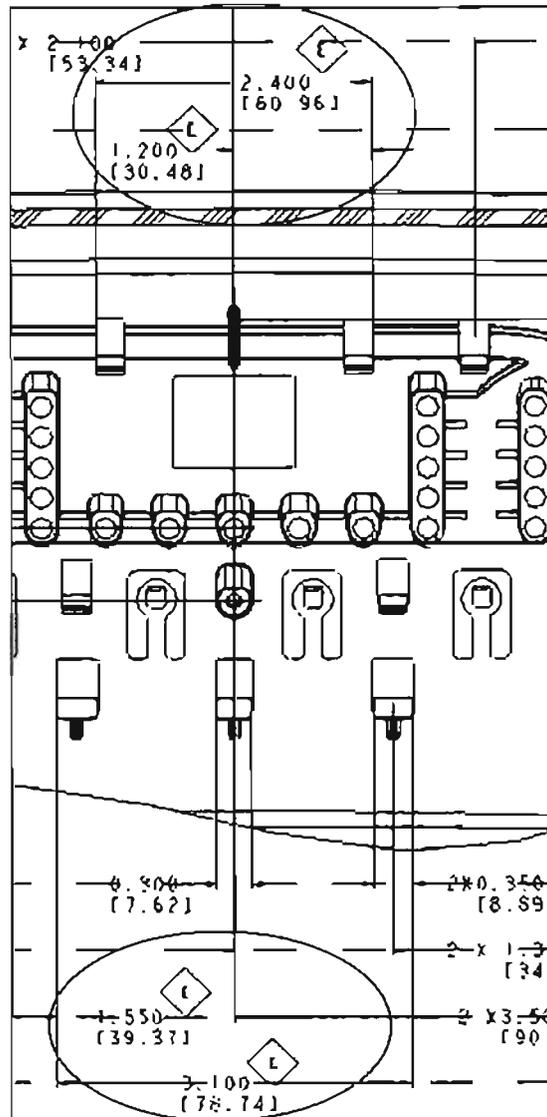


Figura 7.4 Valor nominal de la X14, X15, X18 y X19 en el copete digital en la dirección "x"

Una actividad muy importante en la etapa de verificación, además de revisar los planos de las partes, como ya se ha ilustrado en las figuras anteriores, es verificar que en la tabla de CTQ's de los layouts de las partes se encuentren todas las cotas que han sido definidas como críticas para la calidad, donde el criterio de aceptación al momento de realizar el reporte de primera pieza, será el nivel de "z" que se muestra en la tabla en lugar de las tolerancias.

Esta información se muestra en la tabla 7.1 como evidencia de que también ha quedado plasmado en los planos del copete digital.

REV. - CTQ TABLE											
TABLE REV IS ONLY UPDATED WHEN INFORMATION IN TABLE IS REVISED										DATA SOURCE	
SYM LOCATION			FEATURE	DIM	TOLERANCE		Z VALUE (SIGMA LEVEL)				A=ESTIMATE B=EXISTING DATA C=SIGMA DATA
PART	SHT	ZONE	DESCRIPTION		+	-	3	4	5	6	
P001	2	C7	FRONT WALL - BACK LIP HOR. DISTANCE	5.728	0.012	0.012	3.0				B
P001	2	C6	FRONTAL TAB - BACK LIP VERTICAL DISTANCE	1.877	0.009	0.009	3.0				B
P001	2	D7	SNAP'S HEAD - PCB SUPPORT DISTANCE	0.093	0.002	0.002	3.0				B
P001	2	D7	LOWER BOSS AXIS - RIGID SUPPORT WALL DISTANCE	1.002	0.004	0.004	3.0				B
P001	2	B8	RIGID SUPPORT WALL - LOWER SNAP WALL DISTANCE	0.982	0.004	0.004	3.0				B
P001	2	B8	RIGID SUPPORT WALL - PCB STOP WALL DISTANCE	3.372	0.004	0.004	3.0				B
P001	2	B8	RIGID SUPPORT WALL - MIDDLE SNAP WALL DISTANCE	1.682	0.004	0.004	3.0				B
P001	2	B8	RIGID SUPPORT WALL - UPPER SNAP WALL DISTANCE	3.150	0.004	0.004	3.0				B
P001	2	B5	DOME BUTTONS HEIGHT	0.020	0.002	0.002	3.0				B
P001	2	B5	PCB SUPPORT - BUTTONS FACE DISTANCE	0.205	0.002	0.002	3.0				B
P001	3	C3	LIP TO LIP LATERAL DISTANCE	24.956	0.015	0.015	3.0				B
P001	3	A5	LIP - SNAP VERTICAL DISTANCE	0.233	0.004	0.004	3.0				B
P001	3	D6	LOWER BOSS AXIS - UPPER LEFT LATERAL WALL SNAP HOR. DISTANCE	1.200	0.004	0.004	3.0				B
P001	3	D6	UPPER LEFT LATERAL WALL SNAP - UPPER RIGHT LATERAL WALL SNAP DISTANCE	2.400	0.004	0.004	3.0				B
P001	3	B6	LOWER BOSS AXIS - LEFT LATERAL WALL SUPPORT DISTANCE	1.550	0.004	0.004	3.0				B
P001	3	B6	LEFT LATERAL WALL SUPPORT - RIGHT LATERAL WALL SUPPORT DISTANCE	3.100	0.004	0.004	3.0				B
P001			COLOR	0.000	0.43	0.43	3.0				A
P001			SURFACE GLOSS	86	5	5	3.0				A
P001			COLOR DEGRADATION	NOTE 20			4.5				A
P001											

Tabla 7.1. CTQ's para las X's vitales de los copetes digitales

#### 7.2.4. VERIFICACIÓN DEL VALOR DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN LAS X's DEL COPETE DIGITAL

En esta etapa de verificación, se realizó un estudio inicial sobre las primeras muestras de herramental final del copete digital. Se hizo un estudio de estadística descriptiva de una característica dimensional cuya especificación era de 3.150" como se ilustra en la figura 7.5. El estudio fue realizado sobre los resultados de 180 mediciones de dicha característica en el copete digital. La media obtenida para esta dimensión fue de 3.14936 con una desviación estándar de 0.0006".

En la figura también se muestran los intervalos de confianza para la media, la desviación estándar (sigma) y para la mediana.

Independientemente de si los datos se ajustan o no a una distribución normal, lo que puede concluirse al ver estos resultados es que sí existe la capacidad por parte del proceso para alcanzar desviaciones del orden de 0.0007", valor que se manejó en los análisis de tolerancia en la etapa de optimización (capítulo 5) y con lo que quedan validados dichos análisis respecto a este parámetro.

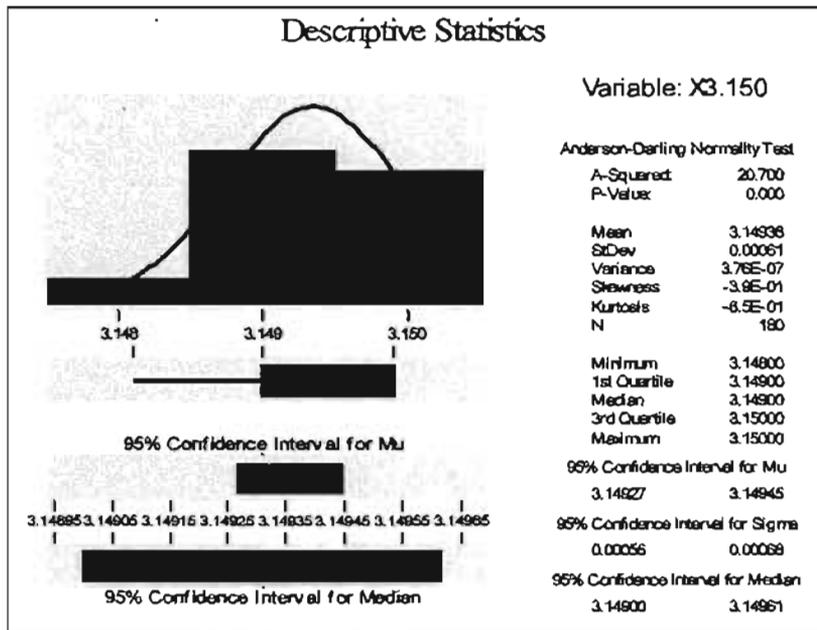


Figura 7.5. Estadística descriptiva para una  $X=3.150$ "

### 7.3. VERIFICACIONES EN TARJETA DE CONTROL

Como no está dentro del alcance de este proyecto el diseño detallado de la tarjeta de control, se presenta aquí simplemente las variables que influirán sobre la ensamblabilidad y funcionalidad de la misma, quedando identificadas y definidas como CTQ's a cuidar en el momento de la liberación de esta parte.

Los CTQ's para las X's vitales relacionadas a la *ensamblabilidad* y *funcionalidad* que deberán aparecer en los planos de las tarjetas para copetes digitales se muestran en la figura 7.6.

Como se puntualizó anteriormente, de todos los CTQ's de la tarjeta control, los únicos que deberán medirse con el *conformal coating* ya aplicado por ambos lados de la tarjeta son los correspondientes a X1 (espesor de tarjeta con *conformal coating*) y X4 (altura del microswitch medido desde la superficie del *conformal*), el resto de los CTQ's deberá medirse antes de la aplicación de dicho recubrimiento.

Los CTQ's señalados como EXTRAS, son dimensiones que aunque no fueron consideradas en los análisis de tolerancias, son igualmente importantes para garantizar el mayor agarre de los snaps sobre la tarjeta, lo que nos permitiría prescindir de los tornillos, uno de los objetivos de este proyecto.

