

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**DISEÑO PARA SIX SIGMA EN EL MONTAJE DE  
CARRETES DE MADERA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

**JUAN JOSE VILLARREAL SOLIS**

**MONTERREY, N. L., DICIEMBRE DE 2004**

---

## ***DEDICATORIA***

A DIOS Y A LA VIRGEN

A MI ESPOSA : Mary

A MIS BEBITOS : Juanito y Cecy

A MIS PADRES : Félix Carlos y Olga Alicia

A MI HERMANO : Cacho

A TODA MI FAMILIA : Primos, Tíos, Tías

A MIS AMIGOS DE TODA LA VIDA

## ***CAPITULO I.- INTRODUCCION***

En este capítulo se presentarán los antecedentes sobre el problema de ensamble y de variación de los componentes de los carretes de madera utilizados para el empaque de cables que motiva esta investigación. Además, se definirá el problema a resolver a través de esta tesis y se presentará el planteamiento de la pregunta de investigación y los objetivos que se desean lograr con el trabajo, la justificación de la tesis y su alcance. Se incluyen los resultados con los cuales se espera culminar la tesis.

### **1.1 ANTECEDENTES**

Muchas compañías con prácticas de manufactura de clase mundial han experimentado grandes problemas de variación de sus procesos con un alto impacto en la calidad y costo de sus productos. Como una medida para resolver esta problemática han implementado con éxito análisis de tolerancias a sus procesos productivos y de diseño.

Hoy en día son utilizadas las más modernas y actuales tecnologías para efectuar análisis de tolerancias entre las que destacan, modelado sólido 3D, tecnología orientada a objetos, HPN (High Performance Computing and Networking), modelación matemática, etc. Además, son ampliamente utilizadas en la ingeniería del producto y la ingeniería de manufactura.

Con el auxilio de estas tecnologías los análisis de tolerancias han permitido detectar problemas potenciales de ensamble en la fase de diseño, generando reducción de costo de contenido de materiales, reducciones de tiempo de ciclo, reprocesos y rediseños.

El “breakthrough strategy” mejor conocido como DMAIC es el centro de la metodología Six Sigma cuyos inicios se remontan al año 1984. Bill Smith ingeniero de Motorola fue el primero en manejar este concepto, sin embargo, fue Mikel Harry el que idea y conjunta todas las herramientas de la metodología y el que la hace mundialmente exitosa. Six Sigma originalmente constaba de solamente 4 fases MAIC (Measure, Analyze, Improve, Control), ciclo conocido como Shewhart-Deming. En 1994, General Electric inicio con su despliegue de Six Sigma y al poco tiempo se dio cuenta que hacia falta complementar la metodología para que el desarrollo de los proyectos fuera más eficiente con una definición clara del problema y con un enfoque determinado. Por esta razón se implementó otro paso al inicio, la fase de Definición, por lo que ahora la

metodología es conocida como DMAIC. La metodología DMAIC esta enfocada a la solución de problemas de procesos establecidos, por lo tanto, las mejoras obtenidas con este tipo de proyectos son mas bien derivadas de una mala planeación, selección de materiales, selección de procesos adecuados, desarrollo de layouts, etc. en la fase de diseño [1]. Debido a esto, fue necesario complementar la metodología para poderla aplicar desde la fase de diseño y es así como nace el Diseño para Six Sigma (DMADV).

Six Sigma es una estrategia de negocios que obtiene a través de la realización de proyectos, resultados cuantificados financieramente, tratando de disminuir el costo de la pobre calidad mediante la reducción de defectos. Para utilizar Six Sigma también son necesarias una o más mediciones que cuantifiquen la magnitud del problema y que puedan ser utilizadas para determinar las metas del proyecto y para monitorear el progreso del mismo. Por lo tanto, se pretende que una vez aplicada esta metodología al problema de la investigación se pueda obtener una reducción de defectos en el proceso y a su vez se obtenga un beneficio financiero [2].

### **1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA**

En el caso del montaje de carretes de madera utilizados para el empaque de cables el trabajar sin haber determinado la capacidad de proceso (variaciones) de los componentes del ensamble y con tolerancias de proceso obsoletas, provoca serios problemas que se traducen en operaciones lentas, reprocesos, desperdicios, reparaciones por quejas internas y por quejas de clientes.

Una variabilidad excesiva puede generar graves problemas de tolerancias. Si los límites de especificación constantemente son sobrepasados por las variaciones del producto, se tiene que pensar el replantear las tolerancias y optimizar los procesos.

El problema va mas allá de los procesos productivos si se considera que los nuevos diseños respetan reglas obsoletas.

El montaje de carretes de madera en la empresa donde se realiza el estudio, ha sido un proceso en el cual nunca se ha implementado un control estadístico, por tanto, el fenómeno de variación y su impacto en los costos de mala calidad ha pasado desapercibido por un largo tiempo. Se sabe que son frecuentes las quejas de los clientes debido a problemas de carretes fuera de tolerancias dimensionales, también es conocido que se tienen mermas de submontajes por problemas dimensionales. Además, las especificaciones de los carretes se han desarrollado sin un soporte de ingeniería que

permita el desarrollo de estándares y reglas aplicables para el diseño y fabricación de los mismos.

Después de haber analizado para el caso de la empresa donde se lleva a cabo la investigación los costos, tiempos de reprocesos, desperdicios y problemas de calidad ocasionados por tolerancias obsoletas que no reflejan el comportamiento real de los componentes en el proceso de montaje, se vislumbra un área de oportunidad enorme en el proceso de armado de carretes.

### **1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACION**

¿Es posible identificar y controlar las causas que generan las variaciones de diseño y de proceso del ensamble mecánico de carretes de madera?

¿Es posible determinar nuevas tolerancias de los componentes para obtener un montaje más compacto, económico y eficiente por medio de la aplicación de la técnica de Diseño para Six Sigma?

Lo anterior para el caso de la empresa en la que se lleva a cabo la investigación.

### **1.4 OBJETIVO DE INVESTIGACION**

- Identificar las variables críticas que generan problemas de tolerancia en el montaje de carretes de madera utilizados para el empaque de cable.
- Revisar el comportamiento de los componentes involucrados desde la perspectiva de diseño y manufactura e identificar el impacto de las variables del proceso.
- Establecer un plan de control para reducir el efecto de las variables críticas y por este medio controlar la variación del proceso y establecer las bases y criterios de diseño para una operación óptima.
- Realizar un análisis de tolerancia para establecer tolerancias que reflejen el comportamiento real de las variaciones de los materiales, procesos y mano de obra y con esto obtener como resultado un ensamble más compacto, económico y eficiente.

Todo lo anterior para el caso de la empresa en la que se lleva a cabo la investigación.

## **1.5 JUSTIFICACION**

Fabricar componentes más grandes de lo debido da como resultado altos costos de contenido de material del producto final, lo que provoca que se incremente el costo del carrete de madera. La excesiva variación de los componentes ocasiona problemas de capacidad de empaque de cable debido a disminución del área de devanado cuando las dimensiones resultan ser más cortas de lo especificado, problemas de transportación cuando la carrera del carrete resulta ser mayor, daños al producto, mermas, etc.

Se estima que los problemas de tolerancia (reemplazo de carretes de madera, costo de mano de obra derivada de reprocesos y tiempo extra) tienen un impacto de \$26,800 USD anuales sin considerar el costo de materiales redimensionados (adición o substracción), el costo de mano de obra para realizar dicha operación y el costo logístico (fletes).

Se estima que el poder controlar las dimensiones y hacer un ensamble predecible podría eliminar las operaciones de reprocesos y con esto eliminar el costo en el que se está incurriendo actualmente. Además, se estima que se pueden tener beneficios por reducción de contenido de materiales los cuales se pretende validar y cuantificar más adelante en el desarrollo de la tesis.

Los costos de fabricación de carretes de madera debido a problemas relacionados con tolerancias de montaje no han sido cuantificados.

## **1.6 ALCANCE**

El alcance de la investigación se limita a la identificación y control de las variables críticas que impactan en las tolerancias de montaje mecánico de carretes de madera utilizados para el empaque de cables.

También la modelación de las variables críticas mediante un análisis de tolerancias. Diseño y fabricación de prototipo. Modificación del sistema de calidad para establecer las nuevas tolerancias obtenidas del estudio.

También se pretende desarrollar la ingeniería necesaria para el desarrollo de estándares que faciliten y regulen el diseño y fabricación de los carretes de madera.

### **1.7 UTILIDAD**

Actualmente en el mercado de fabricación de carretes de madera para embalajes de cable compiten muchos fabricantes con precios cada vez más bajos. Un dólar puede hacer diferencia entre un fabricante y otro.

El llevar a cabo una optimización de los procesos de montaje mediante un análisis de tolerancia puede permitir competir con mayor fuerza en el mercado. Además, la utilidad del estudio para la empresa, plantea la actualización de la ingeniería de los carretes con procesos más controlados, eficientes y competitivos.

### **1.8 RESULTADOS ESPERADOS**

Con la culminación del presente trabajo de investigación, se espera tener documentado el proyecto DMADV mediante el cual fue posible controlar la variación de las variables críticas del proceso de montaje de carretes, además de haber definido las tolerancias que permitan el montaje óptimo de los carretes.

### **1.9 CONCLUSIONES**

En este primer capítulo se presentó un escenario sobre el cual se desarrollará la presente tesis, además de los objetivos y el alcance de la misma. Se mostró una idea clara al lector de los resultados que se pretende alcanzar con el desarrollo de la presente investigación.

En el siguiente capítulo se presentarán fundamentos teóricos, tecnicismos y una explicación detallada de los componentes de un carrete que servirán como una base conceptual para el desarrollo de la tesis.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Un sincero agradecimiento al Dr. Alberto Hernández por su apoyo, asesoría y enseñanzas en toda esta etapa de mi vida. Gracias por ser parte de uno de mis mayores logros personales.

A mi sinodal, Dr. Jesús Salvador Arreola Risa, por su apoyo para la realización de esta tesis y por compartir su experiencia conmigo.

A mi sinodal, Dr. Noel León Rovira, por sus recomendaciones y tiempo dedicado a mejorar este trabajo de tesis.

Al Instituto Tecnológico de Monterrey por la calidad de sus programas y de sus catedráticos, por su apoyo y su compromiso para seguir dando preparación a este México querido.

A todos los profesores que durante el desarrollo de mi maestría generosamente compartieron sus conocimientos durante la impartición de sus cátedras.

Al grupo Xignux por su soporte económico durante la etapa final del estudio de mi maestría.

A todos desde el fondo de mi corazón, MUCHAS GRACIAS.

## ***CAPITULO II.- MARCO TEORICO***

Los procesos utilizados para la manufactura de carretes de madera son algo burdos, es decir, no son procesos con un alto grado de automatización. En general por lo que se ha investigado no existe gran diferencia en los procesos utilizados para la fabricación de carretes en fabricantes de Norteamérica, Sudamérica, Europa y la empresa donde se realiza el estudio.

Sin embargo, las especificaciones para la fabricación de carretes han sido utilizadas en la empresa por mucho tiempo sin que se haya llevado a cabo una revisión de las mismas. Han cambiado materiales, herramientas, equipos y procesos y esto hace que las especificaciones resulten obsoletas para los procesos de fabricación actuales.

En este capítulo se pretende explicar detalladamente el proceso de fabricación de los carretes de madera y los componentes de los mismos, también será detallado el proceso para determinar la capacidad de empaque de los carretes, se hará una referencia sobre los problemas generados por las variaciones dimensionales de los carretes y se hará un análisis del ensamble con las especificaciones actuales con un par de modelos representativos para tener una base para el análisis posterior.

### **2.1 ¿QUÉ ES UN CARRETE DE MADERA?**

Los carretes de madera son el empaque que tradicionalmente ha sido utilizado en la industria cablera. Están compuestos de balonas o bridas, herrajes, tambor, cuellos y caracoles. Históricamente el proceso de fabricación ha sido un proceso algo rudimentario en donde las especificaciones de manufactura no han sido revisadas con el paso del tiempo y se siguen utilizando algunas reglas empíricas que tienden a ser obsoletas.

El montaje del carrete es un proceso de mano de obra intensiva donde el operario manipula todos los componentes y los ensambla uno a uno hasta completar el producto. De acuerdo a lo que se ha investigado la tecnología utilizada para la fabricación de carretes es similar y no varía mucho de fabricante a fabricante. El proceso más complicado es la fabricación de la balona, ahí es donde se presentan diferencias entre fabricantes. Se ha comprobado que el proceso utilizado para el montaje de los carretes es el mismo sin importar el fabricante. El diseño de los carretes varía dependiendo el tipo de cable, las cargas a la cual van a ser sometidos, las condiciones del medio ambiente, el manejo, la aplicación, etc.

Los carretes son fabricados con madera de pino, usualmente el denominado “radiata”, la clase de la madera utilizada es del tipo industrial o clase 5, la cual por especificación permite un determinado porcentaje de nudo, corteza y resina. La madera es sometida a un proceso de estufado. Dicho proceso es realizado en una cámara especial donde la madera es sometida durante 24 horas a vapor de agua con un químico especial a una temperatura de 75 °C, con el cual se asegura la eliminación de bichos y hogos; luego se deja reposar hasta temperatura ambiente. Este proceso hace que los poros de la madera se compacten y esto impide que vuelva a ganar humedad con facilidad, con esto se pretende darle mayor vida a la madera cuando es expuesta a la intemperie.

### 2.2 COMPONENTES DE UN CARRETE DE MADERA

La figura 2.2.1 muestra las partes de las cuales está compuesto un carrete de madera. En general, la construcción del carrete puede cambiar dependiendo del peso del cable, del diámetro del conductor y de los requerimientos de capacidad volumétrica.

#### Descripción de Componentes

##### *Orificio de perno de arrastre (A)*

Orificio hecho con la finalidad de servir como pivote del perno de arrastre de la máquina devanadora del cable para hacer girar el carrete.

##### *Diámetro de brida (B)*

Diámetro del elemento lateral circular, que soporta al tambor y lateralmente al conductor embalado y que es conocido como brida o balona.

##### *Diámetro del tambor (C)*

Diámetro del elemento central, cilíndrico, donde se embobina el conductor y que en sus extremos se ensamblan las bridas. El tambor es formado por duelas las cuales se van ensamblado una a la vez hasta que se completa el cilindro.

##### *Diámetro del barreno central (D)*

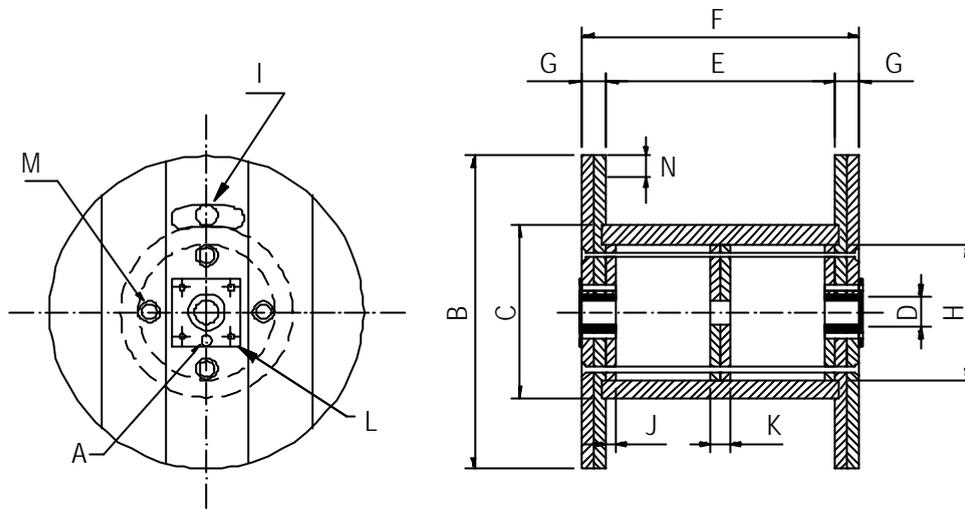
Diámetro del barreno que sirve como pivote a la flecha de la máquina devanadora donde va montado el carrete.