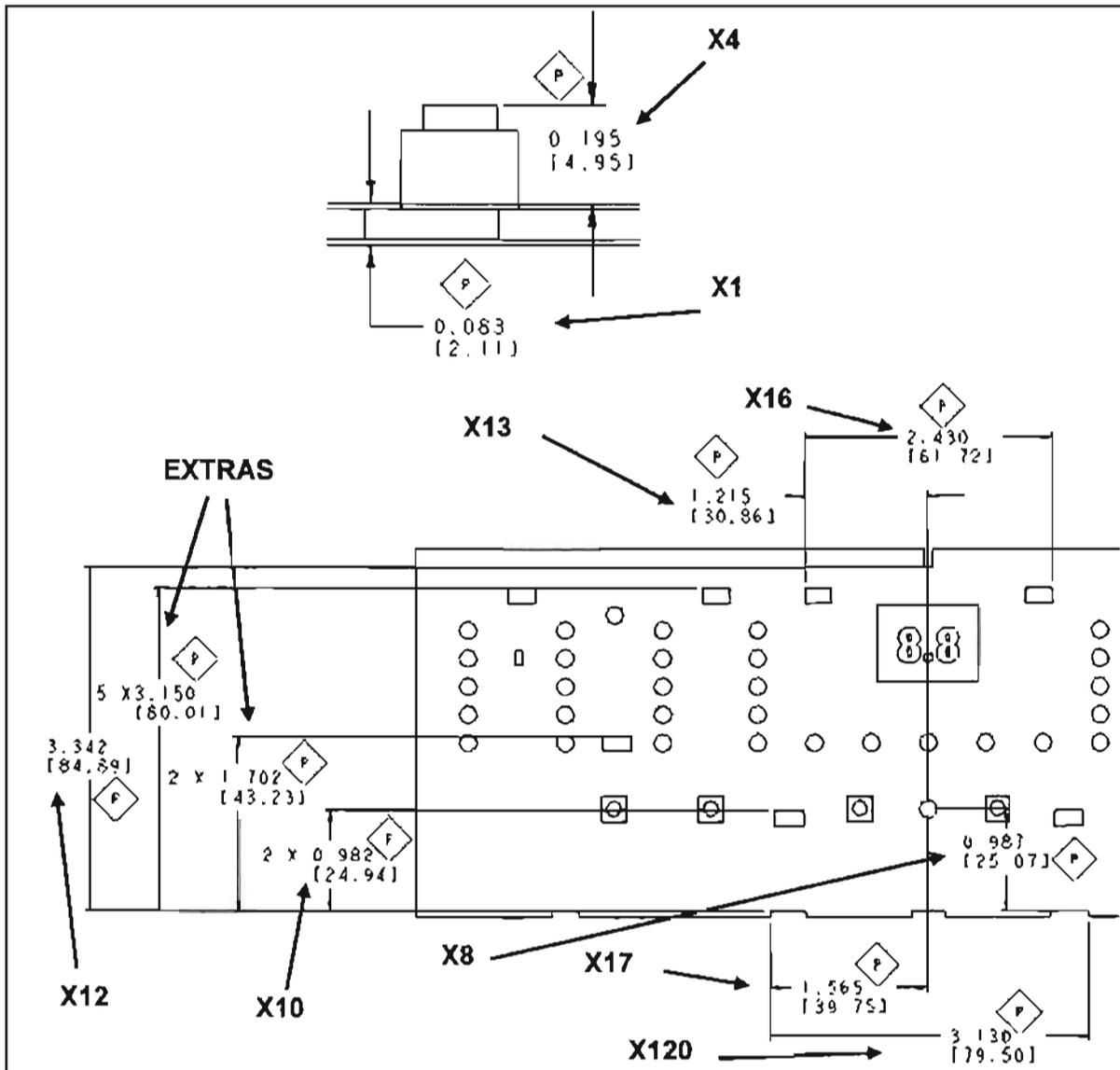


Figura 7.6. CTQ's que deberán aparecer en los planos de la tarjeta

Uno de los aspectos que pudo verificarse para la tarjeta de control hasta la etapa DC (*Design Confirmation* del proceso NPI) del proyecto es el tipo de distribución que podemos esperar para la X1, mediante el estudio de esta característica en una tarjeta de control similar a la que utilizaremos en este proyecto. Hablamos de la tarjeta unificada que se usa en los modelos actuales.

Como en la etapa de Optimización se hacen los análisis de sensibilidad asumiendo que las distribuciones de las X's son normales, lo primero que se trata de verificar en este caso es que la X1 (espesor de tarjeta con conformal) presente ese tipo de distribución. Para ello se toman mediciones de esta variable en 50 tarjetas y se hacen pruebas de normalidad en Minitab®.

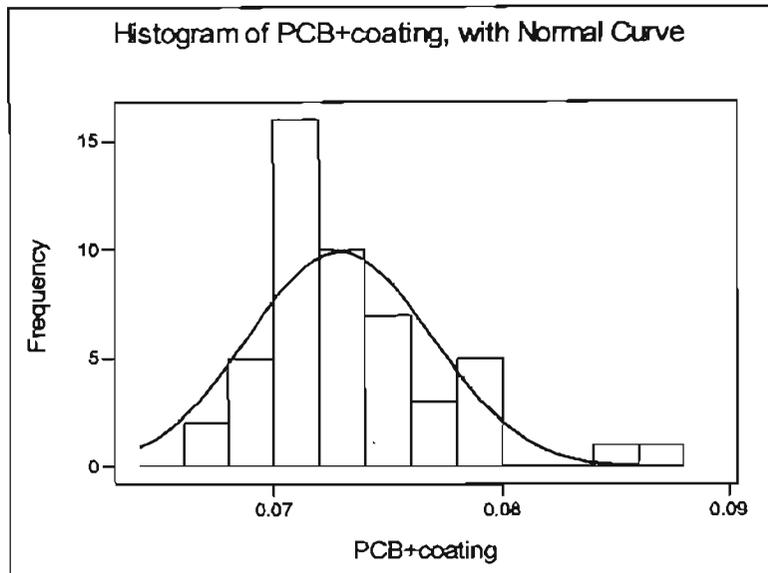


Figura 7.7. Histograma de los datos de espesor de tarjeta con *conformal coating*

En el estudio de normalidad de los datos de espesor de tarjeta, lo primero que se hace con los 50 datos es representarlos con un histograma (Figura 7.7) donde se ve que aparentemente los datos siguen una distribución normal con un ligero sesgo a la derecha, pero no se tiene una evidencia estadística de ello. Por lo tanto se procede a aplicar las pruebas de normalidad disponibles en Minitab®.

Las pruebas de normalidad disponibles en Minitab® pueden seguir diferentes criterios como son los de Anderson Darling, Ryan Joiner y Kolmogorov Smirnov [11]. Estos criterios son pruebas de bondad de ajuste, es decir, qué tan bien un conjunto de datos se ajusta a una distribución normal. Minitab® hace los cálculos internamente y arroja los resultados de acuerdo al criterio seleccionado.

Lo que en realidad se realiza es una prueba de hipótesis (ver apéndice B), donde la hipótesis nula ( $H_0$ ) es que los datos siguen una distribución normal. El p-valor será el que nos indique si se acepta o se rechaza la hipótesis nula con un riesgo  $\alpha$  del 5% (0.05). El p-valor calculado puede variar dependiendo de la prueba de bondad de ajuste que se esté empleando.

Los paquetes de programas de computadora se emplean con frecuencia para la prueba de hipótesis estadística, en nuestro caso, utilizamos el Minitab®. Este programa calcula y presenta la probabilidad de que la estadística de prueba tomará un valor al menos tan extremo como el valor observado en ella cuando  $H_0$  es verdadera. Esta probabilidad suele llamarse el valor de  $P$  o bien p-valor. Éste representa el nivel de significación más pequeño que conduciría al rechazo de  $H_0$ . En consecuencia, si  $P = .04$  se presenta en la salida del Minitab®, la hipótesis nula se rechazaría en el nivel de  $\alpha = .05$  pero no en el  $\alpha = .01$ . En general si  $P$  es menor o igual que  $\alpha$ , rechazaríamos  $H_0$ , en tanto que si  $P$  supera a  $\alpha$  no rechazaríamos  $H_0$ .

No siempre es fácil calcular el valor exacto de P de una prueba. Sin embargo, para las pruebas de las distribuciones normales es relativamente simple. Si  $Z_0$  es el valor calculado de la estadística de prueba Z, entonces el p-valor es:

$$p - \text{valor} = \begin{cases} 2[1 - \Phi(|Z_0|)] & \text{para una prueba de dos colas} \\ 1 - \Phi(Z_0) & \text{para una prueba de cola Superior} \\ \Phi(Z_0) & \text{para una prueba de cola Inferior} \end{cases}$$

Como puede verse en las figuras 7.8 y 7.9, la prueba de normalidad de acuerdo a los criterios de Anderson Darling y Ryan-Joiner no es aceptable, ya que con dichos criterios se obtienen p-valores menores a 0.05, que es el valor máximo que Mabe está dispuesto a poner como riesgo.

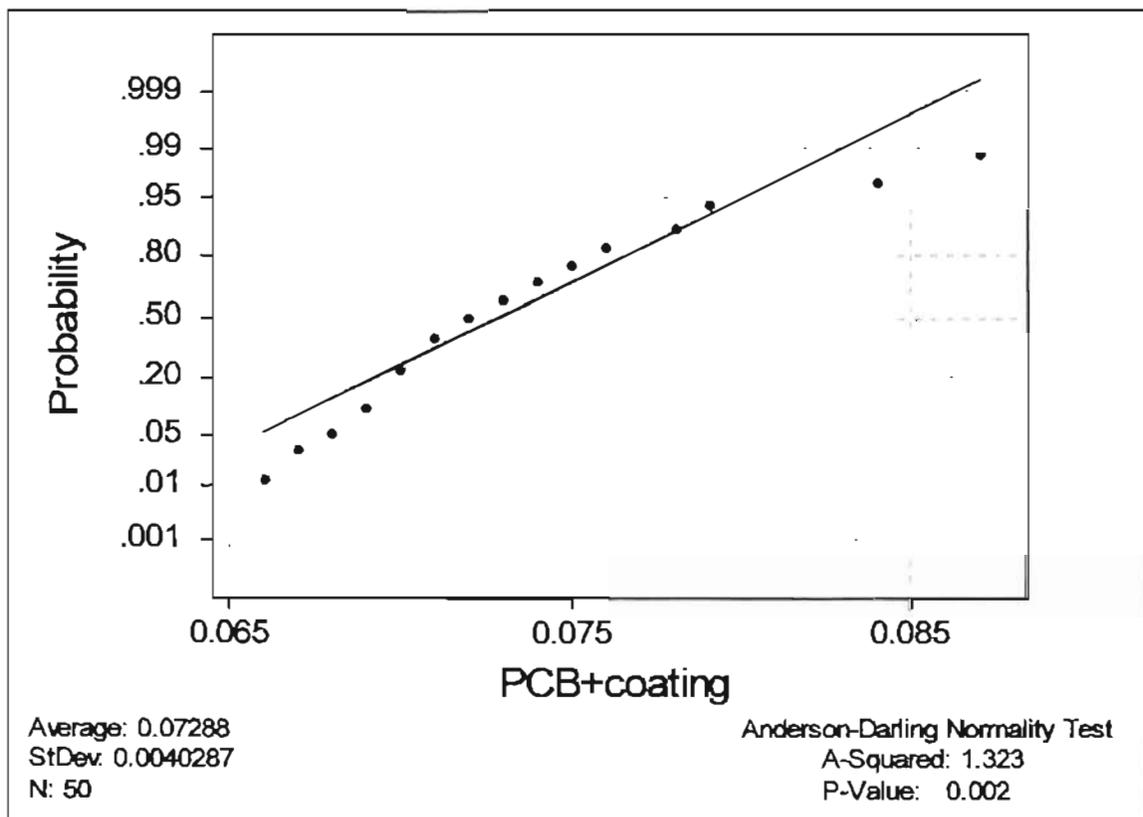


Figura 7.8.- Prueba de Normalidad de espesor de tarjeta con conformal coating usando el criterio de Anderson Darling

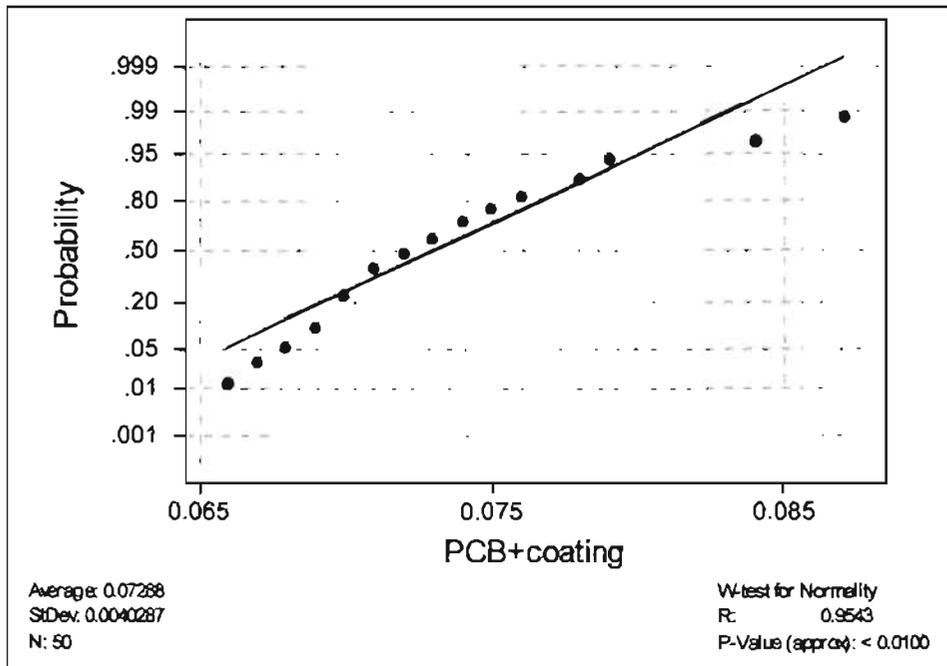


Figura 7.9.- Prueba de normalidad del espesor de tarjeta con conformal coating usando el criterio de Ryan-Joiner

Sin embargo, al utilizar el criterio de Kolmogorov Smirnov (figura 7.10), los datos pasan la prueba de normalidad con un p-valor >0.15, con la que se avala que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos de espesor de tarjeta siguen una distribución normal y que por tanto los análisis con esta suposición son válidos.

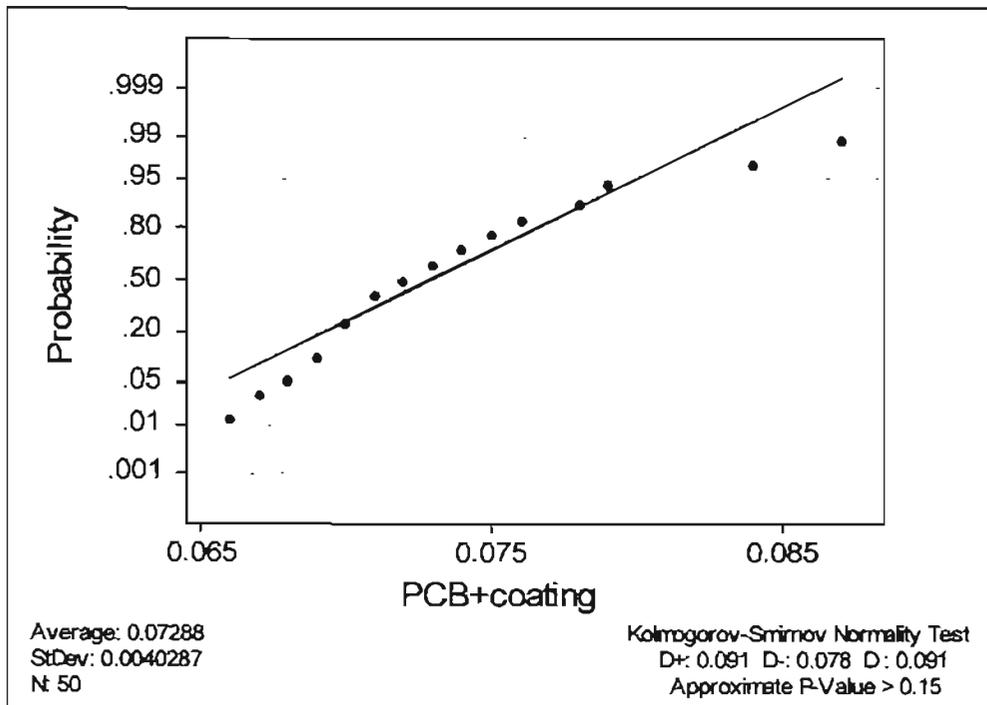


Figura 7.10.- Prueba de normalidad de espesor de tarjeta con conformal coating usando el criterio de Kolmogorov-Smirnov

A pesar de que con esta última prueba de bondad de ajuste se asume normalidad, es importante remarcar que las pruebas de Anderson Darling y la de Ryan-Joiner (Similar a la de Shapiro-Wilk) son de mejor calidad y más poderosas. En general, las comparaciones de pruebas de bondad de ajuste son basadas en estudios de simulación de Montecarlo, debido a que comparaciones analíticas no son factibles. En la figura 7.11 se presenta un estudio de la tarjeta unificada actual, donde puede verse que de acuerdo al criterio de Anderson Darling y con un riesgo  $\alpha$  del 5% la prueba de normalidad del espesor de tarjeta con *conformal coating* no se pasaría. Sin embargo, el dato que más nos interesa en este caso, es el valor de la desviación estándar el cual fue de 0.004". En los análisis de tolerancias realizados en la fase de optimización (capítulo 5), se especifica por diseño que la X1 (espesor de tarjeta) debe tener una desviación estándar de 0.002".

No obstante que la tarjeta del estudio de la figura 7.11 no es exactamente la que se usará en este proyecto, nos da un indicio de cómo podríamos esperar que fuera la nuestra, por lo que habrá de trabajarse muy arduamente en el control del proceso de nuestro proveedor de tarjetas para poder alcanzar las especificaciones y con ello los niveles de Z que se predicen para los gaps G1 y G2 donde interviene esta variable.

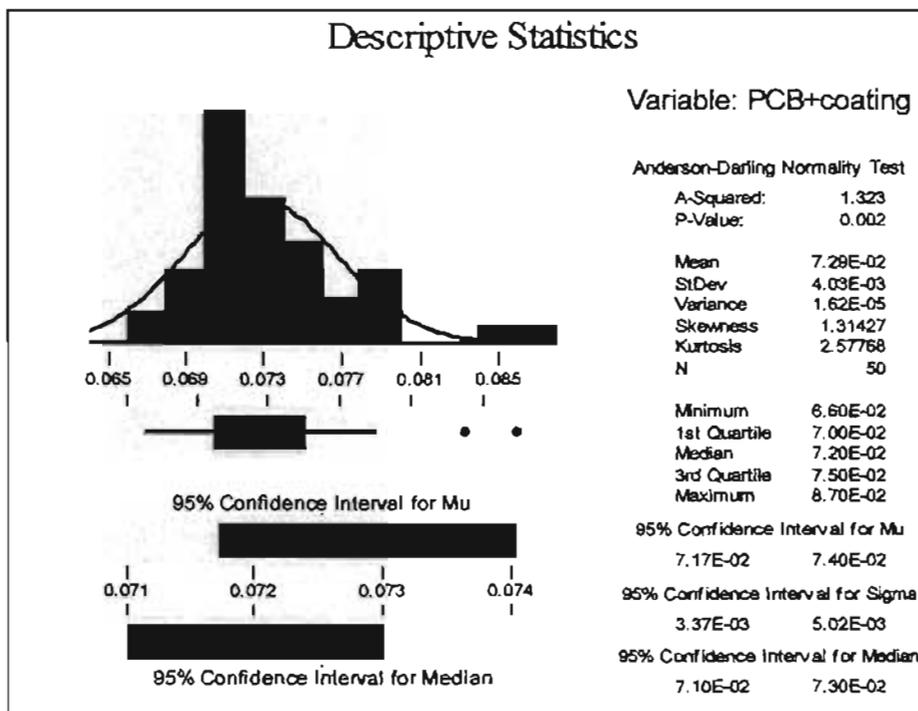


Figura 7.11. Estadística descriptiva de los datos de espesor de tarjeta con *conformal coating*

---

## 7.4. VERIFICACIÓN DE CTQ EN OVERLAY

El CTQ relacionado a la funcionalidad de la tarjeta control que deberá cuidarse en los planos del **overlay** (maylar) es la altura de la burbuja, identificada como X5 en los análisis de tolerancia con un valor nominal de 0.025", como se muestra en la figura 7.12

Eventualmente, este valor podría cambiar a uno mayor. Se especificaron 0.025" ya que a la fecha es lo máximo que el proveedor ha demostrado que puede darnos. Un valor mayor nos ofrece ventajas, ya que se puede tener mayor carrera en el accionamiento de los botones y esto se traduce a una mayor seguridad en la activación de los microswitches; sin embargo, de lograrse esto, habría que ajustar también la altura del domo del botón en el copete (X6), lo cual no sería complicado en el molde teniendo en cuenta que solo tendría que erosionarse el mismo en esas zonas, en la misma proporción en que pueda crecer la altura de la burbuja.

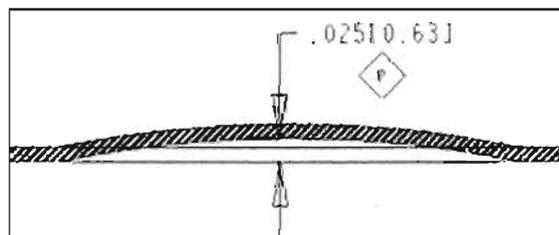


Figura 7.12. CTQ a cuidar en el overlay o maylar

## 7.5. VERIFICACIÓN DE AHORROS POR REDUCCIÓN EN NUMEROS DE PARTE

Uno de los objetivos principales de este proyecto fue lograr la reducción de números de parte, buscando con ello beneficios económicos para la empresa, mayor productividad en las líneas de ensamble y menos variables que nos afecten en la *ensamblabilidad* y *funcionalidad* de la tarjeta de control de los modelos digitales.