##### *Longitud de la carrera (E)*

Longitud del tambor o sea la distancia interna entre bridas.

##### *Longitud total del carrete (F)*

Longitud medida entre las caras externas de las bridas.



A	Orificio de perno de arrastre
B	Diámetro de la brida
C	Diámetro del tambor
D	Diámetro del barreno central
E	Longitud de la carreta
F	Longitud total del carrete
G	Espesor de la brida
H	Diámetro interior del tambor
I	Barreno para salida del conductor
J	Espesor del refuerzo lateral
K	Espesor del refuerzo central
L	Placa central
M	Diámetro del herraje
N	Claro mínimo

Figura 2.2.1. Componentes y nomenclatura de un carrete de madera [3]

*Espesor de la brida (G)*

Es el grueso de la brida; esta compuesto por el número de capas de madera el cual es determinado por el peso al cual será sometido el carrete.

*Diámetro interior del tambor (H)*

Es el diámetro interior del “router” donde van apoyadas las duelas que forman el tambor.

### *Barreno para salida del conductor (I)*

Orificio hecho con la finalidad de servir como salida del conductor, la cual es necesaria para iniciar el devanado.

### *Espesores de refuerzos lateral y central (J y K)*

En algunas ocasiones debido a la que la carrera del tambor es demasiado larga en proporción con el diámetro de la brida o también debido al peso al que será sometido el carrete, es necesario utilizar refuerzos como soporte interno de las duelas que forman el tambor para dar mayor resistencia.

### *Placa central (L)*

Elemento metálico que puede ser rectangular o cuadrado, con o sin tubo soldado, que sirve para reforzar el barreno central del carrete.

### *Diámetro del herraje (M)*

Es el diámetro de la varilla (también conocida como tirante) de fierro no galvanizada que puede tener sus extremos roscados o soldados a una placa o rondana de fierro, destinada a ensamblar las bridas y el tambor.

### *Claro mínimo (N)*

Espacio comprendido entre la superficie exterior de la última capa del conductor embalado y el perímetro de la brida.

Una práctica de embarque de carretes comúnmente utilizada es el entablillado de la cubierta exterior del carrete como una medida de protección del cable. Dicho entablillado puede ser del 50 al 100% de la cara del carrete.

## **2.3 PROCESO DE FABRICACION DE COMPONENTES DE CARRETES DE MADERA**

Los componentes principales de un carrete de madera son las bridas o balonas, los herrajes y la duela que es utilizada para formar el tambor. En algunas ocasiones son utilizados los “cuellos” o refuerzos para proporcionar mayor resistencia al tambor. A continuación se explicarán brevemente las actividades que componen el proceso de fabricación de dichos componentes. Posteriormente en el desarrollo de esta tesis, se explicarán con mayor detalle estos procesos. La tabla 2.3.1 enlista las operaciones necesarias para la fabricación de los componentes de un carrete de madera.

		<b>Componente</b>			
		<b>Balona</b>	<b>Herraje</b>	<b>Duela</b>	<b>Cuello</b>
<b>Procesos</b>	1. Recepción de madera	1. Dimensionado	1. Recepción de madera	1. Recepción de madera	
	2. Enfajillado	2. Roscado	2. Enfajillado	2. Enfajillado	
	3. Inspección	3. Habilitado	3. Inspección	3. Inspección	
	4. Cepillado	4. Soldadura	4. Cepillado	4. Clasificación para cortes	
	5. Estufado		5. Moldurado	5. Troceado	
	6. Clasificación para cortes			6. Fijado	
	7. Troceado			7. Pivote	
	8. Fijado			8. Clavado	
	9. Pivote			9. Redondeo	
	10. Clavado			10. Centros	
	11. Redondeo				
	12. Router				
	13. Sesgado				
	14. Centros				
	15. Engargolado				
	16. Pulido				

Tabla 2.3.1. Procesos de fabricación de componentes de carretes de madera

**Fabricación de balona**

El proceso de fabricación de la balona o brida empieza desde la recepción de la madera. La madera es recibida “verde”, esto hace que el contenido de humedad sea elevado por lo que se le tiene que enfajillar para poder darle un secado al aire. Después la madera es seleccionada y cepillada, para posteriormente llevarla al proceso de estufado que es donde se controla el contenido de humedad y se asegura la exterminación de bichos y plagas.

Una vez que es estufada la madera, es clasificada para asegurar el mínimo desperdicio en el proceso de troceado que es donde se dimensiona la madera para formar la balona. En el proceso de fijado se fijan las capas de madera de la balona, luego se perfora un pivote necesario para los procesos posteriores. En el clavado se ponen los radios de clavos necesarios para evitar que la madera se separe, después la madera es redondeada y se hace el router (asiento de la duela para el tambor). El sesgado es realizado solo en una brida por carrete, después de esta operación sigue el proceso de centros que es donde se realizan las perforaciones para los herrajes y los pernos de arrastre, por último se tiene el proceso de engargolado que es donde se añade un buje de refuerzo al orificio central y el proceso de pulido de la cara interior de la balona.

### *Fabricación de herraje*

La fabricación de los herrajes es un proceso muy sencillo donde primeramente se dimensiona una varilla de acuerdo a la medida del modelo a fabricar. Después se pasa al proceso de roscado donde la pieza dimensionada es roscada por ambos lados, un vez que esto ocurre, la pieza es trasladada a un escantillón en el que es habilitado el ensamble (varilla y rondana) para soldarlo.

### *Fabricación de duela para tambor*

La madera utilizada para la duela lleva prácticamente una preparación igual a la madera que es utilizada para la fabricación de carretes. La madera es recibida “verde” y es enfajillada para poder darle un secado al aire. Después la madera es seleccionada y cepillada; a diferencia de la madera para carrete, la madera para duela no es sometida a un proceso de estufado. Una vez que es cepillada se hace pasar la madera por una molduradora en la cuál se obtiene un forma curva con la que se pretende que la forma final del tambor sea circular.

### *Fabricación de cuello*

El proceso de fabricación del cuello o refuerzo es el mismo que el que es seguido para fabricar la balona. La diferencia radica en que la madera que es utilizada para los cuellos no pasa por los procesos de cepillado, estufado, router, sésgado, engargolado y pulido.

## 2.4 PROCESO DE MONTAJE DE CARRETES DE MADERA

El proceso de ensamble de los carretes de madera es un proceso sencillo debido a que se cuenta con los juegos de herrajes y balonas para un modelo en particular. La duela es dimensionada de acuerdo a la carrera del tambor del modelo en turno y se adicionan unas rondanas y tortillería para terminar el ensamble.

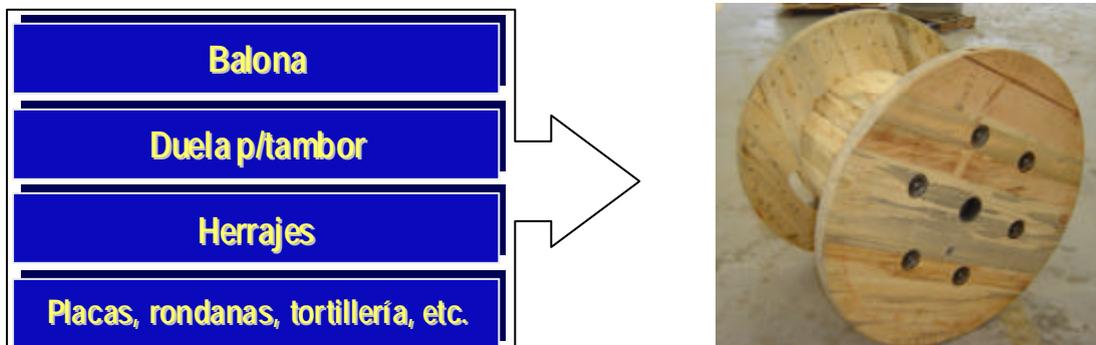


Figura 2.4.1. Esquema del montaje de carrete de madera

Algunos diseños en particular requieren de placas de refuerzo tanto para el orificio central como para el perno de arrastre. También algunos diseños muy esporádicos requieren de un cinto metálico para proteger la periferia de la balona.

## **2.5 CAPACIDAD DE EMPAQUE EN CARRETES**

La capacidad de empaque de los carretes de madera se refiere a la cantidad de cable que puede ser devanada en dicho carrete, dicho de otra manera, es la distancia de cable medida en pies o metros que puede enrollarse en el carrete,

De acuerdo al estándar NEMA WC 26-2000 [4] la capacidad de empaque en pies de un carrete de madera puede ser determinada por la siguiente fórmula:

$$F = 0.2617 \left[ \frac{B + 0.95Y}{D} \right] \left[ \frac{Y}{D} \right] \left[ 0.95C \right]$$

Donde:

- F = Capacidad de empaque en pies
- B = Diámetro del tambor en pulgadas
- D = Diámetro del cable en pulgadas
- C = Longitud de la carrera en pulgadas
- Y = Altura de trabajo, cuyo valor esta dado por:

$$Y = \frac{A - 2X - B}{1.9}$$

Donde:

- A = Diámetro de la balona en pulgadas
- X = Claro en pulgadas

El claro mínimo debe ser igual a 1" o una vez el diámetro del cable, cualquiera que sea mayor siempre que el usuario final no haya especificado un claro distinto.

Hay una tabla empírica que puede ser utilizada como referencia en el cálculo de la capacidad de empaque de carretes (ver tabla 2.5.1).

CARRETES	X
36" y menores	1"
42" a 66"	2"
72" y mayores	3"

Tabla 2.5.1. Valores empíricos de claro para cálculo de capacidad de empaque

La fórmula para el cálculo de capacidad de empaque de cable considera un factor de 5% de anidado del cable y un 95% de utilización de la carrera transversal del carrete, esto debido a que el devanado del cable nunca es perfecto.

De la fórmula para el cálculo de capacidad se puede observar que B, C, Y y X son datos que corresponden a las dimensiones del carrete. Por lo tanto dichas variables pueden ser agrupadas en la siguiente expresión:

$$Z = 0.2617 (B + 0.95Y) (Y) (0.95C)$$

Y con dicha expresión pueden ser calculados factores para cada tipo de carrete y con esto empezar a generar gráficos para determinar las capacidades de empaque. Dichas tablas nos pueden servir para la selección del carrete adecuado dependiendo de la longitud de cable que queremos empaquetar.

Una vez que se calcula el factor Z, el cálculo de la capacidad se simplifica a la siguiente expresión:

$$F = Z / D^2$$

Si es necesario conocer o determinar la capacidad de empaque de un carrete de madera en metros puede ser utilizada la siguiente fórmula:

$$M = 0.3048 \times F$$

La figura 2.5.1 muestra la gráfica que ha sido desarrollada a partir del cálculo explicado en esta sección como una forma sencilla de determinar la capacidad de cable en metros que pueden ser devanados al carrete.

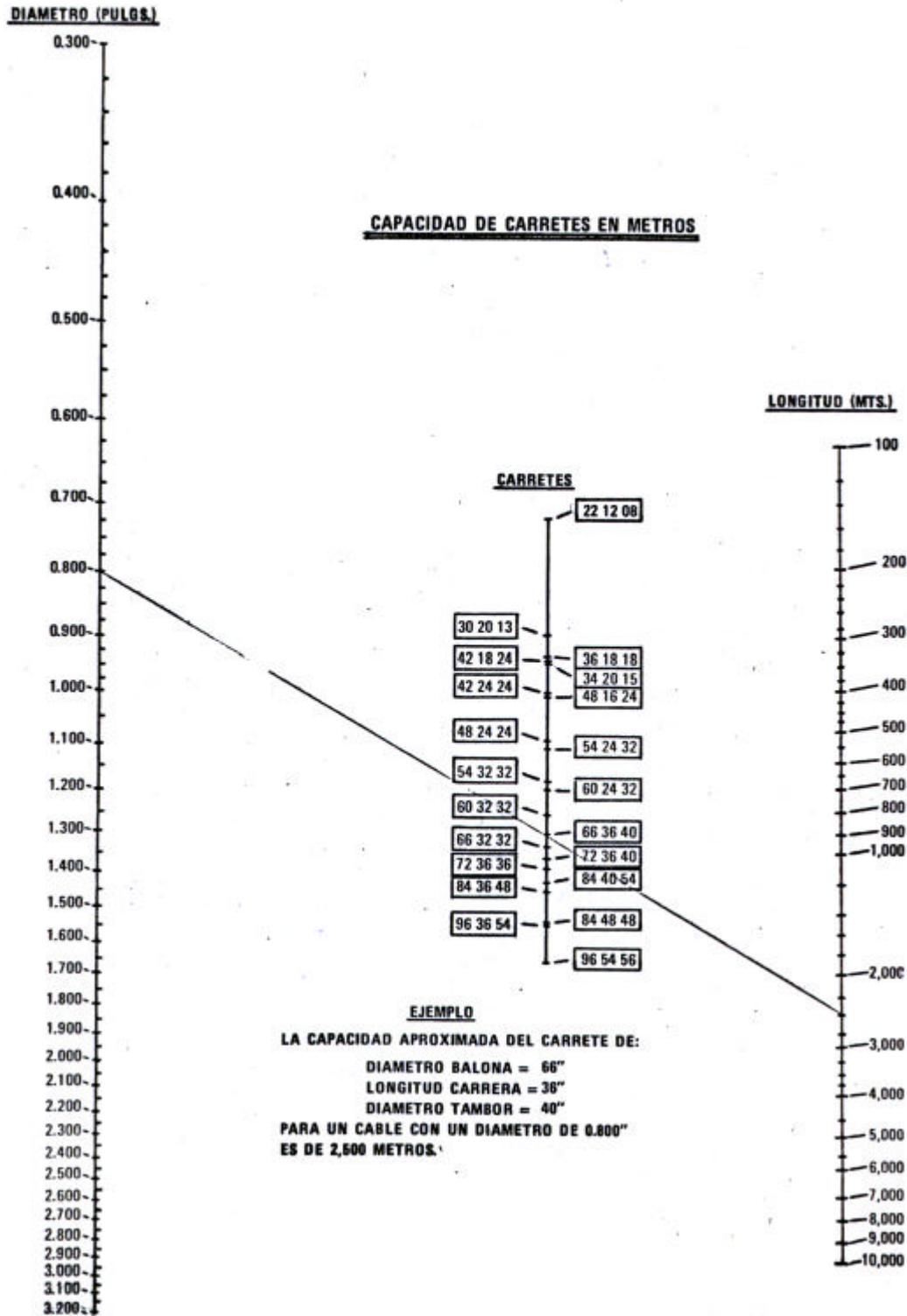


Figura 2.5.1. Gráfica para cálculo de capacidad de empaque en mts.

## 2.6 ANALISIS DE TOLERANCIAS

Uno de los objetivos primordiales de esta tesis es la validación de las tolerancias actuales de diseño. Por medio de los análisis de tolerancias es posible validar y optimizar diseños con problemas repetitivos de dimensiones fuera de especificación. Es bueno mencionar que tanto tolerancias muy estrechas como muy holgadas pueden generar problemas de ensamble o costos elevados.