Con base en lo anterior, y con el fin de justificar este proyecto, se diseñó el copete digital de tal forma que pudiera prescindirse de la botonera y de tornillos para sujetar la tarjeta control al copete digital, como puede observarse en las figuras 7.13 y 7.14 donde se ilustran los componentes tanto del ensamble del copete para lavadoras digitales actuales como el correspondiente a los modelos del nuevo proyecto, respectivamente.

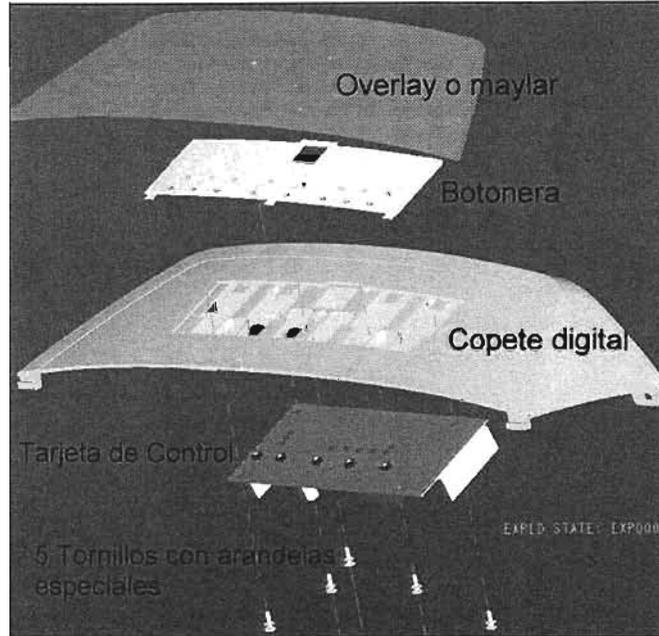


Figura 7.13. Componentes del ensamble final del copete digital para modelos de lavadoras digitales actuales

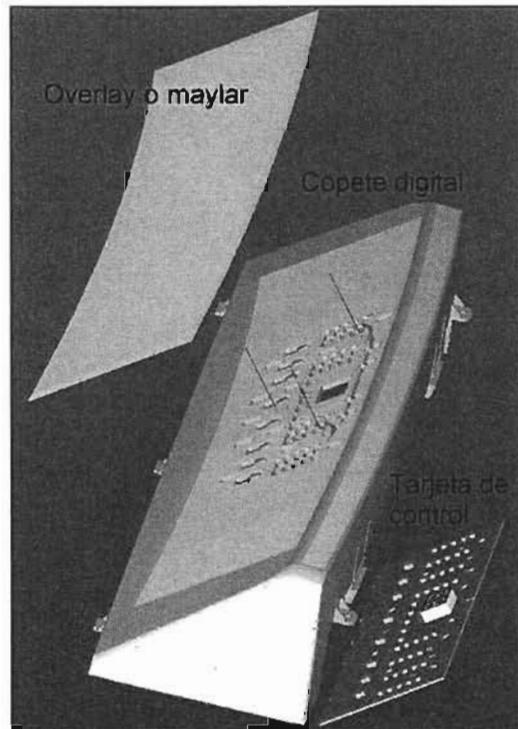


Figura 7.14. Componentes del ensamble final del copete digital para lavadoras del nuevo proyecto

---

Con esto, se hace el análisis del ahorro que eventualmente se tendría por la reducción de números de parte en el ensamble copete digital de este proyecto, comparado contra los modelos que se encuentran actualmente en producción. Se hace esta comparación solo como un marco de referencia, ya que el análisis se podría realizar comparando con otros modelos anteriores o modelos que se desarrollan paralelamente a éste.

El volumen de producción de modelos digitales proyectado para el 2004 fue de 37254 unidades. Considerando que se tiene un ahorro de 1.1943 dólares por eliminación de 5 tornillos y una botonera, el ahorro anualizado que se tendría por la implementación del copete digital desarrollado en este proyecto es de 44,492.45 dólares. Esto sin considerar los ahorros por no inversión en herramientas, tiempos de ensamble, manejo de inventarios, etc.

Se considera que si el concepto manejado en el diseño del copete digital con botonera integrada y sin tornillos se implementa para los modelos actuales podría también generar ahorros cercanos a los 50,000 dólares teniendo en cuenta el volumen de producción que se tiene hoy día de dichos modelos.

Vemos así una clara rentabilidad de este proyecto para Mabe, al menos en este subsistema, ya que además de alcanzar beneficios económicos, al mismo tiempo se puede garantizar una buena calidad de estos productos y el desarrollo de los mismos en tiempos relativamente cortos.

## **7.6. VERIFICACIÓN DE ENSAMBLE CON PRIMERAS MUESTRAS DEL HERRAMENTAL FINAL**

Una vez que contamos con las primeras piezas del herramental final se procederá a verificar que se estén cumpliendo con cada una de las especificaciones identificadas como CTQ's para esta parte. Se mandarán a metrología 30 partes, con los que se deberá hacer el estudio.

Se hacen los primeros ensambles del copete digital con prototipos de la tarjeta de control y del overlay, y los resultados son aceptables para poder correr la Confirmación de Diseño (DC – *Design Confirmation* del NPI); sin embargo se detecta que el prototipo de la tarjeta no cumple aún en su totalidad las especificaciones dimensionales. Esto deberá evitarse en las tarjetas definitivas para alcanzar el ensamble que se ha predicho en este proyecto y alcanzar así los objetivos de *funcionalidad y ensamblabilidad*.

En las figuras 7.15 a 7.18 se muestra la evidencia de los primeros ensambles del copete digital con el overlay y con la tarjeta de control.

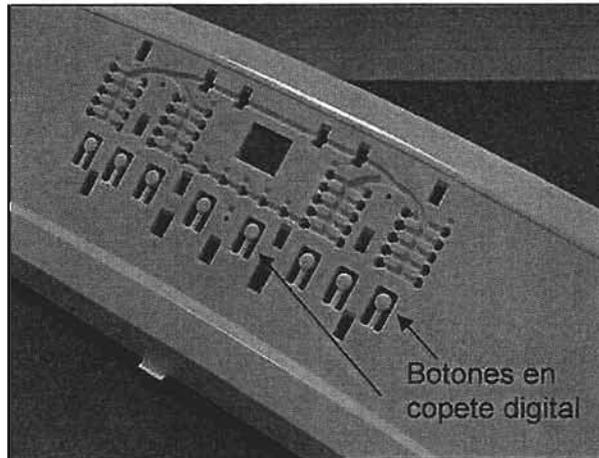


Figura 7.15.- Copete digital de las primeras inyecciones del proveedor del herramental

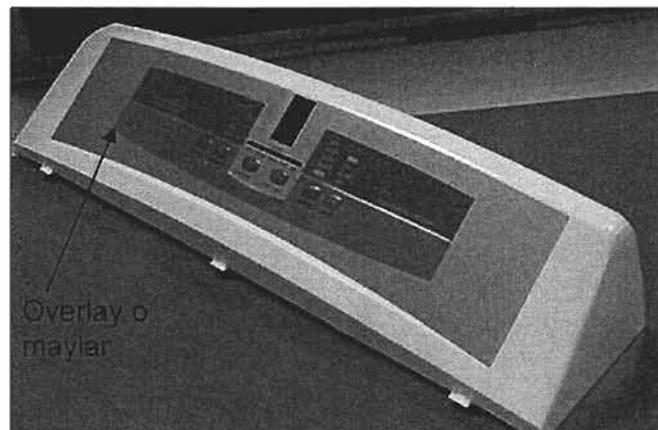


Figura 7.16.- Ensamble del overlay con el copete digital

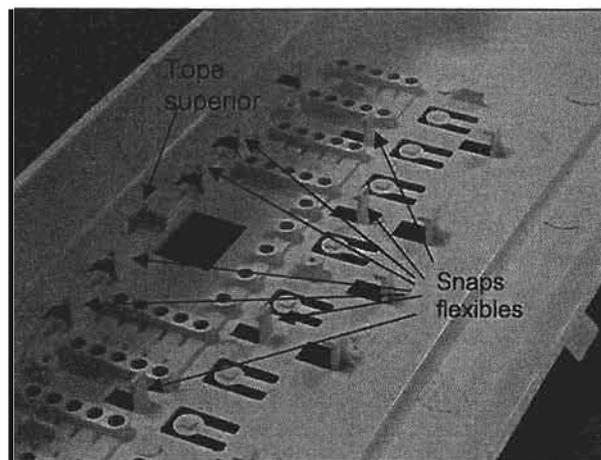


Figura 7.17 Snaps flexibles y tope superior en el copete digital

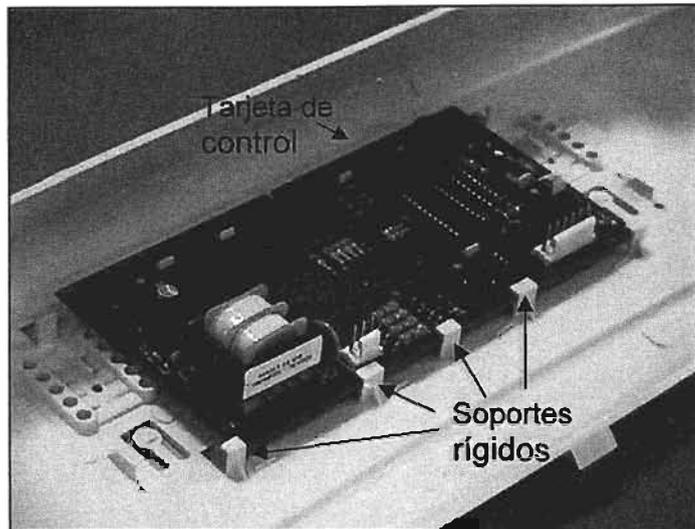


Figura 7.18.- Ensamble de tarjeta de control con el copete digital

## 7.7. VALIDACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE BOTONES EN PRUEBAS DE VIDA

Con las primeras muestras de los copetes digitales, overlays y prototipos de la tarjeta de control se armaron 3 ensambles para pruebas de confiabilidad con el fin de determinar la vida útil de los componentes del ensamble, poniendo especial atención en el copete.

### Descripción de la prueba:

Se colocan los actuadores neumáticos con la pieza de sujeción atornillada al copete, de tal forma que la activación de los botones sea perpendicular a la cara frontal de dicho componente (Figura 7.19). La distancia de separación entre la parte inferior del actuador y el overlay es de 2.5 mm. La presión del aire para el funcionamiento del dispositivo se ajusta a 5 kg/cm<sup>2</sup>, simulando una fuerza de activación de 4 kg. El tiempo de activaciones es de 4 segundos.

Se coloca el dispositivo con el ensamble copete dentro de la cámara de humedad y temperatura con las siguientes características: ciclos de 0° C durante 1:30 hrs y 50°C durante las siguientes 1:30 hrs, humedad relativa de 80% en ambos niveles de temperatura.

Número de ciclos de la prueba: 12500 activaciones en cada botón del copete

El ensamble consta de copete, tarjeta y overlay (cero tornillos)

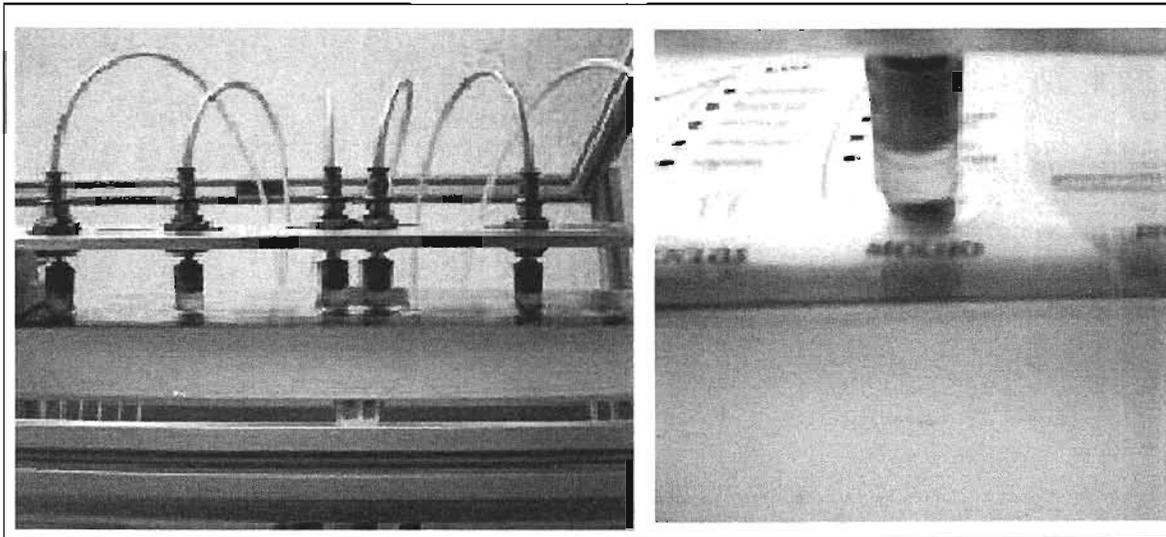


Figura 7.19. Dispositivo de prueba y ubicación de actuadores

### Resultados de la prueba:

Ciclo	Copete 1	Copete 2	Copete 3
10000	OK	OK	OK
11000	Base botón 1 fisurada	Soporte inferior derecho fisurado. Base botón 7 fisurada	Base botones 1,7,8 fisuradas. Soporte inferior derecho fisurado
12500	Soporte central derecho fisurado		

### Análisis de resultados:

Los 12500 ciclos que dura la prueba, simulan 10 años de vida del producto o componente a evaluar. De acuerdo a la NOM-005-2000 [12] las pruebas deben considerar el uso de la lavadora con 8 cargas semanales, que equivalen a 416 cargas o ciclos de lavado completo anuales. En cada ciclo de lavado se consideran 3 activaciones de cada botón del copete, por lo que se obtendría un total de 1248 (1250 en números redondos) activaciones al año.

Se considera que un componente ha fallado cuando deja de cumplir con las funciones para la que fue diseñado de acuerdo al DBF. Las fisuras que aparecen en la base de los botones (figura 7.20) no impiden que el copete siga cumpliendo con su función, es decir, a pesar de las grietas observadas a los 11000 ciclos (8.8 años de vida), el botón sigue activando los controles de manera normal hasta los 12500 ciclos.

El tiempo de garantía que actualmente se otorga para las lavadoras automáticas es de un año, por lo que con base en los resultados de las pruebas de confiabilidad puede asegurarse que la compañía no tendrá que cubrir gastos por este concepto en el copete digital.

Las fallas en la base de las boboñeras ocurren en las de los extremos.

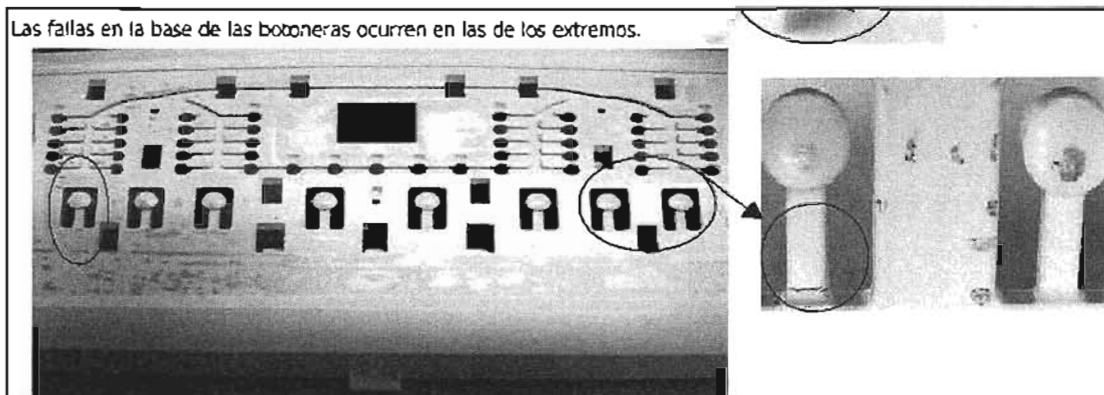


Figura 7.20.- Fisuras en las bases de los botones

---

# **8. CONCLUSIONES**

---

---

A la fecha, y por lo que se ha visto en los análisis realizados, las X's vitales de la tarjeta control son a las que habrá de ponerles especial atención, ya que las desviaciones en el proceso pueden llegar a ser mayores a las requeridas por diseño, como pudo verse en el estudio realizado con un tarjeta similar y por tanto, los resultados obtenidos podrían ser inaceptables. Así que, en caso de que existieran dificultades para cumplir con las especificaciones para esta parte, deberá trabajarse arduamente para mejorar el proceso en la aplicación del *conformal coating*. La aplicación de herramientas de control estadístico de procesos y posteriormente la optimización del mismo podrán ayudar a alcanzar los objetivos. El costo que esto pudiera originar sería absorbido y rebasado por los ahorros que este proyecto representa.

Sin embargo, de acuerdo a los primeros resultados obtenidos en los ensambles de copete digital corridos en la confirmación de diseño, se augura que este proyecto será exitoso, ya que a pesar de que el prototipo de la tarjeta no se encuentra al 100% en el cumplimiento de las especificaciones, lo mismo que los overlays, la *FUNCIONALIDAD* de la tarjeta, desde el punto de vista interfase con el usuario, es completamente satisfactoria.

Más aún, la flexibilidad que presenta el diseño del copete digital al dejarlo preparado junto con la tarjeta para que puedan utilizarse 3 tornillos en caso de un mal control en el proceso de recubrimiento de esta última, **asegura** la *ensamblabilidad* y *funcionalidad* de la tarjeta control junto con el copete y el overlay, que fue a fin de cuentas el principal objetivo de este proyecto.

A un año de implementado este proyecto y habiéndose comprobado su rentabilidad por los ahorros que se originaron al usar un concepto diferente en el diseño de copetes digitales, se decidió hacer una inversión para aplicar el concepto de copetes con botonera integrada en los modelos actuales. Se fabricaron dos nuevos instrumentales, uno para copetes de 8 kg, y otro para 10 kg.

En las figuras 8.1 y 8.2 se muestra el cambio en los diseños de copetes digitales para modelos actuales, con lo que se hace extensivo los beneficios de tener un ensamble con menor número de partes, menor pasos en el ensamble y menor costo en materiales, además de que con esto se reducen problemas de calidad relacionados con la activación de los microswitches que anteriormente se tenían.

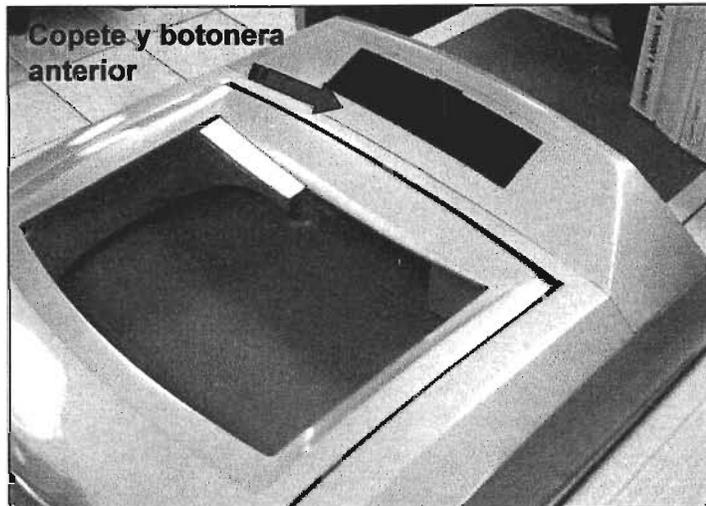


Figura 8.1.- Ensamble copete anterior con botonera y tornillos



Figura 8.2.- Ensamble de nuevo copete con botonera integrada y sin tornillos

Al finalizar la implementación del proyecto de desarrollo de la nueva lavadora automática de 10 y 12 kg, y específicamente el desarrollo del soporte controles para modelos digitales, en resumen se pueden tener las siguientes conclusiones:

- La ensamblabilidad del copete y la funcionalidad de la tarjeta de control para responder las instrucciones del usuario fueron satisfactorios, de acuerdo a los ensambles y pruebas de desempeño realizados con unidades de corridas pre-piloto.
- No fue necesario emplear tornillos para sujetar la tarjeta al copete y se pasaron satisfactoriamente las pruebas de transporte y embalaje, así como

---

las pruebas de confiabilidad del componente, con lo que se hace efectivo el cálculo de ahorros por reducción de números de parte.