Los *análisis de tolerancias* son utilizados para predecir la acumulación de tolerancias dentro de un ensamble o cualquier otro sistema. Se entiende por *tolerancia* como la cantidad total que una dimensión específica o parámetro puede variar.

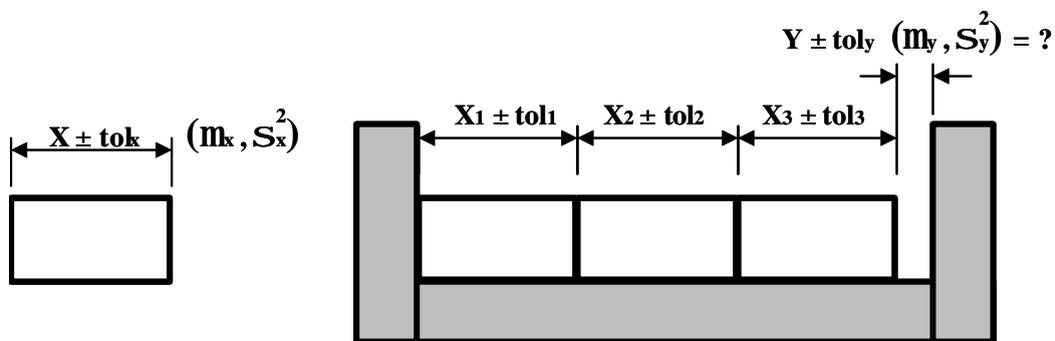


Figura 2.6.1. Representación clásica de sistema de tolerancias

La figura 2.6.1 muestra la representación clásica de un sistema de tolerancias. Primeramente un cubo el cual tiene una tolerancia “x”, pero además tiene una variación. Si ponemos una serie de cubos dentro de una caja, cada uno con su variación natural de fabricación y con una tolerancia definida para dicha variación, tenemos luego que las tolerancias de cada cubo deben ser capaces de absorber las variaciones para no tener problemas de ensamble, pero además, para asegurar que el gap (Y) este también dentro de su tolerancia.

Podemos inferir que debe existir una dimensión interior de la caja con su tolerancia correspondiente, de tal manera, que en el análisis del sistema de tolerancias todas las dimensiones intervienen y deben ser consideradas [5].

### Tipos de análisis de tolerancias

Existen varias técnicas para realizar un análisis de tolerancias dependiendo de la función de transferencia que describe el comportamiento del juego de tolerancias del ensamble. La figura 2.6.2 muestra un esquema de los tipos de análisis de tolerancias.

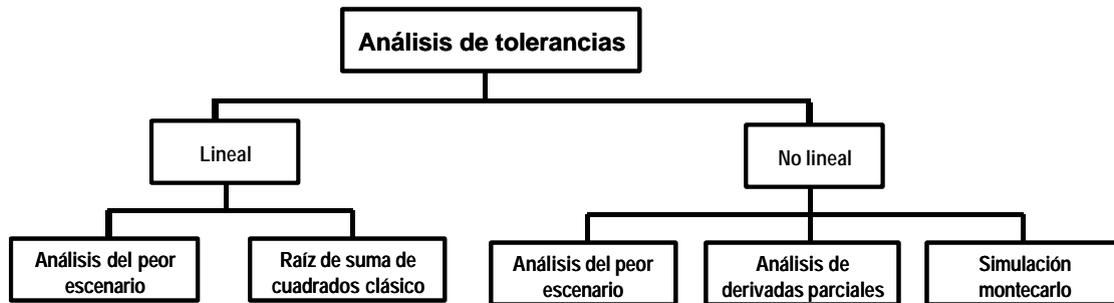


Figura 2.6.2. Tipos de análisis de tolerancias

Las características de los análisis de tolerancias lineales son, como su nombre lo indica, sistemas donde las funciones de transferencia son lineales, con coeficientes de  $X_s$  constantes. Son funciones usualmente de cálculos de costos, apilados de tiempo de ciclo, vectores de acercamiento.

En cambio, los análisis de tolerancias no lineales se caracterizan por tener funciones de transferencia no lineales donde los coeficientes de  $X_s$  son funciones de  $X_s$ . Usualmente son utilizados con funciones geométricas, predicciones de desempeño, regresiones de superficies de respuesta, etc.

## 2.7 ANALISIS DE TOLERANCIAS LINEALES

Para el caso de estudio de tolerancias de carretes de madera las funciones de transferencia de las tolerancias del ensamble son lineales. Es por eso que se explicará en que consiste cada uno de los métodos de análisis.

Se empieza por enlistar los pasos para realizar un análisis de tolerancias lineales:

1. Identificar el crítico de calidad.
2. Generar un layout o croquis del ensamble.
3. Identificar claramente la dimensión del ensamble en la condición más severa.
4. Crear la función de transferencia.
5. Asignar la convención de signos (+/-) a la función.
6. Realizar análisis de tolerancias.

### **Análisis del peor escenario**

Este método es basado en establecer los límites extremos de la variable de respuesta Y.

- Se asume que todas las Xs pueden estar en sus límites extremos simultáneamente.
- Garantiza 100% de intercambiabilidad (no interferencias).
- Impone tolerancias muy severas a las Xs.
- Usualmente resulta en sobre diseños o diseños exageradamente robustos del sistema.

Los pasos para realizar este tipo de análisis son como sigue (aplican para Xs con tolerancias simétricas y con coeficientes  $\pm 1$ ):

1. Calcular la  $Y_{nom}$  substituyendo los valores nominales de Xs en la función de transferencia.
2. Calcular la tolerancia del peor escenario (toly).  
$$toly = tol_1 + tol_2 + \dots + tol_n$$
3. Calcular los límites del peor escenario.  
Peor escenario máximo =  $Y_{nom} + toly$   
Peor escenario mínimo =  $Y_{nom} - toly$

Para el caso en el cual las tolerancias son asimétricas se tiene que proceder de la siguiente manera:

- Convertir a tolerancias simétricas y aplicar los pasos anteriores.
- Utilizar las siguientes ecuaciones:  $S_i = \text{signo de } X_i (+1 \text{ o } -1)$   
Peor escenario máximo =  $Y_{nom} + S_1\Delta X_1 + S_2\Delta X_2 + \dots$   
Donde  $\Delta X_i = (\text{tolerancia mayor de } X_i) \text{ si } S_i > 0$   
 $= -1 * (\text{tolerancia menor de } X_i) \text{ si } S_i < 0$   
Peor escenario mínimo =  $Y_{nom} + S_1\Delta X_1 + S_2\Delta X_2 + \dots$   
Donde  $\Delta X_i = -1 * (\text{tolerancia menor de } X_i) \text{ si } S_i > 0$   
 $= (\text{tolerancia mayor de } X_i) \text{ si } S_i < 0$

### **Raíz de suma de cuadrados**

Es un método estadístico para predecir  $\sigma_y$  para una función lineal de transferencia.

1. Este método esta basado en la menor probabilidad de que todas las Xs estarán en su límite mayor o menor al mismo tiempo.

$$Y = f ( X_1, X_2, \dots, X_n ) = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

$$\mu_y = a_1\mu_1 + a_2\mu_2 + \dots + a_n\mu_n$$

$$\sigma_y = \sqrt{a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + \dots + a_n^2\sigma_n^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad \text{Raíz de suma de cuadrados (cuando todas las a's son +1 o -1)}$$

2. Supuestos: X's son independientes.
3. Se asume que la Y tiene distribución normal (permite calcular DPMO, etc.).  
Teorema del límite central

**Análisis del ensamble de carrete de madera**

La idea de realizar un análisis previo de las tolerancias de diseño es validar si de entrada hay alguna inconsistencia que genere problemas de ensamble.

Como un primer acercamiento solo se analizaran los 2 modelos más representativos con 2 ecuaciones de transferencia. Posteriormente en el desarrollo de esta tesis se realizaran simulaciones detalladas de toda la línea de modelos utilizando análisis montecarlo.

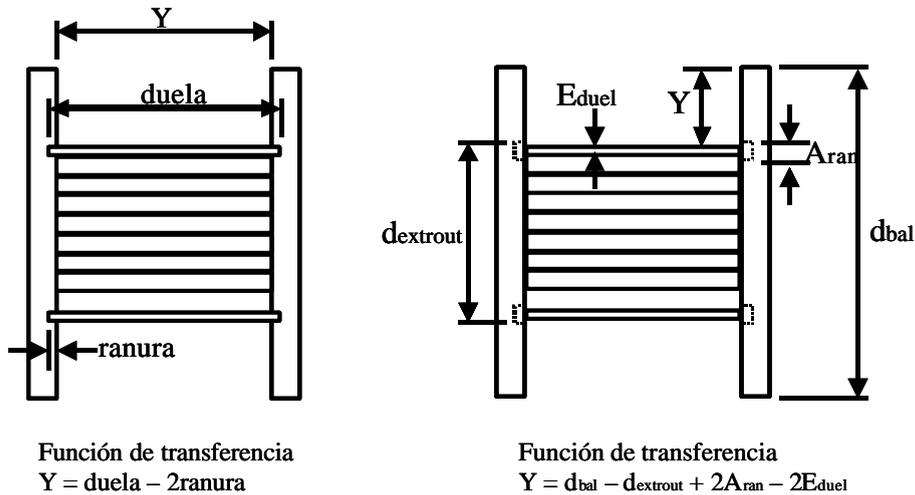


Figura 2.7.1. Layout de funciones de transferencia de carretes de madera

La siguiente tabla muestra los datos de diseño de 2 de los modelos de carretes de madera más representativos, los cuales serán sometidos a análisis de tolerancias del peor escenario y de la raíz de suma de cuadrados.

**Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera**

Dimensión	Modelo		Tolerancia
	42-24-24 2C	60-32-32 3C	
Longitud de duela	24	33	± 3/32
Ranura	0.375	0.5	± 1/16
Espesor de duela	0.75	1.375	± 1/16
Ancho de ranura	0.875	1.5	± 1/16
Diámetro exterior de router	23	31	± 1/8
Diámetro de balona	41	59	± 1/4

Tabla 2.7.1. Datos de diseño de carretes representativos para análisis de tolerancias

Nombre del Ensamble		Dimensión Objetivo			
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol		
42-24-24 2C					
Fecha	11/05/2004				
Unidades	in				
Carrera	24	0.09375	0.09375		

Información de dimensiones de parte				Información de Diseño		Función de Transferencia		Salida	
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol	Media	Desv. Est.	Coficiente	Caso	Fuera de centro	%contribución
Duela	24.75	0.09375	0.09375	24.75	0.015625	1	1	0	42.9%
Ranura	0.375	0.0625	0.0625	0.375	0.010416667	-1	1	0	28.6%
Ranura	0.375	0.0625	0.0625	0.375	0.010416667	-1	1	0	28.6%
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				

Dimensión Objetivo	Límites Peor Escenario		Datos Estadísticos						
	Min	Max	Media	Desv. Est.	6-Sigma Min	6-Sigma Max	Z Isl	Zusl	DPMO
Gap	23.78125	24.21875	24	0.02147	23.87115	24.12885	4.37	4.37	12.68492122

Nombre del Ensamble		Dimensión Objetivo			
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol		
60-32-32 3C					
Fecha	11/05/2004				
Unidades	in				
Carrera	32	0.09375	0.09375		

Información de dimensiones de parte				Información de Diseño		Función de Transferencia		Salida	
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol	Media	Desv. Est.	Coficiente	Caso	Fuera de centro	%contribución
Duela	33	0.09375	0.09375	33	0.015625	1	1	0	42.9%
Ranura	0.5	0.0625	0.0625	0.5	0.010416667	-1	1	0	28.6%
Ranura	0.5	0.0625	0.0625	0.5	0.010416667	-1	1	0	28.6%
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				
				0	0				

Dimensión Objetivo	Límites Peor Escenario		Datos Estadísticos						
	Min	Max	Media	Desv. Est.	6-Sigma Min	6-Sigma Max	Z Isl	Zusl	DPMO
Gap	31.78125	32.21875	32	0.02147	31.87115	32.12885	4.37	4.37	12.68492122

Figura 2.7.2. Hoja de cálculo con análisis del gap “carrera” para carretes de 42-24-24 2C y 60-32-32 3C

**Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera**

En este caso los valores de “Z”, del análisis del gap “carrera”, nos indican que hay una incongruencia en el diseño de manera que en el peor escenario las dimensiones estarían por encima de las tolerancias establecidas para la carrera de los carretes de ambos modelos. De tal forma, un análisis a detalle debe ser realizado para asegurar que las tolerancias sean funcionales y reflejen fielmente el comportamiento de los carretes en piso.

Nombre del Ensamble	42-24-24 2C		
Fecha	11/05/2004		
Unidades	in		

Dimensión Objetivo			
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol
Altura	18	0.25	0.25

Información de dimensiones de parte				Información de Diseño		Función de Transferencia		Salida	
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol	Media	Desv. Est.	Coficiente	Caso	Fuera de centro	%contribución
dbal	41	0.25	0.25	41	0.04167	1	1	0	40.0%
dextrout	23	0.125	0.125	23	0.02083	-1	1	0	20.0%
Aran	0.875	0.0625	0.0625	0.875	0.01042	1	1	0	10.0%
Aran	0.875	0.0625	0.0625	0.875	0.01042	1	1	0	10.0%
Eduel	0.75	0.0625	0.0625	0.75	0.01042	-1	1	0	10.0%
Eduel	0.75	0.0625	0.0625	0.75	0.01042	-1	1	0	10.0%
				0	0				
				0	0				
				0	0				

Dimensión Objetivo	Límites Peor Escenario		Datos Estadísticos						
	Min	Max	Media	Desv. Est.	6-Sigma Min	6-Sigma Max	Z Isl	Z usl	DPMO
Gap	17.625	18.875	18.25	0.05103	17.94381	18.55619	9.80	0.00	1000000

Nombre del Ensamble	60-32-32 3C		
Fecha	11/05/2004		
Unidades	in		

Dimensión Objetivo			
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol
Altura	28	0.25	0.25

Información de dimensiones de parte				Información de Diseño		Función de Transferencia		Salida	
Nombre	Nominal	(+) Tol	(-) Tol	Media	Desv. Est.	Coficiente	Caso	Fuera de centro	%contribución
dbal	59	0.25	0.25	59	0.04167	1	1	0	40.0%
dextrout	31	0.125	0.125	31	0.02083	-1	1	0	20.0%
Aran	1.5	0.0625	0.0625	1.5	0.01042	1	1	0	10.0%
Aran	1.5	0.0625	0.0625	1.5	0.01042	1	1	0	10.0%
Eduel	1.375	0.0625	0.0625	1.375	0.01042	-1	1	0	10.0%
Eduel	1.375	0.0625	0.0625	1.375	0.01042	-1	1	0	10.0%
				0	0				
				0	0				
				0	0				

Dimensión Objetivo	Límites Peor Escenario		Datos Estadísticos						
	Min	Max	Media	Desv. Est.	6-Sigma Min	6-Sigma Max	Z Isl	Z usl	DPMO
Gap	27.625	28.875	28.25	0.05103	27.94381	28.55619	9.80	0.00	1000000

Figura 2.7.3. Hoja de cálculo con análisis del gap “altura” para carretes de 42-24-24 2C y 60-32-32 3C

En los resultados obtenidos del análisis del gap “altura” se puede apreciar que los valores de diseño están descentrados (Zusl = 0), esto quiere decir que es inevitable estar fuera de tolerancia. La media calculada para el gap esta en el valor del límite superior de la especificación, considerando la variación, es altamente probable pasar dicho límite.