- Los ahorros generados en el diseño del copete digital de este proyecto (45,000 dólares anuales aproximadamente) detonaron un proyecto para implementar el mismo concepto en los modelos actuales. Para ello, se construyeron nuevos herramientas de copetes digitales con botonera integrada en dichos modelos donde se espera tener ahorros por arriba de 50,000 dólares anualmente.
- Se conservó este concepto de diseño de copetes digitales en un proyecto posterior debido a que se demostró su factibilidad y buen desempeño en el proyecto actual. Esto repercutió en el tiempo de desarrollo del diseño de copetes digitales, ya que simplemente se toma el concepto de montaje de tarjetas sin necesidad de tornillos y solo se adecuan a las nuevas apariencias.
- Las pruebas de vida hechas para la liberación del diseño final del copete digital indican que este componente tendrá un desempeño satisfactorio hasta por lo menos 10 años, con lo que se cubren y rebasan las expectativas del cliente.
- La metodología del DFSS (en este caso IDOV) combinado con herramientas de ingeniería como software CAD/CAE y las recomendaciones establecidas por el diseño para manufactura y ensamble (DFM & DFA) permitieron que se tuviera una implementación exitosa del proyecto *“Diseño para Seis Sigma en el Diseño de Soporte Controles Digital para lavadoras Automáticas”*.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Spreadsheets Copyright protected  
by Maurice Berryman GE PROPRIETY  
Release: 02-Jun-97, rev. 2<sup>a</sup>
- 2.- GEA Platics Database  
by Joe Henz GE PROPRIETY  
5/28/96
- 3.- Herramientas Seis Sigma GE Apliances  
by Mikel Harry & GEA Master Black Belts  
Rev. 2.1, Feb, 1998
- 4.- Design Guide GE Plastics  
Release 05/1997
- 5.- Designing With Plastics The Fundamentals  
Hoechst Celanese Corporation  
Engineering Plastics Division
- 6.- Manual de Entrenamiento en Seis Sigma  
GE Appliances Copyright 1997  
Rev. 9.1, 20 de Abril de 1999
- 7.- *"The Mechanical Design Process"*,  
*Ullman, G., D.,*  
*Ed. McGraw-Hill Inc. International, Edition 1992*
- 8.- MIL-STD-1629A MILITARY STANDARD  
Procedures For Performing A Failure Mode, Effects And Criticality Analysis  
AMSC N3074 FSC RELI, DEPARTMENT OF DEFENSE  
Washington, DC 20301. 24 NOV 1980
- 9.- Access Entitlement GE Database  
Center of Research and Development  
1999 Rev. 3
- 10.- Design for Manufacturing  
*J. Pearse and H.W. Stoll*  
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, SME, Dearborn, MI, 1989
- 11.- Probabilidad y Estadística para Ingeniería  
William W. Hines, Douglas C. Montgomery  
CECSA, Tercera Edición 1993
- 12.- Norma Oficial Mexicana NOM-005-ENER-2000  
Eficiencia Energética de Lavadoras de Ropa Electrodomésticas.  
Límites, Métodos de Prueba y Etiquetado

---

# APÉNDICE A

---

---

## A.1. CÁLCULOS BÁSICOS DE SIGMA

Es importante entender los cálculos fundamentales de las probabilidades de defecto usados a través de este proyecto y las diferentes formas en que éstas pueden ser representadas y expresadas.

Entre, los cálculos básicos que se aplican directa o indirectamente en este proyecto están:

- **Uso de la tabla de la distribución normal para determinar las probabilidades de los defectos**
- **cálculos apropiados de defectos para 1 extremo o 2 extremos**
- **Aplicación del concepto de cambio (shift) de proceso para las predicciones de probabilidad**
- **Conversión de datos entre corto plazo y largo plazo**
- **cálculos de DPU, dpmo,  $Z_{ST}$ ,  $Z_{LT}$ .**

## A.2. LA DISTRIBUCIÓN NORMAL Y LA NORMAL ESTANDAR

La distribución normal es en muchos aspectos la piedra angular de la estadística. Se afirma que una variable aleatoria  $X$  tiene una distribución normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2 > 0$  si tiene la función de densidad

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)((x-\mu)/\sigma)^2} \quad -\infty < x < \infty$$

La distribución normal se emplea de manera tan amplia que a menudo se recurre a la notación abreviada  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  para indicar que la variable aleatoria  $X$  se distribuye normalmente con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

### A.2.1. PROPIEDADES DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución normal tiene varias propiedades importantes:

1.  $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
2.  $f(x) \geq 0$  para todo  $x$
3.  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$  y  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$
4.  $f[(x+\mu)] = f[-(x-\mu)]$ . La densidad es simétrica alrededor de  $\mu$ .
5. El valor máximo de  $f$  ocurre en  $x = \mu$ .
6. Los puntos de inflexión de  $f$  están en  $x = \mu \pm \sigma$

## A.2.2. DISTRIBUCIÓN NORMAL ACUMULATIVA

La función de distribución F es

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)[(x-\mu)/\sigma]^2} du$$

Es imposible evaluar esta integral sin recurrir a los métodos numéricos e incluso en este caso, la evaluación tendría que llevarse a cabo para cada par  $(\mu, \sigma^2)$ . Sin embargo, una simple transformación de variables  $z=(x-\mu)/\sigma$ , permite que la evaluación sea independiente de  $\mu$  y  $\sigma$ . Esto es,

$$F(x) = P(X \leq x) = P\left(Z \leq \frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^{(x-\mu)/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz = \int_{-\infty}^{(x-\mu)/\sigma} \varphi(z) dz = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

## A.2.3. LA DISTRIBUCIÓN NORMAL ESTÁNDAR

La distribución de probabilidad en la ecuación anterior

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \quad -\infty < z < \infty$$

es una distribución normal con media 0 y varianza 1; es decir,  $Z \sim N(0,1)$ , y afirmamos que Z es una distribución normal estándar.

Para poder calcular las probabilidades de defectos, a menudo será necesario hacer una transformación de nuestros datos originales que presenten una distribución normal con cierta media  $\mu$  y cierta desviación estándar  $\sigma$  a una distribución Normal Estándar.

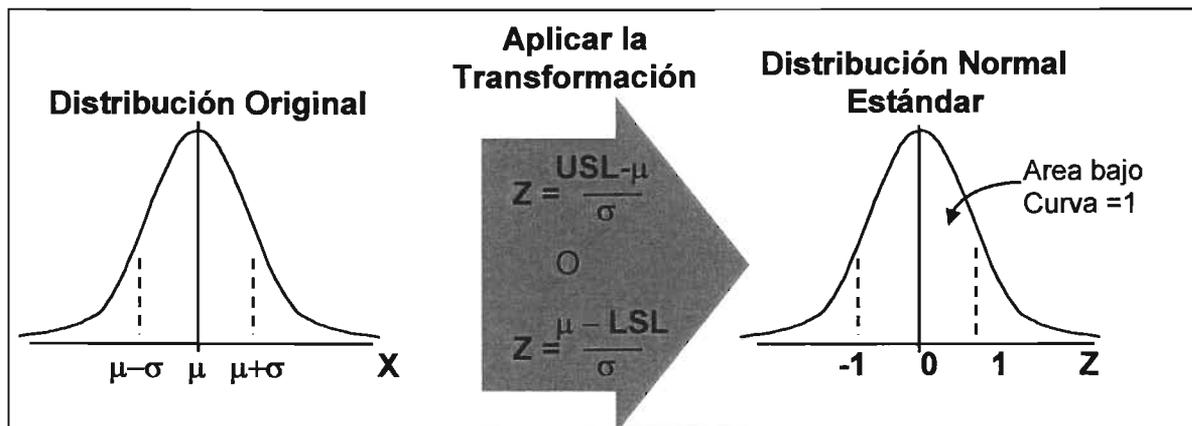


Figura A.1. Transformación de una distribución normal  $N(\mu, \sigma)$  a una normal estándar  $N(0, 1)$

Si se puede calcular Z, entonces se puede determinar la probabilidad de defectos, la cual será equivalente al área bajo la curva que se encuentre a la derecha del valor crítico de tablas, como se muestra en la figura A.2.

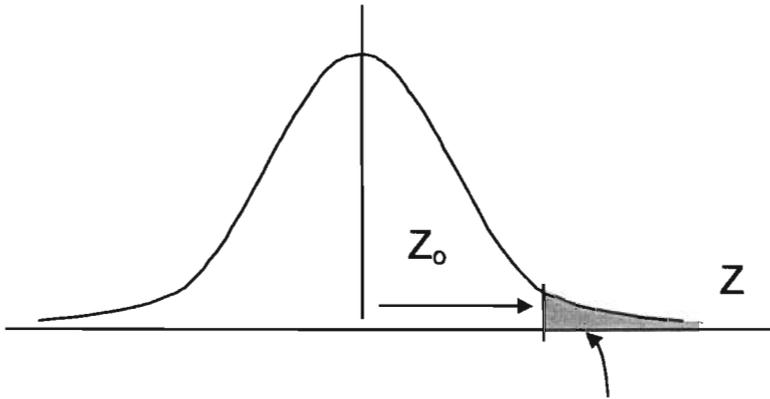
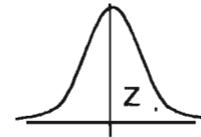


Figura A.2. Área bajo la curva es la probabilidad,  $Z > Z_0$ .

Para encontrar el valor de probabilidad buscado, hay que encontrar el valor correspondiente a  $Z$  en las tablas de distribución Normal, por ejemplo, para un valor de  $Z=0.97$ , la probabilidad de defecto asociado a este valor será de  $1.66 \times 10^{-1}$  o en porcentaje 16.6%, como puede verse en la figura A.3

### Distribución Normal



Z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	5.00E-01	4.96E-01	4.92E-01	4.88E-01	4.84E-01	4.80E-01	4.76E-01	4.72E-01	4.68E-01	4.64E-01
0.1	4.60E-01	4.56E-01	4.52E-01	4.48E-01	4.44E-01	4.40E-01	4.36E-01	4.33E-01	4.29E-01	4.25E-01
0.2	4.21E-01	4.17E-01	4.13E-01	4.09E-01	4.05E-01	4.01E-01	3.97E-01	3.94E-01	3.90E-01	3.86E-01
0.3	3.82E-01	3.78E-01	3.75E-01	3.71E-01	3.67E-01	3.63E-01	3.59E-01	3.56E-01	3.52E-01	3.48E-01
0.4	3.45E-01	3.41E-01	3.37E-01	3.34E-01	3.30E-01	3.26E-01	3.23E-01	3.19E-01	3.16E-01	3.12E-01
0.5	3.09E-01	3.05E-01	3.02E-01	2.98E-01	2.95E-01	2.91E-01	2.88E-01	2.84E-01	2.81E-01	2.78E-01
0.6	2.74E-01	2.71E-01	2.68E-01	2.64E-01	2.61E-01	2.58E-01	2.55E-01	2.51E-01	2.48E-01	2.45E-01
0.7	2.42E-01	2.39E-01	2.36E-01	2.33E-01	2.30E-01	2.27E-01	2.24E-01	2.21E-01	2.18E-01	2.15E-01
0.8	2.12E-01	2.09E-01	2.06E-01	2.03E-01	2.01E-01	1.98E-01	1.95E-01	1.92E-01	1.89E-01	1.87E-01
0.9	1.84E-01	1.81E-01	1.79E-01	1.76E-01	1.74E-01	1.71E-01	1.69E-01	1.66E-01	1.64E-01	1.61E-01