Los análisis previos han sido de gran utilidad para determinar que efectivamente se tiene un problema serio con las tolerancias actuales que aplican para el ensamble y manufactura de los carretes. Por lo tanto, es de gran relevancia el estudio que se pretende iniciar en la siguiente etapa de esta investigación. La aplicación de las técnicas de Diseño para Six Sigma para este caso de estudio será el soporte para la solución de dicha problemática.

### **2.8 CONCLUSIONES**

En el segundo capítulo se desarrolló una explicación detallada sobre los componentes de un carrete de madera, se explicó a detalle el cálculo para determinar la capacidad de empaque de los carretes.

También se explicó el término de análisis de tolerancias, se ilustraron los tipos de estudio de tolerancias y se detalló el tipo de tolerancias lineales. Por último se realizó un análisis previo de las tolerancias de diseño para validar si de entrada hay alguna inconsistencia que genere problemas de ensamble.

En el siguiente capítulo se presentará el desarrollo de la etapa de Definición del DFSS para la presente investigación. En dicha etapa se detallará la selección del proyecto, la función de despliegue de calidad (QFD), el análisis de los sistemas de medición (Gage R&R) y la descripción de los beneficios financieros.

## **ÍNDICE**

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
INDICE .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
RESUMEN .....	xi
LISTA DE ABREVIACIONES .....	xii

### **CAPÍTULO I: Introducción**

1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA .....	2
1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACION .....	3
1.4 OBJETIVO DE LA INVESTIGACION .....	3
1.5 JUSTIFICACION .....	4
1.6 ALCANCE .....	4
1.7 UTILIDAD .....	5
1.8 RESULTADOS ESPERADOS .....	5
1.9 CONCLUSIONES .....	5

### **CAPÍTULO II: Marco Teórico**

2.1 ¿QUE ES UN CARRETE DE MADERA?.....	6
2.2 COMPONENTES DE UN CARRETE DE MADERA .....	7
2.3 PROCESO DE FABRICACION DE COMPONENTES DE CARRETE DE MADERA .....	9
2.4 PROCESO DE MONTAJE DE CARRETE DE MADERA .....	11
2.5 CAPACIDAD DE EMPAQUE EN CARRETES .....	12
2.6 ANALISIS DE TOLERANCIAS .....	15
2.7 ANALISIS DE TOLERANCIAS LINEALES .....	16

### **CAPÍTULO III: Etapa de Definición**

3.1 SELECCIÓN DEL PROYECTO .....	22
3.2 QFD.- FUNCION DE DESPLIEGUE DE CALIDAD .....	24
3.3 IDENTIFICACION DE CRITICOS DE CONTROL DE CALIDAD (CTQS) .....	26
3.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DESARROLLO DE DISEÑO PARA SIX SIGMA DEL MONTAJE DE CARRETES DE MADERA .....	26
3.5 CUANTIFICACION DE BENEFICIOS .....	27
3.6 CONCLUSIONES .....	29

### **CAPÍTULO IV: Etapa de Medición**

4.1 MAPA DE PROCESOS .....	30
4.2 CTQ FLOW DOWN .....	32
4.3 GAGE R&R .....	32
4.4 RECOLECCION DE DATOS .....	33
4.5 CONCLUSIONES .....	34

### **CAPÍTULO V: Etapa de Análisis**

5.1 ESTUDIO DE ESTADISTICA DESCRIPTIVA .....	35
5.2 ANALISIS DE VARIANZAS .....	37
5.3 ESTUDIO DE CAPACIDAD DE PROCESO FLOW UP.....	38
5.4 SCORECARDS DEL PROCESO .....	41
5.5 CONCLUSIONES .....	43

### **CAPÍTULO VI: Etapa de Diseño**

6.1 DISEÑO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA .....	44
6.2 SIMULACION DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA .....	46
6.2.1 Simulación del Largo de Carrera .....	47
6.2.2 Simulación de la Longitud Exterior del Carrete .....	48
6.2.3 Simulación de la Longitud Exterior de Herrajes .....	49

6.2.4 Simulación de la Altura de Trabajo .....	51
6.2.5 Simulación del Gap del Ancho del Router .....	52
6.2.6 Simulación del Excedente de Tuerca y Cazuela .....	53
6.3 ANALISIS DE MODO DE EFECTO DE FALLA .....	54
6.4 ANALISIS DE IMPACTO DE LA VARIACION DE LA CARRERA DEL CARRETE .....	55
6.5 OPTIMIZACION DEL PROCESO Y DEL DISEÑO .....	58
6.5.1 Optimización de Proceso de Ranurado o Router .....	58
6.5.2 Optimización de Proceso Perforación de Cazuela .....	60
6.5.3 Optimización de Proceso Dimensionado de Duela .....	63
6.5.4 Optimización de Simulación del Largo de Carrera .....	65
6.5.5 Optimización de Simulación de Longitud Exterior de Carrete .....	66
6.5.6 Optimización de Simulación de Longitud Exterior de Herrajes .....	67
6.5.7 Optimización de Excedente de Varilla de Herrajes .....	68
6.6 SCORECARDS CON DISEÑO OPTIMIZADO .....	71
6.7 NUEVAS TOLERANCIAS DE DISEÑO .....	73
6.8 SELECCIÓN DE DISEÑO PARA CORRIDA PILOTO .....	74
6.9 CONCLUSIONES .....	74

## **CAPÍTULO VII: Etapa de Validación**

7.1 VALIDACION DEL DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO .....	75
7.1.1 Revisión de Análisis de Modo de Efecto de falla .....	77
7.1.2 Comparativo de Desempeño de Nuevo Diseño .....	77
7.2 VALIDACION DE CAPACIDAD VOLUMETRICA DEL CARRETE.....	78
7.3 VALIDACION DE LOS BENEFICIOS .....	80
7.4 IMPLEMENTACION .....	83
7.5 CONCLUSIONES .....	86

**CAPÍTULO VIII: Conclusiones**

8.1 INTRODUCCION .....	87
8.2 CONCLUSIONES DE LA TESIS .....	88
8.3 TRABAJOS A FUTURO .....	90
APENDICE A .....	91
APENDICE B .....	97
APENDICE C .....	105
BIBLIOGRAFIA .....	108

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.2.1 Componentes y nomenclatura de un carrete de madera .....	8
Figura 2.4.1 Esquema del montaje de carrete de madera .....	11
Figura 2.5.1 Gráfica para cálculo de capacidad de empaque en mts .....	14
Figura 2.6.1 Representación clásica de sistema de tolerancias .....	15
Figura 2.6.2 Tipos de análisis de tolerancias .....	16
Figura 2.7.1 Layout de funciones de transferencia de carretes de madera .....	18
Figura 2.7.2 Análisis de gap “carrera” para carretes 42-24-24 2C y 60-32-32 3C .....	19
Figura 2.7.3 Análisis de gap “altura” para carretes 42-24-24 2C y 60-32-32 3C .....	20
Figura 3.1.1 Gráfica de DPMUs del montaje de carretes de madera .....	23
Figura 3.1.2 Pareto de DPMUs del proceso de montaje de carretes .....	23
Figura 3.2.1 QFD para el proceso de fabricación de carretes .....	25
Figura 3.4.1 Diagrama de flujo para desarrollo de DFSS para carretes .....	27
Figura 3.5.1 Impacto de defectos de tolerancias en carretes .....	28
Figura 3.5.2 DPMUs de defectos de tolerancias y meta del proyecto .....	29
Figura 4.1.1 Mapa de procesos de carretes de madera .....	31
Figura 4.2.1 CTQ flow down de carretes de madera .....	32
Figura 4.3.1 Resultados de estudio Gage R&R del sistema de medición .....	33
Figura 5.1.1 Estudio de estadística descriptiva para el largo de duela de carrera de carrete de 32” .....	36
Figura 5.2.1 Resultados de estudio de homogeneidad de varianza para largo de duela .....	37
Figura 5.3.1 Capacidad de proceso para largo de duela de 32” .....	40
Figura 5.3.2 Estudio de capacidades de proceso flow up para carretes de madera ..	41
Figura 5.4.1 Scorecards para componentes de carretes de madera .....	42

<b>Figura 6.1.1</b>	<b>Diseño de funciones de transferencia .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 6.2.1.1</b>	<b>Simulación del largo de carrera .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 6.2.2.1</b>	<b>Simulación de la longitud exterior del carrete .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 6.2.3.1</b>	<b>Simulación de la longitud exterior de herrajes .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 6.2.4.1</b>	<b>Simulación de la altura de trabajo .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 6.2.5.1</b>	<b>Simulación del gap del ancho del router .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 6.2.6.1</b>	<b>Simulación del excedente de tuerca y cazuela .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 6.3.1</b>	<b>AMEF para diseño de carrete de madera .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 6.4.1</b>	<b>Comparativo de eficiencia de capacidad volumétrica .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 6.4.2</b>	<b>Simulación de carrera de carrete de 54” con tolerancias del cliente .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 6.5.1.1</b>	<b>Mejoras al proceso de fabricación de router .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 6.5.1.2</b>	<b>Capacidad de proceso para manufactura de router con apoyo.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 6.5.2.1</b>	<b>Proceso mejorado de perforación de cazuela .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 6.5.2.2</b>	<b>Capacidad de proceso para perforación de cazuela .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 6.5.3.1</b>	<b>Proceso mejorado para ajuste de dimensionado de duela .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 6.5.3.2</b>	<b>Capacidad de proceso para dimensionado de duela .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 6.5.4.1</b>	<b>Simulación de largo de carrera con procesos mejorados .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 6.5.5.1</b>	<b>Simulación de longitud exterior de carrete, procesos mejorados .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 6.5.6.1</b>	<b>Simulación de longitud exterior de herraje, procesos mejorados .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 6.5.7.1</b>	<b>Simulación de excedente de herraje .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 6.5.7.2</b>	<b>Simulación para validar nuevas tolerancias de herraje .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 6.6.1</b>	<b>Scorecards de diseño para componentes de carretes de madera .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 7.1.1.1</b>	<b>AMEF después de implementación de acciones .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 7.2.1</b>	<b>Validación de capacidad volumétrica del carrete .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 7.3.1</b>	<b>Gráfica de ahorros debido a implementación de DFSS en carretes .....</b>	<b>81</b>

<b>Figura 7.2.2 Incremento en cap. de producción debido a reducción de defectos .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 7.4.1 Formato de control de implementación de nuevos diseños .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 7.4.2 Modelo 3D de ensamble de carretes de madera .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 7.4.3 Dibujos de detalle de carretes de madera .....</b>	<b>86</b>

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 2.3.1 Procesos de fabricación de componentes de carretes de madera .....	10
Tabla 2.5.1 Valores empíricos de claro para cálculo de capacidad de empaque .....	13
Tabla 2.7.1 Datos de diseños de carretes rep. para análisis de tolerancias .....	19
Tabla 3.5.1 Despliegue de costo de defectos de carretes fuera de tolerancia .....	28
Tabla 5.1.1 Resumen de estadísticos descriptivos .....	36
Tabla 5.2.1 Resumen de pruebas de homogeneidad de varianza .....	38
Tabla 5.3.1 Tolerancias de componentes de carretes de madera .....	39
Tabla 6.2.1.1 Tolerancias definidas para el largo de carrera .....	48
Tabla 6.2.2.1 Tolerancias definidas para la longitud exterior del carrete .....	49
Tabla 6.2.3.1 Tolerancias definidas para la longitud exterior de herrajes .....	50
Tabla 6.2.4.1 Tolerancias definidas para la altura de trabajo .....	52
Tabla 6.5.4.1 Tolerancias optimizadas para largo de carrera .....	66
Tabla 6.5.5.1 Tolerancias optimizadas para longitud exterior de carrete .....	67
Tabla 6.5.6.1 Tolerancias optimizadas para longitud exterior de herraje .....	68
Tabla 6.5.7.1 Tolerancias optimizadas para longitud de herraje .....	71
Tabla 6.7.1 Tabla de nuevas tolerancias de diseño para carretes de madera .....	73
Tabla 7.1.1 Desempeño de diseño de corrida piloto con nuevas tolerancias .....	76
Tabla 7.1.2.1 Comparativo de desempeño de nuevo diseño vs. diseño obsoleto .....	78
Tabla 7.3.1 Proyección de ahorros debido a implementación de DFSS en carretes .	81
Tabla 7.3.2 Proyección de ahorros por nuevo diseño de longitud de herrajes .....	83
Tabla 8.2.1 Comparativo de procesos antes y después de la mejora .....	89
Tabla 8.2.2 Comparativo de desempeño de diseños y beneficios económicos .....	89

## **RESUMEN**

En prácticamente todos los productos que se manufacturan existen ciertas variaciones que generalmente pasan desapercibidas por el cliente. Las variaciones de los productos toman mayor relevancia cuando se originan dentro de la cadena de suministro.

En nuestro entorno cada vez son más las empresas manufactureras que integran componentes fabricados en diferentes zonas geográficas del mundo a sus productos. Este nuevo enfoque de trabajo provoca que los procesos de montaje sean pieza clave para las operaciones de manufactura de un producto, este es el caso de los embalajes de carretes de madera utilizados para empaque de cables.

Se considera que las configuraciones de proveedores de diferentes zonas geográficas, con diferentes procesos para fabricar las mismas piezas o materia prima, con diferentes niveles de calidad y precisión generan grandes variaciones en la integración final del producto. Además, si a todo esto se añaden las variaciones de los procesos productivos y de mano de obra, se entenderá lo difícil que es controlar las variables para asegurar que la variación final del producto sea mínima.

Este trabajo de investigación pretende demostrar que es posible determinar las tolerancias adecuadas del ensamble de carretes de madera utilizados para el empaque de cable, también pretende demostrar que es posible controlar la variación del proceso de ensamble de dichos carretes, todo esto mediante la utilización de la metodología DMADV (Por sus siglas en inglés, Define, Measure, Analyze, Design and Verify) de Six Sigma.

Se tienen referencias de la metodología de Six Sigma utilizada por General Electric para el desarrollo de este tipo de proyectos, la cual será utilizada como una base para realización de esta investigación.

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

<b>DMAIC</b>	Define, Measure, Analyze, Improve, Control. (Definición, Medición, Análisis, Mejora, Control)
<b>DMADV</b>	Define, Measure, Analyze, Design, Validate. (Definición, Medición, Análisis, Diseño, Validación)
<b>DFSS</b>	Design for Six Sigma Diseño para Six Sigma
<b>QFD</b>	Quality Function Deployment Función de despliegue de calidad
<b>CTQ</b>	Critical to Quality Crítico de calidad
<b>R&amp;R</b>	Repetibilidad y Reproducibilidad
<b>AMEF</b>	Análisis de modo de efecto de falla
<b>LEI</b>	Límite de especificación inferior
<b>LES</b>	Límite de especificación superior
<b>s</b>	Sigma, desviación estándar
<b>s<sup>2</sup></b>	Sigma al cuadrado, varianza
<b>m</b>	Media
<b>PPM</b>	Partes por millón
<b>DPMU</b>	Defectos por millón de unidad
<b>DPMO</b>	Defectos por millón de oportunidad
<b>Z</b>	Nivel de sigma

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la presente Tesis del Ing. Juan José Villarreal Solís sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias con Especialidad en:

**SISTEMAS DE MANUFACTURA**

Comité de Tesis

---

Alberto Hernández Luna, Ph. D.

**ASESOR**

---

Noel León Rovira, Ph. D.

**SINODAL**

---

Jesús Salvador Arreola Risa, Ph. D.

**SINODAL**

**APROBADO**

---

Federico Viramontes Brown, Ph. D.