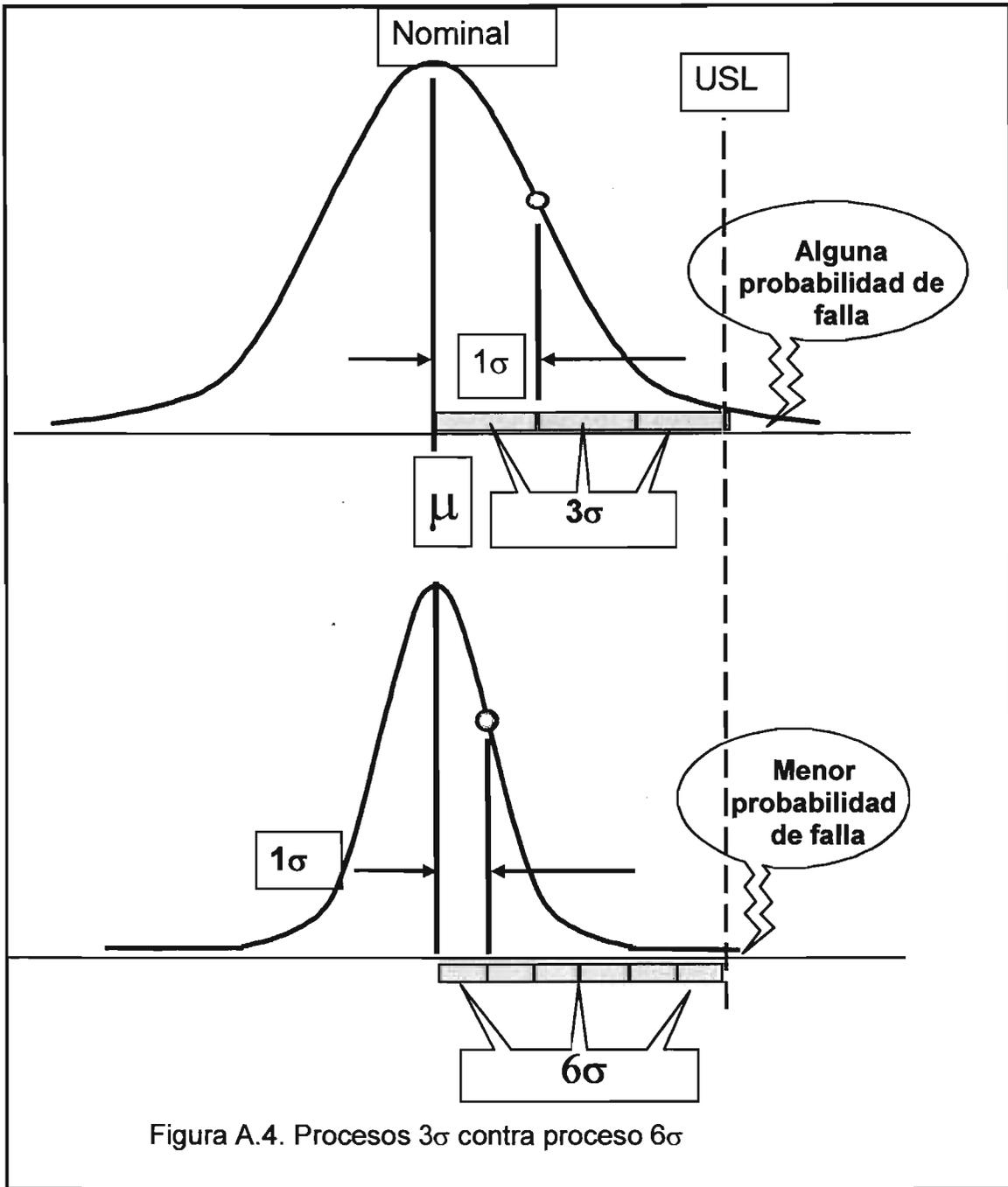
Figura A.3. Probabilidad de defecto asociado a una  $Z=0.97$

### A.3. CÁLCULO DE Z Y PROBABILIDAD DE DEFECTO

Un defecto es un no cumplimiento con las especificaciones, es decir, podemos tener partes defectuosas tanto por arriba del límite superior de especificación (USL) como por debajo del límite inferior de especificación (LSL). Así, tenemos que

$$Z_U = \frac{USL - \bar{\mu}}{\sigma} \quad \text{Y} \quad Z_L = \frac{\bar{\mu} - LSL}{\sigma}$$

son los que nos darán los niveles de  $Z$  por arriba y por debajo de los límites de especificación, respectivamente. Como puede verse en la figura A.4 entre mayor sea el número ( $Z$ ) de sigmas que quepan debajo de la curva de la distribución, menor es la probabilidad de producir un defecto.



---

## A.4. “ Z BENCH” EN DFSS

La  $Z_{bench}$  es la suma de las probabilidades asociadas a  $Z_{USL}$  Y  $Z_{LSL}$ , es decir, la  $Z_{bench}$  es la que tiene asociada la probabilidad total de defectos, como se ilustra en la figura A.5.

Así por ejemplo, si  $Z_{USL} = 3$  Y  $Z_{LSL} = 2$ , entonces de acuerdo a tablas  
 $P(Z_{USL} = 3) = 1.35 \times 10^{-3}$  y  
 $P(Z_{LSL} = 2) = 2.28 \times 10^{-2}$ ,

por lo tanto  $P(\text{Total de defectos}) = 2.42 \times 10^{-2}$  y la  $Z_{bench} = 1.98$

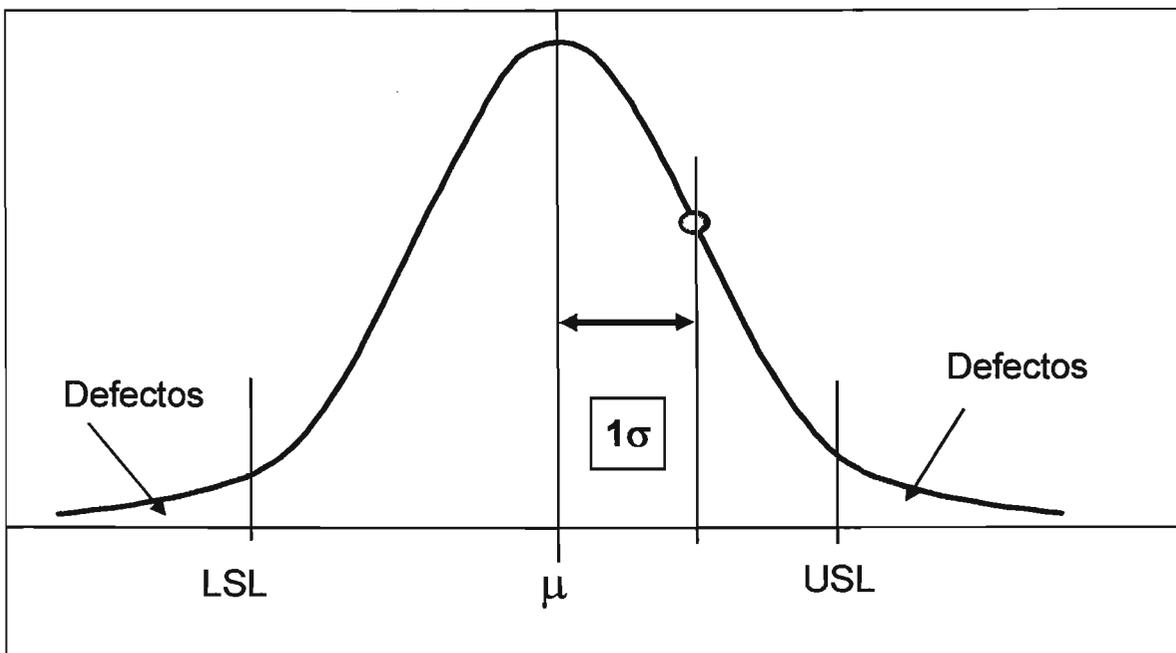


Figura A.5. Probabilidad total de defectos en una distribución normal

## A.5. CORTO PLAZO CONTRA LARGO PLAZO

La capacidad a corto plazo es también conocida como la *capacidad inherente del proceso*. Refleja la variación dentro del grupo y nos indica lo mejor que el proceso puede llegar a estar (figura A.6).

Mientras que la capacidad a largo plazo, también conocida como *Capacidad Sostenida del Proceso*, refleja la variación del 'proceso total'. Por lo tanto, siempre es de esperarse que la  $Z$  de largo plazo se encuentre desplazada respecto a la de corto plazo con un valor menor. Este desplazamiento es conocido como  $Z_{shift}$  y para términos prácticos, dentro de esta empresa se fija este valor en 1.5.

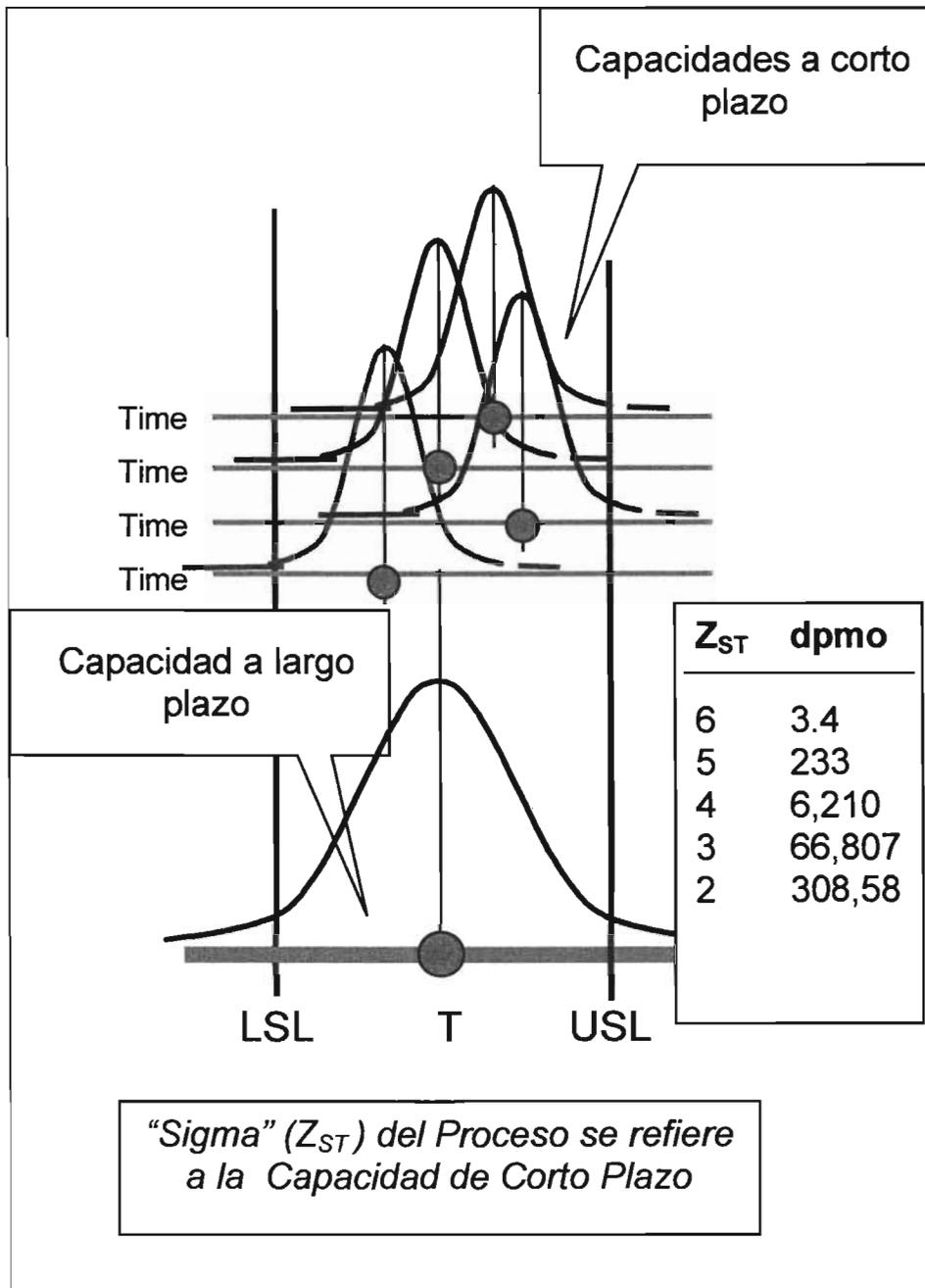


Figura A.6. Corto plazo contra largo plazo en las capacidades de proceso

Así, para calcular el valor de Z a largo plazo, haremos uso de la regla de dedo que nos dice que:

$$Z_{LT} = Z_{ST} - 1.5$$

El obtener calidad 6 Sigma es un objetivo a corto plazo. El enfoque del diseño debe ser a los DPU a largo plazo. Por lo tanto, en la medida de lo posible deben

utilizarse datos a largo plazo, ya que los datos a corto plazo no capturan el rango total de variación de un diseño o un proceso. Una estimación razonable de la desviación estándar a largo plazo puede obtenerse a partir de la multiplicación de desviación estándar a corto plazo por 1.3, siempre y cuando se traten de datos continuos.

La Zshift se usa en los cálculos de DFSS para pasar de un DPU de largo plazo a una  $Z_{ST}$ , lo que de manera estandarizada reportan las compañías que utilizan las metodologías de Seis Sigma.

$Z_{LT} =$	$Z_{ST} -$	$Z_{SH} =>$	dpmo
4.5	6	1.5	3.4
3.5	5	1.5	233
2.5	4	1.5	6,210
1.5	3	1.5	66,807
0.5	2	1.5	308,538

## A.6. DPU / DPO

DPU es el número de defectos (no conformidades) por cada unidad producida. Este indicador es un promedio. Esto significa que en promedio, cada unidad producida tendrá esta cantidad de defectos.

DPU forma la base para Seis Sigma. A partir del DPU y un conocimiento de las oportunidades, se puede calcular la capacidad a largo plazo del proceso. DPU nos da un índice de calidad generada por los defectos del proceso, material, diseño y factores ambientales y humanos. DPU mide síntomas...no problemas.

$$\text{DPU} = (\# \text{ Defectos}) / (\# \text{ unidades})$$

### Oportunidad

Una oportunidad es cualquier cosa que pueda medirse, probarse o inspeccionarse. Puede ser un crítico para la calidad (CTQ) de una parte, producto o servicio. Puede ser cada uno de los elementos de un ensamble o subensamble.

$$\text{Total de oportunidades} = (\# \text{ unidades})(\# \text{ oportunidades/unidad})$$

---

## DPO

DPO es el número de defectos por oportunidad. Este indicador no es un promedio sino una probabilidad.

$$\text{DPO} = \# \text{ defectos} / \text{Total oportunidades} = \text{DPU} / (\text{oportunidades/unidad})$$

## DPMO

DPMO es el número de defectos por millón de oportunidades.

$$\text{DPMO} = (\text{DPO}) 1 \times 10^6 = (\text{DPU/oportunidades}) \times 10^6$$

Ejemplo:



= 1 unidad

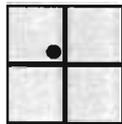


= 1 oportunidad

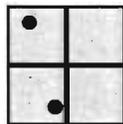


1 unidad = 4 oportunidades

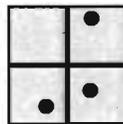
Si consideramos que • = defecto entonces;



DPU = 1  
dpo = 0.25  
dpmo = 250,000



DPU = 2  
dpo = 0.5  
dpmo = 500,000



DPU = 3  
dpo = 0.75  
dpmo = 750,000

---

# **APÉNDICE B**

---

---

## B1. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Muchos problemas requieren decidir si se acepta o rechaza un enunciado acerca de algún parámetro. El enunciado suele llamarse hipótesis, y el procedimiento de toma de decisiones en torno a la hipótesis recibe el nombre de prueba de hipótesis.

### B1.1. HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

Una hipótesis estadística es un enunciado acerca de la distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Las hipótesis estadísticas a menudo involucran uno o más parámetros de esta distribución. Por ejemplo, supóngase que estamos interesados en la resistencia compresiva media ( $\mu$ ) de un tipo particular de concreto, nos interesa decidir si  $\mu$  es o no 2500 psi. Podemos expresar esto de manera formal como:

$$\begin{aligned}H_0: \mu &= 2500 \text{ psi} \\H_1: \mu &\neq 2500 \text{ psi} \qquad \dots(\text{B-1})\end{aligned}$$

Al enunciado  $H_0: \mu = 2500$  psi de la ecuación (B1) se le llama *hipótesis nula*, y al enunciado  $H_1: \mu \neq 2500$  psi, *hipótesis alternativa*. Puesto que la  $H_1$  especifica valores de  $\mu$  que podrían ser o más grandes o más pequeños que 2500 psi, se le llama *hipótesis alternativa de dos lados*. En algunas situaciones se podemos estar interesados en formular una *hipótesis alternativa de un lado*, como en

$$\begin{aligned}H_0: \mu &= 2500 \text{ psi} \\H_1: \mu &> 2500 \text{ psi} \qquad \dots(\text{B-2})\end{aligned}$$

Es importante recordar que las hipótesis son siempre enunciados relativos a la población o distribución bajo estudio, no enunciados entorno a la muestra. El valor del parámetro de la población especificado en la hipótesis nula suele determinarse en una de tres maneras: de la experiencia o conocimiento pasado del proceso, de alguna teoría o modelo con respecto al objeto que se estudia, o de consideraciones experimentales, tales como especificaciones de diseño o de ingeniería.

Los procedimientos de la prueba de hipótesis dependen del uso de la información en una muestra aleatoria de la población de interés. Si esta información es consistente con la hipótesis, entonces concluiríamos que la hipótesis es verdadera; sin embargo, si esta información es inconsistente con la hipótesis, concluiríamos que ésta es falsa.

---

## B1.2. ERRORES TIPO I Y TIPO II

La decisión para aceptar o rechazar la hipótesis nula se basa en una estadística de prueba calculada a partir de los datos en una muestra aleatoria. Cuando se toma una decisión utilizando la información en una muestra aleatoria, esta decisión está sujeta a error. Pueden producirse dos tipos de errores cuando se prueban hipótesis. Si la hipótesis nula se rechaza cuando es verdadera, entonces se ha cometido un error tipo I. Si la hipótesis nula se acepta cuando es falsa, entonces el error cometido es del tipo II. Esta situación se describe en la tabla B1

	$H_0$ es verdadera	$H_0$ es falsa
Aceptación de $H_0$	Ningún error	Error del tipo II
Rechazo de $H_0$	Error del tipo I	Ningún error

Tabla B1.- Decisiones en la prueba de hipótesis

---

Las probabilidades de ocurrencia de los errores de tipo I y de tipo II tienen símbolos especiales:

$$\alpha = P \{ \text{error tipo I} \} = P \{ \text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es verdadera} \} \quad (\text{B-3})$$

$$\beta = P \{ \text{error tipo II} \} = P \{ \text{aceptar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa} \} \quad (\text{B-4})$$

Algunas veces es más conveniente trabajar con la potencia de la prueba, donde

$$\text{Potencia} = 1 - \beta = P \{ \text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es falsa} \} \quad (\text{B-5})$$

La probabilidad  $\alpha$  del error tipo I a menudo se llama *nivel o tamaño de significación* de la prueba.

## B1.3. LOS P-VALORES (P-VALUE)

Los paquetes de programas de computadora se emplean con frecuencia para la prueba de hipótesis estadística, en nuestro caso, utilizamos el Minitab®. Este programa calcula y presenta la probabilidad de que la estadística de prueba tomará un valor al menos tan extremo como el valor observado en ella cuando  $H_0$  es verdadera. Esta probabilidad suele llamarse el valor de  $P$  o bien p-valor. Éste representa el nivel de significación más pequeño que conduciría al rechazo de  $H_0$ . En consecuencia, si  $P = .04$  se presenta en la salida del Minitab®, la hipótesis nula se rechazaría en el nivel de  $\alpha = .05$  pero no en el  $\alpha = .01$ . En general si  $P$  es menor o igual que  $\alpha$ , rechazaríamos  $H_0$ , en tanto que si  $P$  supera a  $\alpha$  no rechazaríamos  $H_0$ .

---

No siempre es fácil calcular el valor exacto de P de una prueba. Sin embargo, para las pruebas de las distribuciones normales es relativamente simple. Si  $Z_0$  es el valor calculado de la estadística de prueba Z, entonces el p-valor es:

$$p\text{-valor} = \begin{cases} 2[1 - \Phi(|Z_0|)] & \text{para una prueba de dos colas} \\ 1 - \Phi(Z_0) & \text{para una prueba de cola Superior} \\ \Phi(Z_0) & \text{para una prueba de cola Inferior} \end{cases}$$