Director de Programa de Graduados en Ingeniería

DICIEMBRE, 2004

## **APÉNDICE C.- ANALISIS MONTECARLO Y CRYSTALL BALL**

### **Análisis Montecarlo**

El método de Montecarlo es en realidad una simulación computacional de la producción del ensamble. Para implementarlo se requiere también reducir una función de transferencia, tal y como en el método de las derivadas parciales. Una vez que se tiene la función de transferencia, se generan aleatoriamente valores para cada uno de los factores. Se sustituyen estos valores en la función de transferencia y se calcula el valor correspondiente de la variable estudiada.

Este valor se guarda y el proceso se repite un número de veces. Al final, se tiene una población virtual de valores de la variable en cuestión, la cual se puede estudiar tal y como se haría con una población real. Se puede obtener directamente un valor de PPM (multiplicando por 1E6/numero de simulaciones), o se puede obtener el nivel sigma basándose en la desviación estándar de la muestra y utilizando la fórmula del Apéndice A.

Los valores aleatorios para cada uno de los factores de la función de transferencia se generan en base a una distribución probabilística de la cual se conocen la forma y los parámetros (la desviación estándar y la media, en el caso de la distribución normal) [16].

### **Crystal Ball**

La herramienta computacional Crystal Ball es un agregado para MS Excel que es útil para correr análisis de Montecarlo. El modelo matemático o ecuación de transferencia se define en una hoja de calculo de Excel, dedicando celdas para escribir los valores de las variables independientes, otras para calcular valores intermedios, y otras mas para expresar los valores de salida, es decir, la o de las variables estudiadas. Entonces, los macros de Crystal Ball son utilizados para definir las variables independientes (conocidas en Crystal Ball como "assumptions") y las variables dependientes estudiadas (llamadas "forecasts").

Toda vez que se define una celda como "assumption", se debe seleccionar un tipo de distribución para la población de esta variable, y los parámetros que definen la forma de la curva de distribución (en el caso de la normal, la media y la desviación

estándar). La figura C-1 muestra las ventanas que Crystal Ball despliega cuando se define una “assumption”.

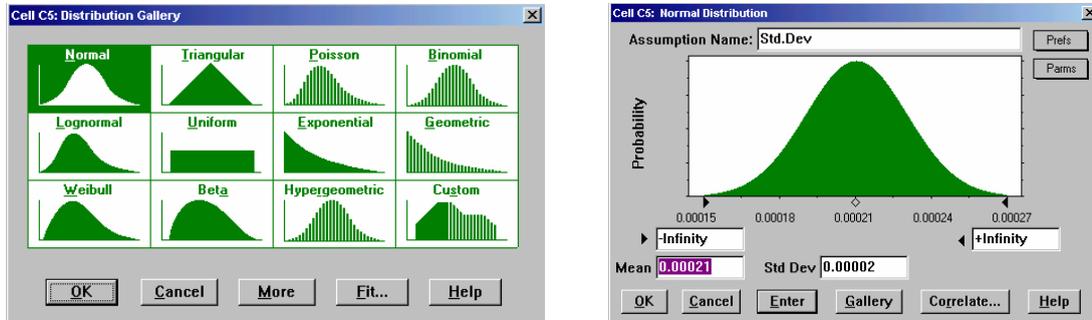


Figura C-1. Ventanas de Crystal Ball para definición de assumptions

Una vez terminado el modelo, se pulsa un botón y Crystal Ball genera un número predeterminado de valores para cada variable independiente (“assumption”) y como resultado Excel calcula el correspondiente valor de las variables dependientes (“forecasts”) de acuerdo a la función de transferencia. Al final, Crystal Ball despliega una dependiente definida, así como los parámetros estadísticos de dicha distribución (entre otras cosas, media y desviación estándar). Es importante observar en esta ventana de salida las variables “skewness” y “kurtosis”, ya que deben tener valores de alrededor de 0 y 3 respectivamente para considerar a la población como normal, si esto es así, el número de corridas fue suficiente, de otra manera, hay que incrementarlo.

Crystal Ball establece límites de control para las simulaciones de 3 desviaciones estándar calculadas de las iteraciones, de tal suerte que al establecer tolerancias más robustas a 3 desviaciones estándar aseguramos que los datos no excedan los límites de control de las simulaciones y por ende que se asegure la eliminación de defectos.

### ¿Porque seleccionar el método estadístico de Montecarlo para calcular capacidad de proce so cuando se involucran tolerancias lineales?

El método de las derivadas parciales es un método determinístico en donde se tiene la certeza de que los valores obtenidos de desviación estándar son los que corresponderían a una cierta característica dadas las desviaciones de los factores que la determinan. Sin embargo, es un método altamente analítico y que resulta extremadamente complicado de implementar cuando se involucran elementos tales como tolerancias geométricas.

En cambio, las tolerancias lineales incluidas en el caso de estudio introducen zonas de tolerancia lineales que son mucho más fáciles de modelar con análisis Montecarlo ya que las ecuaciones de transferencia serían más complicadas y difíciles de derivar parcialmente.

Utilizando el método de Montecarlo, se puede llegar a tener un alto nivel de confianza, a la vez que se simplifica el análisis considerablemente. Utilizando Excel y Crystal Ball, la ecuación de transferencia queda expresada en términos más sencillos en diferentes celdas de la hoja de cálculo. Además, cuando el éxito del ensamble recae en mas de una variable dependiente (y por lo tanto se tiene mas de una función de transferencia), es necesario utilizar estrategias que solo se pueden implementar computacionalmente para calcular la capacidad de proceso del ensamble completo.

## ***BIBLIOGRAFÍA***

- [1] Peter S. Pande, Robert P. Neuman, Roland R. Cavanagh, The Six Sigma Way, 2000, McGraw'Hill.
- [2] Luis Roberto Ramírez Yañez, Modelo para el Desarrollo de la fase Reconocimiento Previa al DMAIC de Seis Sigma, Enero de 2003.
- [3] Carretel de Madeira para acondicionamento de fios e cabos elétricos – dimensões e estruturas, Norma Brasileira NBR 11137
- [4] Binational Wire and Cable Packaging Standard, NEMA WC26/EEMAC 201
- [5] Six Sigma, Tolerance Analysis & Process Capability Modeling, CRD Center for Manufacturing Technology, Version 1.0, May 2000.
- [6] Software QFD Designer V 3.15 by Quality Soft
- [7] Ph. Karen Riding, The Book of Knowledge, 2003, GE Power Systems University
- [8] Dr. Jesús S. Arreola Risa, Apuntes de Sistemas de Mejoramiento Six Sigma, 2003.
- [9] Minitab Statistical Software V 13.1, [www.minitab.com](http://www.minitab.com)
- [10] Edgardo Escalante Vázquez, Seis Sigma, Metodología y Técnicas, Editorial Limusa.
- [11] Design for Six Sigma, Book of Knowledge, Version 1.1 July 2001.
- [12] Crystall Ball 2000 V5.2, Desicioneering, Inc., [www.desicioneering.com](http://www.desicioneering.com)
- [13] Mikel Harry, Reigle Stewart, Six Sigma Mechanical Design Tolerancing, 1988, Motorola University Press
- [14] Dr. Noel León Rovira, Apuntes Análisis y Diseño de Productos, 2001.
- [15] Marvin E. González, La Función de Despliegue de Calidad, Una guía práctica para escuchar la voz del cliente, McGraw Hill, 2001
- [16] Hugo V. Hernández Cárdenas, Calculo de Proceso de Ensamble Utilizando el Método Montecarlo y Límites de Especificación Dinámicos, 2003.

### ***CAPITULO III. - ETAPA DE DEFINICION***

En el capítulo anterior se detallaron los componentes que conforman los carretes de madera, así como también, se explicó el cálculo de la capacidad de empaque de cable para asentar las bases para poder ilustrar al lector en capítulos posteriores los costos de un ensamble de carrete fuera de control.

En el presente capítulo se explicará la fase de Definición de la metodología de Diseño para Six Sigma aplicada al ensamble de carretes de madera.

En esta etapa de Definición del ciclo DMADV el propósito será identificar el producto o proceso a ser mejorado y asegurar la asignación de los recursos para la mejora del proyecto. Esta fase es muy importante debido a que fija las expectativas de mejora del proyecto, además de asegurar que sea mantenido el enfoque de la metodología en los requerimientos del cliente.

#### **3.1 SELECCIÓN DE PROYECTO**

En esta sección se pretende detallar las razones principales por las que la empresa visualizó la necesidad de llevar a cabo el desarrollo e implementación de la metodología de Diseño para Six Sigma por medio de la presente investigación.

En la fabricación de carretes de madera se tienen una serie de operaciones de las que se derivan muchos tipos de defectos. Después de analizar el total de DPMUs de la línea, se puede apreciar en la gráfica de la figura 3.1.1 que el índice defectivo que tiene mayor impacto es el que está relacionado con las tolerancias del carrete. La fabricación de carretes fuera de tolerancia trae como consecuencia una serie de problemas que van desde el reproceso del montaje, reposiciones de producto, incremento de costo de fletes, penalizaciones y rechazos del usuario final.

Por estas razones, se considera fundamental la revisión del proceso de montaje para determinar las variables críticas del proceso en paralelo con la determinación de un sistema de tolerancias que asegure un montaje eficiente.

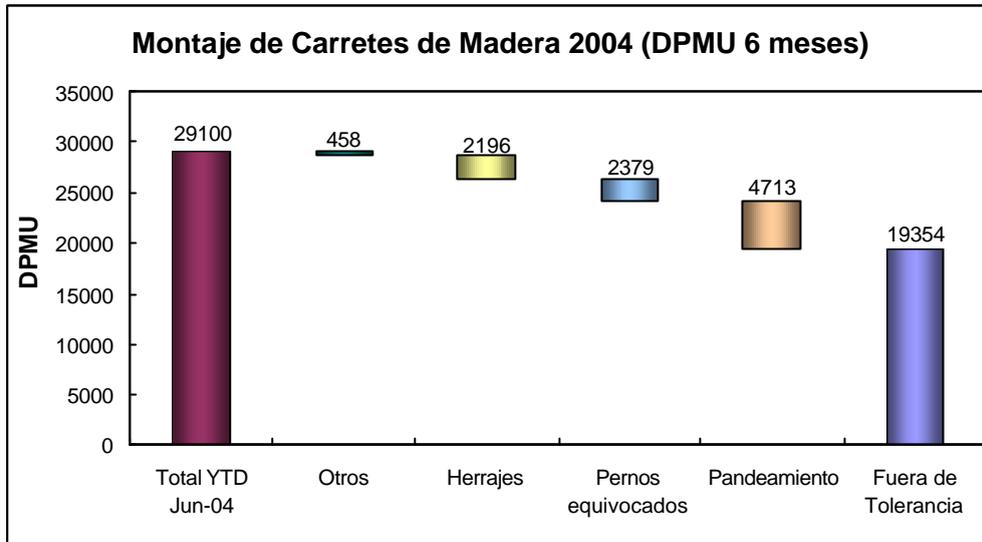


Figura 3.1.1. Gráfica de cascada de defectos por millón de unidad (DPMU) del montaje de carretes de madera

Se considera de acuerdo al pareto de la figura 3.1.2, que una vez solucionados los problemas de tolerancias se estará eliminando el 60% de los defectos de la línea de armado.

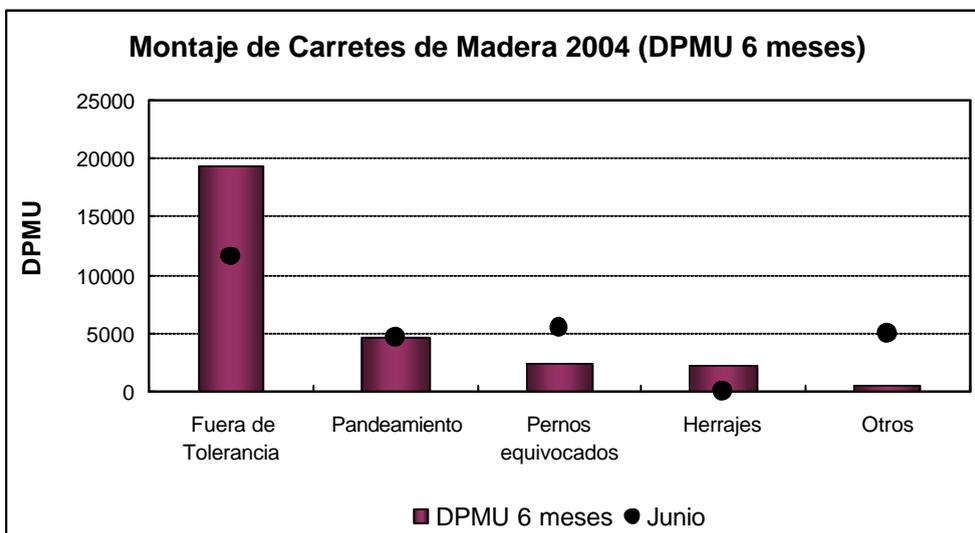


Figura 3.1.2. Pareto de defectos por millón de unidad (DPMU) del proceso de montaje de carretes

Después de haber caracterizado la forma en la cual se distribuyen los defectos en la línea de ensamble, se ha ilustrado claramente la necesidad de llevar el proceso de

montaje de carretes de madera a un nivel Six Sigma que además de reducir notablemente los defectos traerá consigo beneficios económicos e incremento en la productividad.

### **3.2 QFD.- FUNCION DE DESPLIEGUE DE CALIDAD**

Un paso fundamental para esta investigación es plasmar las necesidades reales del cliente (interno y externo). Algunas veces es complicado traducir algunos requerimientos de los clientes en acciones que permitan cumplir en forma concreta con la satisfacción total de dichos requerimientos.

Una herramienta eficaz para asegurar el pleno entendimiento de las necesidades de los clientes es el QFD (Quality Function Deployment). La aplicación de esta herramienta reduce en gran medida el reproceso de información en las etapas de implementación del nuevo diseño (Apéndice B).

En la figura 3.2.1 se muestra un QFD realizado para el proceso de fabricación de carretes de madera utilizando el software QFD Designer [6]; recolectando los comentarios y opiniones de los principales productores de cable del país.

Del QFD se desprenden los siguientes resultados que ayudarán a identificar las principales inquietudes de los clientes:

- a) De acuerdo a los grados de importancia de los QUE's el COMO con la mayor importancia relativa donde se debe de poner mayor énfasis para la satisfacción de los clientes es el de "especificaciones de fabricación", seguido por el de "selección de madera" y "% de humedad".
- b) En la evolución competitiva de los QUE's (clientes) se puede apreciar como la empresa donde realiza el estudio es calificada por debajo de la competencia en cuanto al cumplimiento de normas y dimensiones.
- c) En la evaluación competitiva de los COMO's (ingeniería) el resultado es un desempeño por debajo en cuanto al apego a especificaciones, acabados y calidad de madera.
- d) En la matriz de correlación de los COMO's se tiene que no hay ninguna correlación negativa que afecte la ejecución de un COMO, es decir no hay ninguna correlación que indique que el diseño y la física entren en conflicto.
- e) En la matriz de correlación de los QUE's se aprecia como hay algunos requerimientos de los clientes que entran en conflicto. Un ejemplo es la correlación entre la "resistencia a la carga" y el requerimiento de "ligero".

Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

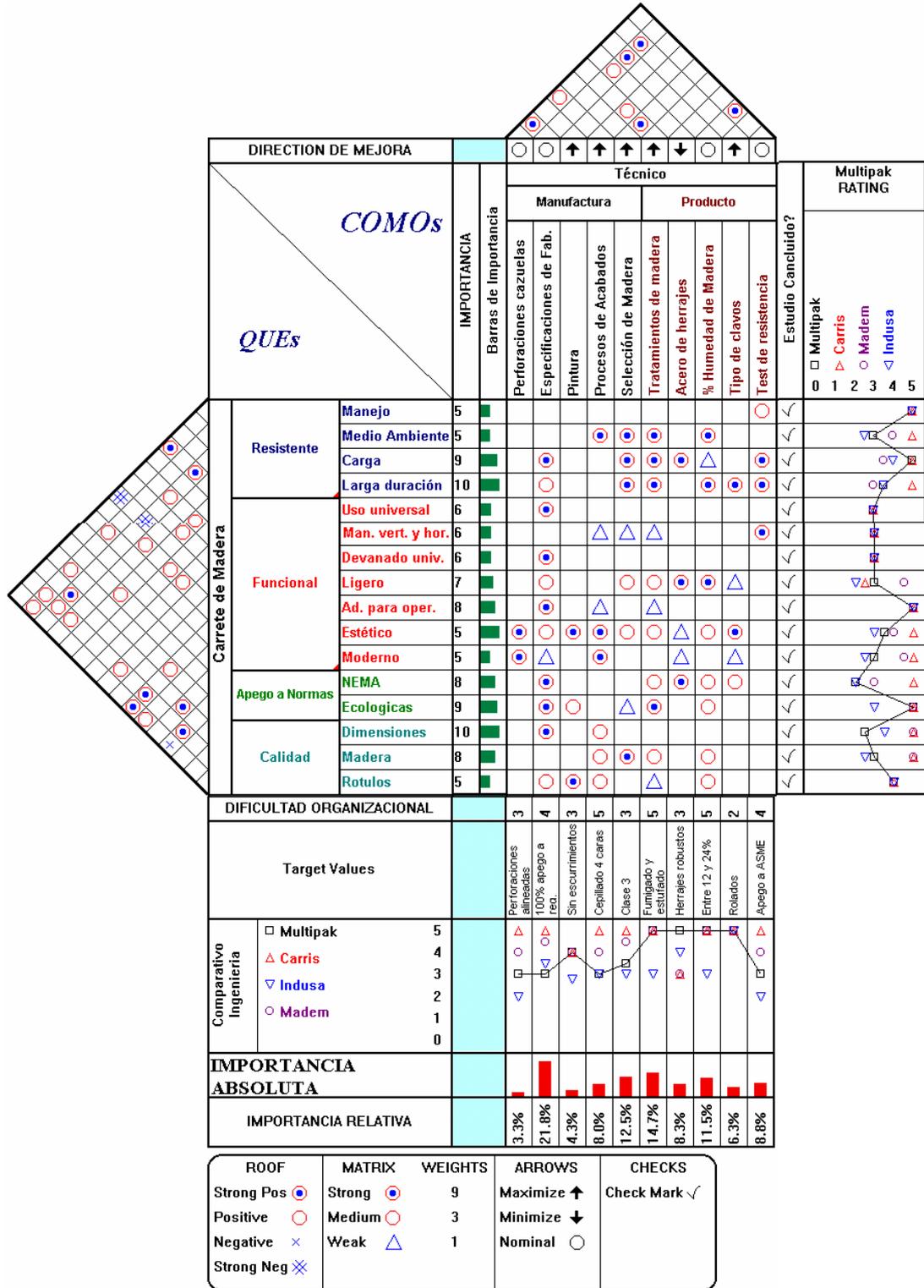


Figura 3.2.1. Función de despliegue de calidad (QFD) para el proceso de fabricación de carretes de madera

Una vez que han sido expresados los resultados del desarrollo del QFD para el proceso de fabricación de carretes de madera se obtiene que una de las principales inquietudes de los clientes es que los carretes cumplan con sus requerimientos dimensionales y con las normas vigentes. También se obtiene que la percepción de los clientes sobre el desempeño de la empresa esta por debajo de algunos competidores, esto indica que es necesario corregir el rumbo de inmediato.

### **3.3 IDENTIFICACION DE CRITICOS DE CONTROL DE CALIDAD (CTQs)**

Para el desarrollo de cualquier proyecto o investigación es sumamente importante identificar las necesidades reales que se pretende satisfacer con el desarrollo del trabajo.

En el caso de este trabajo de investigación se pueden enlistar los CTQs identificados como resultado del QFD. Es importante señalar que cada una de las etapas posteriores de este estudio y sus resultados, tendrán forzosamente que estar direccionados con el cumplimiento y la satisfacción de los CTQs.

Los principales CTQs internos son:

- Tiempo de ciclo de fabricación competitivo
- Montaje eficiente
- Fácil manipulación de herrajes
- Fácil estiba de componentes

Los principales CTQs externos son:

- Competitivo en costo
- Variedad de herrajes
- Alta eficiencia en el manejo
- Compacto y ligero
- Calidad en el servicio y acabados
- Confiabilidad

### **3.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DESARROLLO DE DISEÑO PARA SIX SIGMA DEL MONTAJE DE CARRETES DE MADERA**

En el desarrollo de la fase de Definición de Diseño para Six Sigma es de mucha importancia conceptualizar la forma en la cual se llevará a cabo el desarrollo del proyecto.

El diagrama de flujo de la figura 3.4.1 muestra paso a paso los puntos que se consideran fundamentales para llevar a cabo la investigación en forma satisfactoria y para que se asegure la confiabilidad de los resultados.

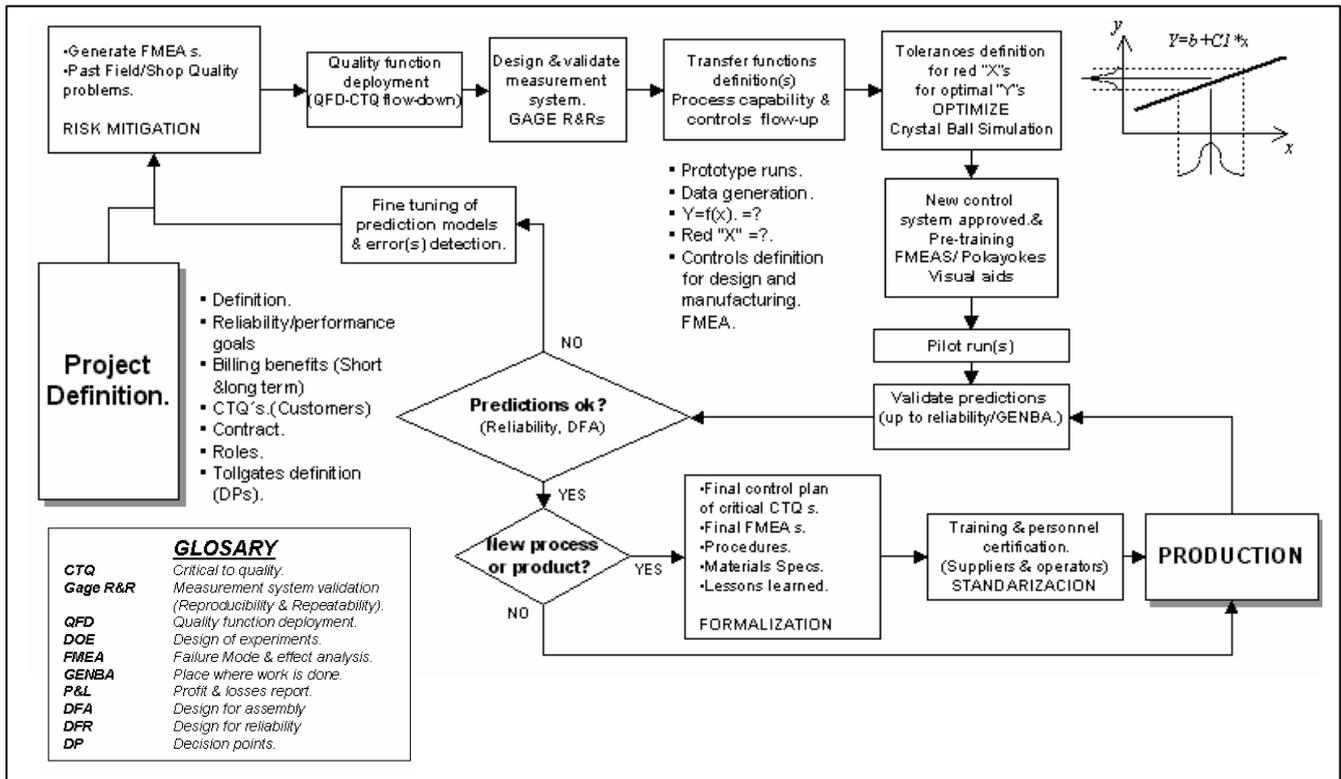


Figura 3.4.1. Diagrama de flujo para desarrollo de Diseño para Six Sigma de carretes de madera [7]

### 3.5 CUANTIFICACION DE BENEFICIOS

El costo de mala calidad derivado de los problemas de tolerancias de carretes es muy elevado. Los defectos generados en un periodo de 6 meses de medición suman 423 carretes. Se estima que aproximadamente el 40% de estos carretes tienen que ser reemplazados en su totalidad; a este costo se tiene que sumar el costo de mano de obra derivada del reproceso de desarmado y armado y del costo de tiempo extra por los carretes que se dejaron de ensamblar durante el horario ordinario.

La tabla 3.5.1 desglosa los costos aproximados en los que se esta incurriendo debido a los defectos de carretes fuera de tolerancia.

**Costo de Mala Calidad**

Tolerancias de Carretes de Madera

Mes	# defectos	# unidades	Impacto en tiempo de ciclo (piezas)	Unidades Potenciales	# Unidades Acumulado	# Unidades Potenciales Ac.	Costo de Reproceso (\$USD)	Costo Tiempo Extra (\$USD)	Costo de Reemplazo (\$USD)
Jan	65	3872	65	3937	3872	3937	\$ 57.02	\$ 114.04	\$ 1,892.98
Feb	66	4085	66	4151	7957	8088	\$ 57.89	\$ 115.79	\$ 1,922.11
Mar	79	3716	79	3795	11673	11883	\$ 69.30	\$ 138.60	\$ 2,300.70
Apr	64	3929	64	3993	15602	15876	\$ 56.14	\$ 112.28	\$ 1,863.86
May	97	2612	97	2709	18214	18585	\$ 85.09	\$ 170.18	\$ 2,824.91
Jun	52	3642	52	3694	21856	22279	\$ 45.61	\$ 91.23	\$ 1,514.39

Tabla 3.5.1. Despliegue de costo de mala calidad de defectos de carretes fuera de tolerancia

La figura 3.5.1 ilustra el impacto de los defectos de tolerancia de carretes, el cual según los datos que se estima es del orden de \$26,800 USD anuales; esto sin considerar de momento el costo de materiales derivado de la operación de adición o sustracción de materiales para reprocesar los carretes.

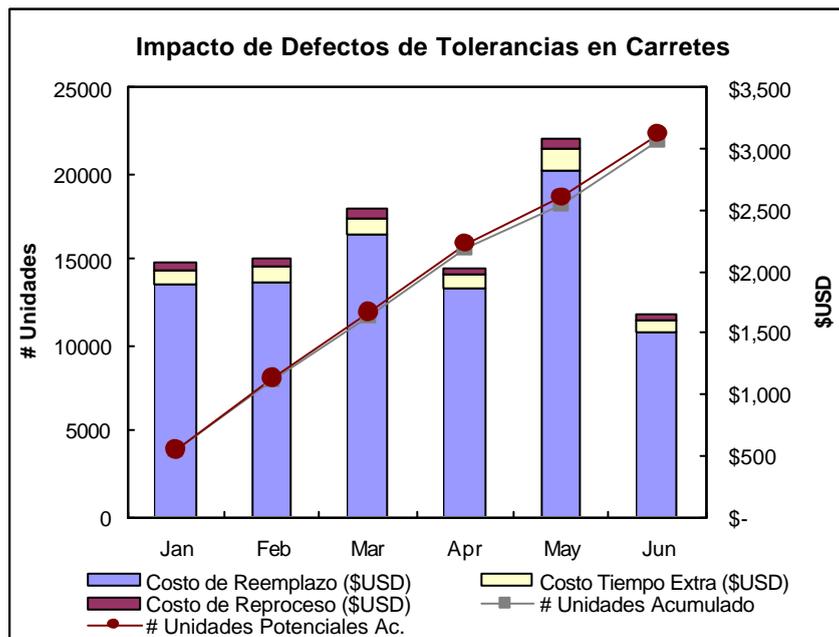


Figura 3.5.1. Impacto de defectos de tolerancias en carretes

Los beneficios de esta investigación por lo tanto, serán la reducción de los DPMUs de carretes fuera de tolerancias cuya meta se muestra en la figura 3.5.2. Con esta reducción se ahorrará el costo de reemplazo, mano de obra debida a reprocesos y tiempo extra de la línea y también el costo de excedente de materiales y de fletes que no ha sido cuantificado.

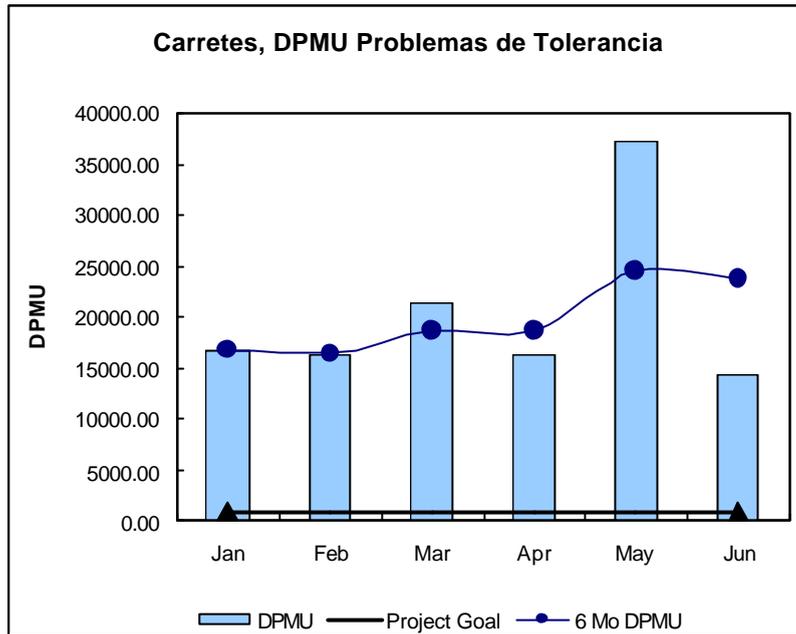


Figura 3.5.2. DPMUs de defectos de carretes fuera de tolerancia y meta del proyecto [8]

### 3.6 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la etapa de Definición vista en este capítulo se detallaron los motivos por los que se seleccionó este proyecto, se identificaron los críticos de control de calidad derivados del ejercicio del QFD.

También, se plasmó el diagrama con los pasos que servirán de guía para el estudio de las tolerancias de carretes y se cuantificaron los beneficios derivados de la mejora.

En el siguiente capítulo se describirá la etapa de Medición del proyecto donde serán identificadas las variables críticas del proceso y se desarrollaran estudios de capacidad de las mismas.

## ***CAPITULO IV.- ETAPA DE MEDICION***

En el capítulo anterior se desarrolló la fase de Definición del proyecto donde se ilustró entre otras cosas, los detalles decisivos para la selección del proyecto, el desarrollo del QFD, la definición de los CTQs y los beneficios financieros.

En el desarrollo de este capítulo se pretende describir en forma detallada la fase de Medición de la investigación de Diseño para Six Sigma de carretes de madera

La etapa de medición en el DFSS es aquella donde son definidas las variables críticas que serán sometidas a análisis, donde se desarrollan los sistemas de medición y donde es determinada la capacidad de proceso de las variables críticas.

Algunas de las herramientas utilizadas para llevar a cabo dicha tarea son:

- Mapa de procesos
- CTQ flow down
- Gage R&R
- Recolección de datos

### **4.1 MAPA DE PROCESOS**

Para iniciar la etapa de medición es necesario identificar y visualizar las variables de entrada y las salidas del proceso para poder relacionar el efecto de las mismas con la manufactura y diseño del carrete.

En el mapa de procesos de fabricación de carretes mostrado en la figura 4.1.1 se visualizan las etapas en un nivel de detalle macro con la pretensión de identificar las áreas que tienen mayor relación e incidencia en el resultado final del producto.



## 4.2 CTQ FLOW DOWN

El CTQ flow down tiene como objetivo “desmenuzar” a través de diagramas los componentes y las dimensiones críticas de un producto con la finalidad de visualizar el árbol que genera las variaciones en el ensamble y dar una idea clara de cómo interactúan cada una de ellas (figura 4.2.1).

Una fase seguida del CQT flow down es el estudio de capacidad de proceso de cada una de los componentes del producto para determinar las que tienen mayor contribución en la variación del ensamble del producto; a este proceso se le conoce como flow up. Dicho estudio se llevará a cabo en fases posteriores de la investigación.

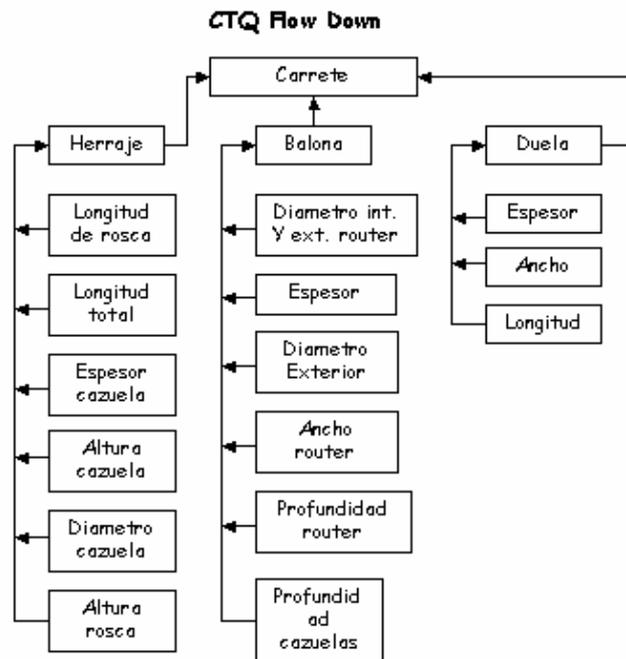


Figura 4.2.1. CTQ flow down de carrete de madera

## 4.3 GAGE R&R

Antes de iniciar la etapa de recolección de datos para revisar la capacidad de proceso de cada uno de los componentes del carrete de madera, es importante determinar si el sistema de medición que se está utilizando es el adecuado.

Un método para validar el sistema de medición es a través del estudio de repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R). El Gage R&R es un estudio mediante el cual

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

se puede analizar la variación del sistema de medición separando la repetibilidad (capacidad de un instrumento para medir con precisión) de la reproducibilidad (capacidad de dos o más personas de reproducir de manera consistente los resultados de la medición utilizando el mismo método). Por lo anterior se puede decir que la repetibilidad dará como resultado la variación del instrumento de medición y la reproducibilidad es la variación referente al método de medición; la suma de ambas variaciones dará como resultado la variación del sistema de medición.

La principal importancia de la realización de este estudio para la investigación es asegurar que la variación obtenida en los estudios de capacidad del proceso sea la de la pieza minimizando al máximo la variación del sistema de medición.

Para validar los sistemas de mediciones que se utilizarán en el desarrollo de la tesis se realizó un Gage R&R en los componentes donde las medidas se consideraron críticas y para cada uno de los instrumentos de medición. Los resultados se ilustran en la figura 4.3.1.

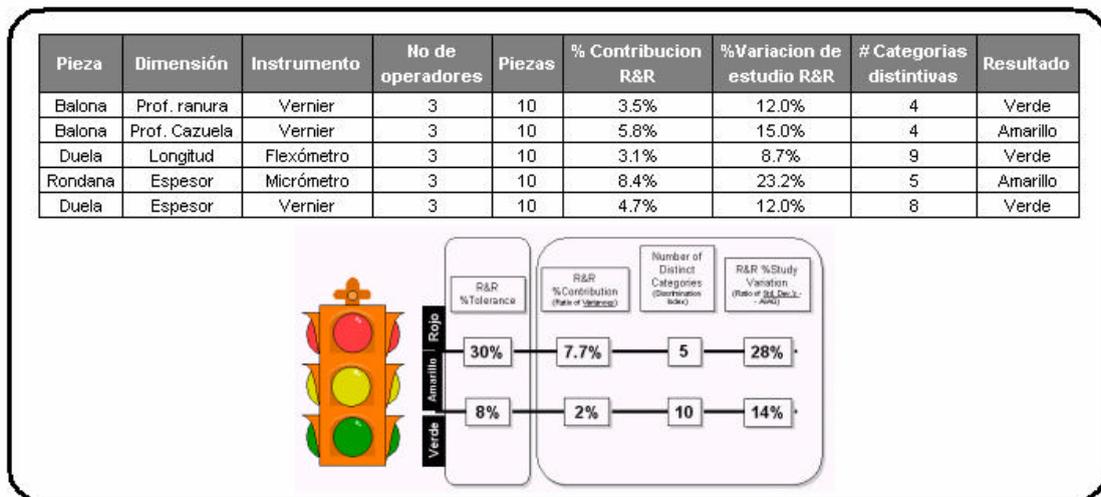


Figura 4.3.1. Tabla con resultados de estudio de repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición

Para el caso de este trabajo de investigación se llevaron a cabo 5 estudios con los que se aseguró la confiabilidad de la recolección de los datos de todas las dimensiones del carrete. Los estudios se realizaron con 10 piezas, 3 operadores y 3 repeticiones.

Son 4 los parámetros que definen si el sistema de medición es aceptable. El “% de contribución R&R” indica el porcentaje de variación (calculado con la varianza) referente al instrumento y al método, de acuerdo a la escala un resultado bueno es

menor al 2%. El “% de variación de estudio R&R” también calcula la variación del instrumento y del método pero realizando el cálculo con la desviación estándar, un resultado bueno de este indicador es uno menor al 14%. El “número de categorías distintivas” indica el número de divisiones en las que el sistema de medición puede medir con precisión a través de la variación del proceso, un resultado bueno es aquel mayor a 10. Por último el “% de tolerancia R&R”, que es la estimación que sirve para evaluar como el sistema de medición puede desarrollarse con respecto a las especificaciones; algunas veces este indicador no es utilizado debido a que las especificaciones pueden estar arbitrariamente muy abiertas o muy cerradas.

Los resultados de la figura 4.3.1, muestran como de acuerdo a la escala los sistemas de medición evaluados tienen resultados que van de regulares a buenos.

### **4.4 RECOLECCION DE DATOS**

El siguiente paso de la investigación después de comprobar que el sistema de medición es confiable, es la recolección de datos. Como estrategia de la investigación se decidió recolectar y analizar los datos de los modelos más representativos (42-24-24 2C y 60-32-32 3C) con la finalidad de validar si tienen el mismo comportamiento estadístico y con esto decidir extender los resultados a todos los modelos de carretes.

### **4.4 CONCLUSIONES**

En este capítulo se describieron las fases del proceso de fabricación de carretes, con sus entradas y salidas mediante el mapa de proceso, también se desarrolló el CTQ flow down para determinar las dimensiones más importantes para el análisis del ensamble y se validó el sistema de mediciones a través de un estudio Gage R&R donde se definieron los instrumentos de medición y se desarrollaron los métodos a través de los cuales se van a recolectar los datos.

En el siguiente capítulo se desarrollará la fase de Análisis donde se validará si los datos de diferentes diseños tienen el mismo comportamiento estadístico, también se llevará a cabo el estudio de capacidad de proceso de los componentes del carrete y se desarrollará el scorecard del producto.

## **CAPITULO V.- ETAPA DE ANALISIS**

En el capítulo anterior se presentó la fase de Medición del proyecto donde fue posible desarrollar el mapa de procesos de la fabricación de carretes de madera, también fue posible mostrar el desglose de los componentes a través de un CTQ flow down y se verificó la confiabilidad del sistema de mediciones mediante un estudio Gage R&R.

En este capítulo se desarrollará la fase de Análisis del proyecto, la cual es una de las fases fundamentales del DFSS. En esta sección se llevará a cabo un análisis detallado de las mediciones recolectadas en la etapa anterior a través de estudios de capacidad de procesos y de análisis de varianzas. También se desarrollará el scorecard del producto.

### **5.1 ESTUDIO DE ESTADISTICA DESCRIPTIVA**

Un paso fundamental para la etapa de Diseño es determinar el tipo de distribución de los datos y sus parámetros estadísticos más relevantes como son la media y la desviación estándar.

En la metodología de Six Sigma se busca siempre comprobar que los datos tienen distribución normal estándar ya que existe un gran número de herramientas muy fáciles de aplicar para este tipo de comportamiento.

Una vez que los datos fueron recolectados con la ayuda del software Minitab [9] se analizaron los datos de cada una de las dimensiones de los modelos más representativos (42-24-24 2C y 60-32-32 3C) para poder comprobar que tienen una distribución normal y para obtener sus datos estadísticos descriptivos.

La figura 5.1.1 muestra la gráfica con los resultados de una corrida para el largo de la duela de 32" de carrera. Con los resultados de dicha gráfica podemos determinar que los datos recolectados para el largo de la duela para la carrera del carrete de 32" son normales ya que el valor de  $P > 0.05$ ; también de la misma gráfica se extrae el valor de la media que es igual a 33.1366 y de la desviación estándar que es de 0.1644. Estos datos serán de vital importancia para la etapa de Diseño de esta tesis.

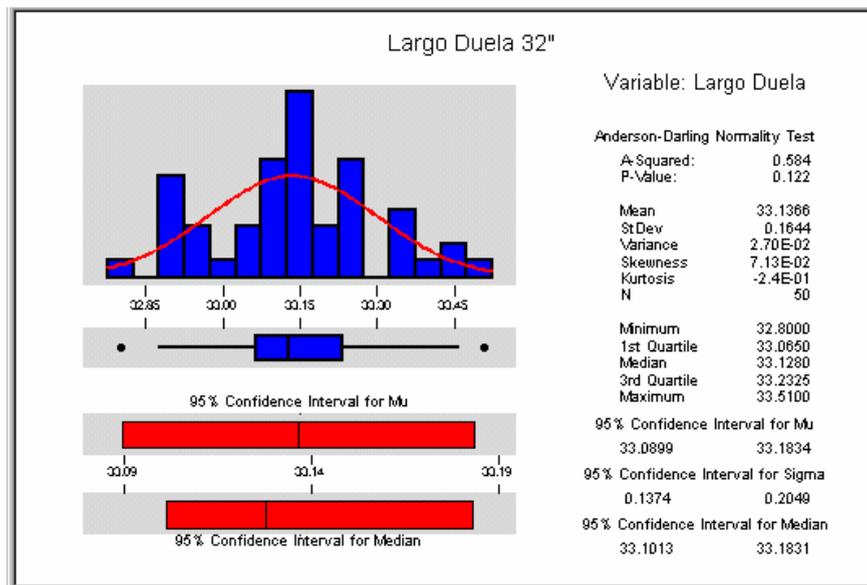


Figura 5.1.1. Estudio de estadística descriptiva para el largo de duela de carrera de carrete de 32"

Los resultados del estudio de todas las dimensiones se pueden observar en la tabla 5.1.1. Se puede apreciar que los valores de P del espesor de la balona y de la profundidad del router están por debajo de 0.05, lo cual significa que el proceso de momento no tiene una distribución normal. Más adelante, en el desarrollo de esta etapa de Análisis se determinará el trato para esas dimensiones.

Modelo	Est. Descriptiva	Duela		Herraje
		Espesor	Largo	Largo
42-24-24 2C	Valor de P	0.4270	0.4000	0.7250
	Media (in)	0.7540	24.8773	27.7560
	Desv. Est. (in)	0.0317	0.1530	0.0229
60-32-32 3C	Valor de P	0.4080	0.1220	0.7250
	Media (in)	1.2590	33.1366	37.0060
	Desv. Est. (in)	0.0321	0.1644	0.0229

Modelo	Est. Descriptiva	Balona								
		Espesor	Ancho Router	Diámetro Balona	Diámetro Ext. Router	Profundidad Router	Centro	Pernos	Profundidad Cazuela	Diametro Cazuela
42-24-24 2C	Valor de P	0.0000	0.0530	0.1080	0.0640	0.0320	0.4270	0.4270	0.4030	0.1110
	Media (in)	1.5003	0.8754	41.1126	23.1205	0.2965	3.1259	1.5009	0.5046	2.0494
	Desv. Est. (in)	0.0219	0.0018	0.0899	0.0842	0.0675	0.0048	0.0048	0.1509	0.0430
60-32-32 3C	Valor de P	0.0000	0.2320	0.2050	0.1450	0.0120	0.4270	0.4270	0.2560	0.1780
	Media (in)	2.0627	1.5002	60.1110	31.1402	0.4428	3.1259	1.5009	0.6057	3.0457
	Desv. Est. (in)	0.0242	0.0031	0.0900	0.0881	0.0752	0.0048	0.0048	0.1510	0.0411

Tabla 5.1.1. Resumen de estadísticos descriptivos

## 5.2 ANALISIS DE VARIANZAS

En la sección 4.4 de esta tesis se comentó sobre la estrategia de analizar los datos de los modelos más representativos (42-24-24 2C y 60-32-32 3C) y se señaló sobre la intención de validar si tienen el mismo comportamiento estadístico y con esto decidir extender los resultados a todos los modelos de carretes.

A través de un estudio de homogeneidad de varianzas es posible determinar si una serie de datos presentan el mismo comportamiento estadístico para poder manipularlos y estudiarlos como una sola población. Si se determina que los datos de las dimensiones de los 2 diseños de carretes en estudio presentan el mismo comportamiento estadístico se puede asumir que el resto de los diseños se comportan de la misma manera y por lo tanto los resultados del análisis de ambos carretes aplicarán para todos los diseños.

Para poder comparar dimensiones diferentes se tuvo que utilizar los datos por unidad; esto quiere decir que todos los datos se dividieron entre el valor nominal de diseño de la dimensión en estudio.

La figura 5.2.1 muestra la gráfica del estudio de homogeneidad de varianza donde se pretende validar si el largo de duela para carrera de carrete de 24" tiene el mismo comportamiento estadístico del largo de duela para carrera de carrete de 32".

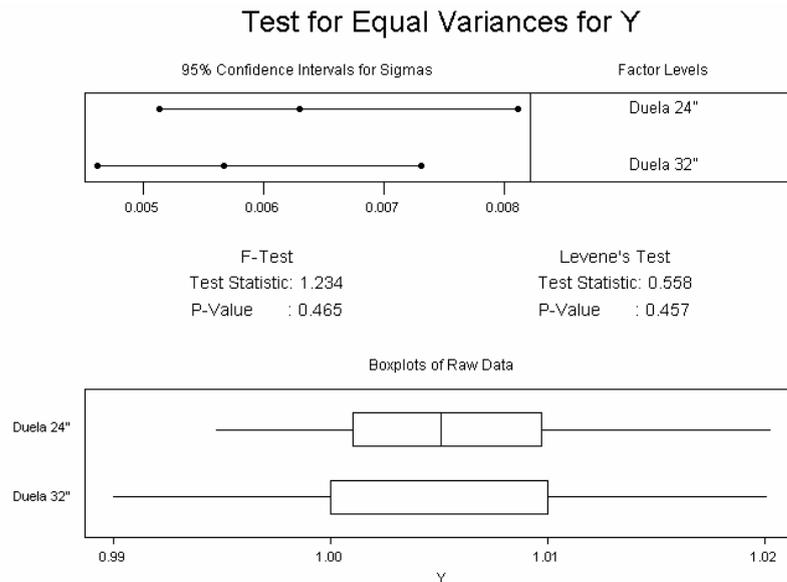


Figura 5.2.1. Resultado de estudio de homogeneidad de varianza para el largo de duela

Se puede apreciar en la figura que el valor de P en la prueba F y en la de Levene's es mayor a 0.05, por lo tanto, ambos largos presentan el mismo comportamiento estadístico. Con esto podemos suponer que la variación de la longitud de duela de todos los diseños es la misma y que los resultados de los estudios posteriores pueden extenderse sin necesidad de un estudio individual.

Los resultados de la prueba de homogeneidad de varianza para determinar si el comportamiento estadístico de las dimensiones de los diseños en estudio son los mismos pueden ser observados en la tabla 5.2.1.

		Prueba de Homogeneidad de Varianza		
		Prueba F	Prueba Levene's	Comportamiento Estadístico
Balona	Espesor	0.104	0.264	Mismo
	Ancho Router	0.658	0.935	Mismo
	Diámetro Balona	0.134	0.153	Mismo
	Diámetro Ext. Router	0.083	0.053	Mismo
	Profundidad Router	0.21	0.267	Mismo
	Centro	-	-	Mismo (todos los diseños)
	Pernos	-	-	Mismo (todos los diseños)
	Profundidad Cazuela	0.047	0.043	Diferente
	Diametro Cazuela	0.002	0.001	Diferente
Duela	Espesor	0.001	0.001	Diferente
	Largo	0.465	0.457	Mismo
Herraje	Largo	0.325	0.214	Mismo

Tabla 5.2.1. Resumen de pruebas de homogeneidad de varianza

La forma de estudio de las dimensiones que no presentan el mismo comportamiento estadístico será determinada en una fase posterior de esta investigación.

### 5.3 ESTUDIO DE CAPACIDAD DE PROCESO FLOW UP

Después de haber completado el ejercicio de análisis de varianzas, el siguiente paso de la investigación es analizar mediante un estudio de capacidad de proceso de cada una de los componentes del carrete desglosados en el CTQ flow down.

La finalidad de este estudio es analizar la capacidad de cada una de las dimensiones de los diseños para determinar las que presentan mayor variación y a su vez identificar las que pueden generar problemas en el diseño posterior.

En este punto serán utilizadas las tolerancias actuales del diseño. No hay que perder de vista, de acuerdo a lo comentado en la sección 2.7 de esta investigación que algunas tolerancias son obsoletas y no representan el comportamiento real del producto; de hecho uno de los principales objetivos de esta tesis es determinar las tolerancias adecuadas para asegurar que las variaciones reales no causen rechazos de calidad.

A continuación se presenta la tabla 5.3.1 donde se enlistan las tolerancias que están operando en la actualidad para la fabricación de los componentes del carrete.

	Operación	Rango	Tolerancia	
<b>Balona</b>	Centro		+1/16, -0	
	Pernos		+1/16, -0	
	Espesor		± 1/16	
	Diámetro de Balona	20" a 36"		± 3/16
		36" a 48"		± 1/4
		mayores de 48"		± 3/8
	Altura de trabajo		± 1/4	
	Diámetro de cazuela		± 1/16	
	Profundidad de cazuela		± 3/32	
	Ancho router		± 1/16	
	Profundidad router		± 1/16	
Diam. ext router		± 1/8		
<b>Duela</b>	Espesor		± 1/16	
	Longitud		± 3/32	
<b>Herrajes</b>	Longitud		± 1/8	

Tabla 5.3.1. Tolerancias de componentes de carretes de madera

Con estas tolerancias y utilizando el software estadístico Minitab se corrieron los estudios de capacidades de proceso para cada una de las dimensiones del carrete. La figura 5.3.1 muestra la gráfica con los resultados del estudio de capacidad de proceso para el largo de duela para carrera de carrete de 32". Se puede observar primeramente que tenemos un proceso descentrado ya que los límites de especificación están completamente desalineados con la distribución de los datos; por otro lado, también se aprecia que se tiene una gran dispersión y con esto se puede concluir que la tolerancia utilizada es muy estrecha para el comportamiento actual del proceso.

En la figura 5.3.1 podemos ubicar los valores de Cp y Cpk. El índice Cp se define como la diferencia entre el LES menos el LEI; este valor dividido entre 6 veces la desviación estándar del proceso. Este índice no toma en cuenta el centrado del proceso. Un Cp => 2 indica que se tiene un proceso Six Sigma con 3.4 ppm (Apéndice A).

El índice Cpk se usa para dar seguimiento al proceso con respecto al tiempo, evalúa variación y centrado con base a un solo número [10].

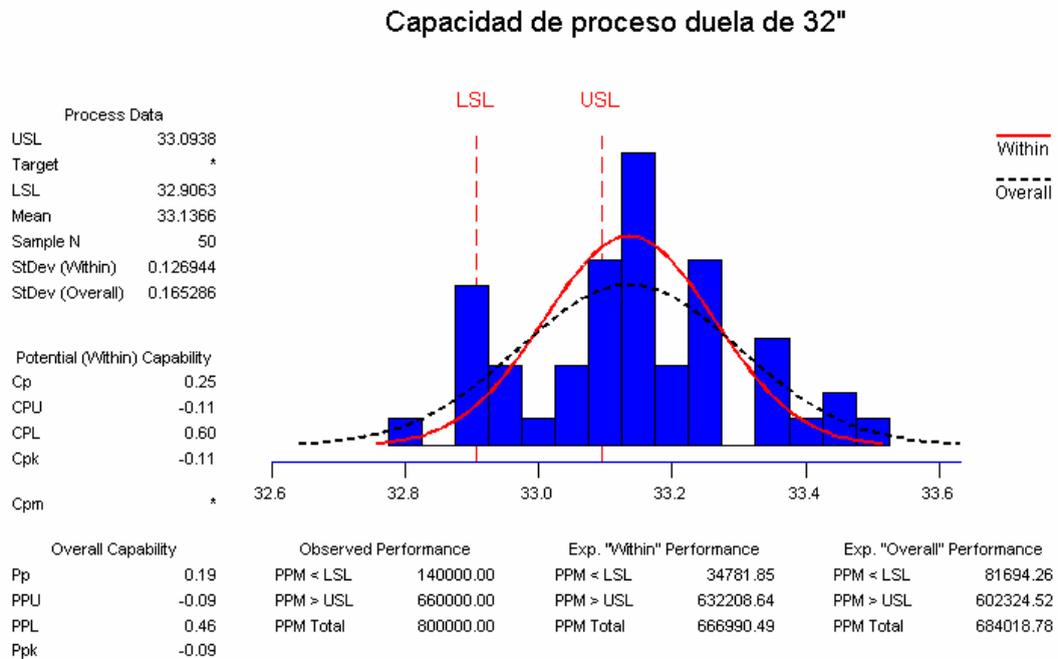


Figura 5.3.1. Capacidad de proceso para largo de duela de 32"

La figura 5.3.2 muestra el resumen del estudio de capacidad de proceso de todas las dimensiones críticas del carrete.

Recordando la sección 4.2 de esta investigación donde se comentó sobre un estudio de capacidades flow up, se explica brevemente que no dicho estudio no es mas que la realización de un estudio de capacidades para cada una de las medidas determinadas en el CTQ flow down.

En general si observamos los resultados del flow up podemos visualizar que la gran mayoría de los estudios arrojaron capacidades de proceso muy pobres ( $C_p < 2$ ), esto nos hace suponer que las tolerancias en la mayor parte de los casos son muy estrechas para el comportamiento actual de los componentes y esto se traduce en problemas de tolerancias en el montaje.

Las dimensiones con el peor desempeño son la longitud de la duela, la profundidad del router, la profundidad de la cazuela y el diámetro exterior del router.

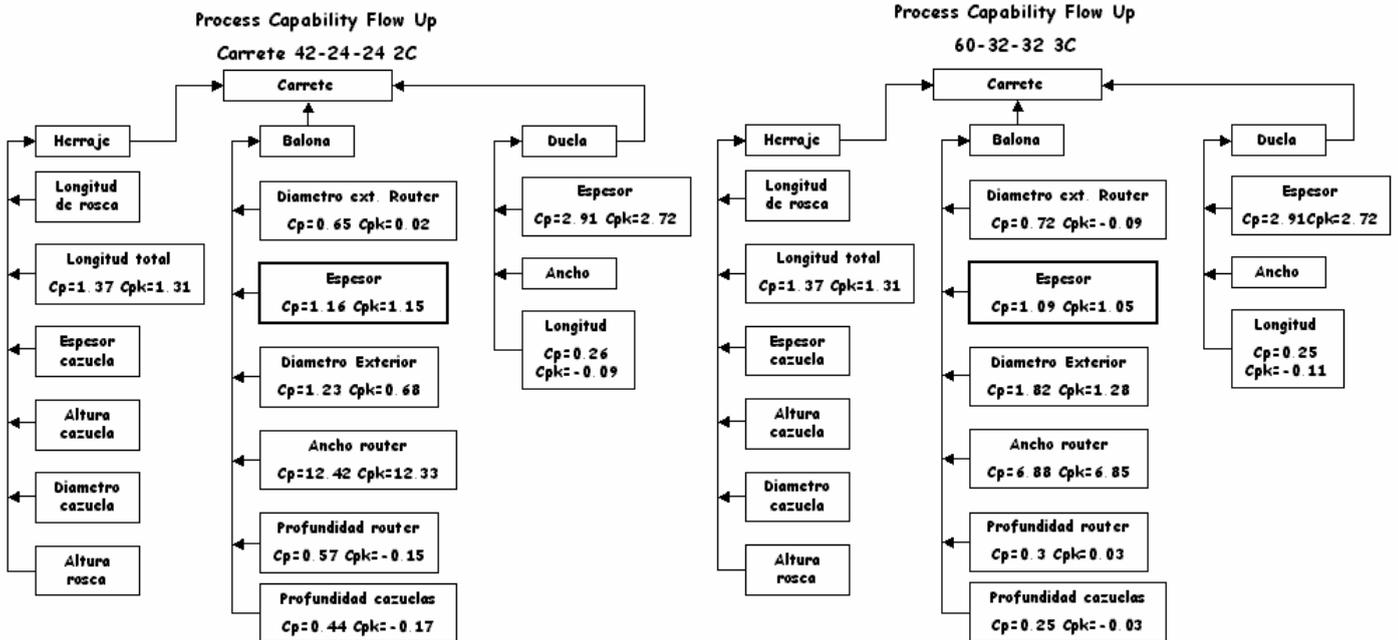


Figura 5.3.2. Estudio de capacidad de proceso flow up para carretes de madera

## 5.4 SCORECARDS DEL PROCESO

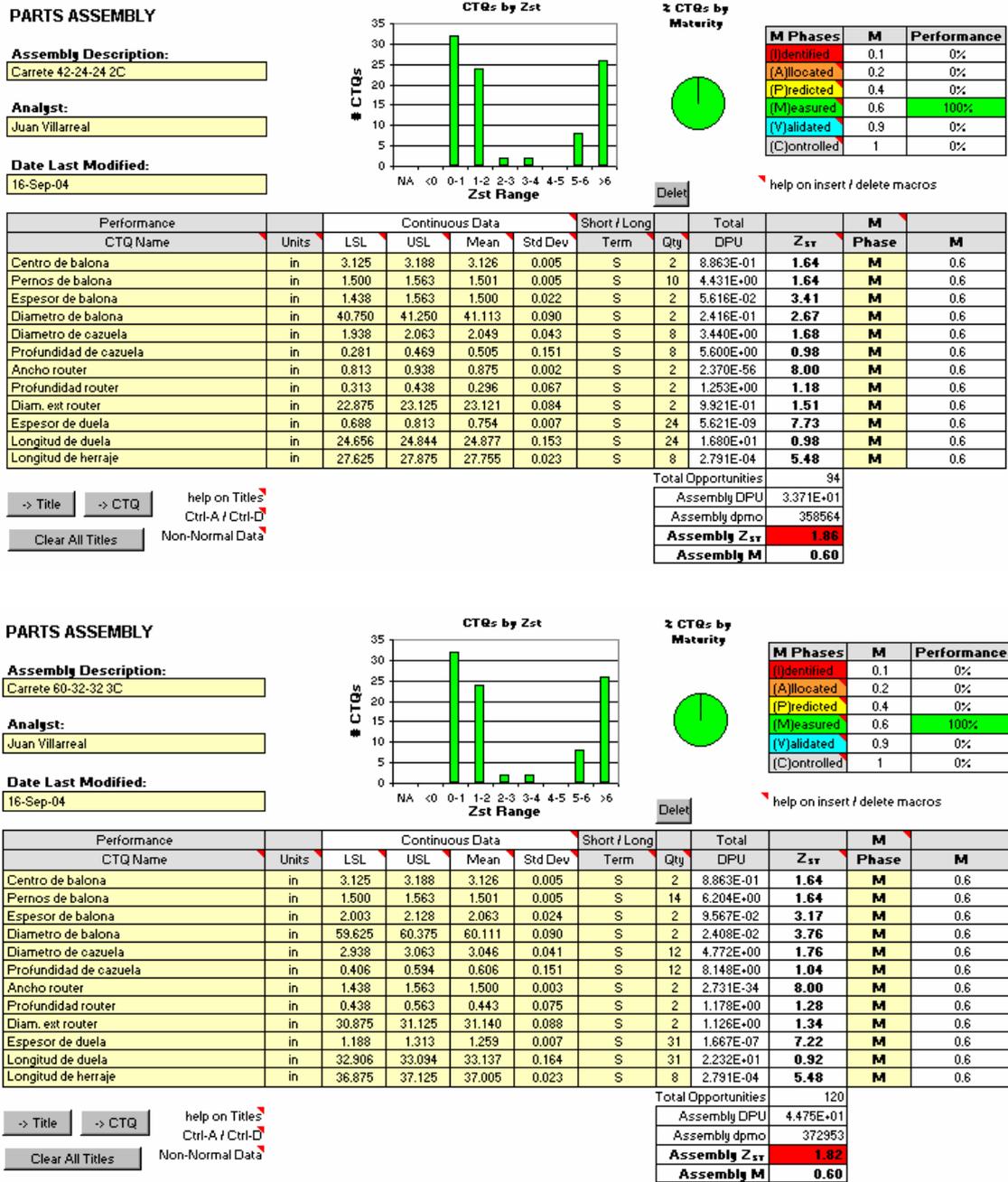
Después de haber realizado el estudio de capacidad de proceso flow up donde los resultados obtenidos dan cuenta de una capacidad pobre de los componentes, es necesario registrar las mediciones para que en la etapa de Diseño después de haber determinado las nuevas tolerancias se pueda comparar el desempeño de las partes del carrete.

Una herramienta de mucha utilidad para esta necesidad y que es comúnmente utilizada en los proyectos DFSS es el scorecard. Un scorecard es una herramienta cuantitativa que usa la estadística para predecir la calidad de partes o sistemas; se enfoca en las características claves de un producto.

La finalidad de esta herramienta es mostrar las mediciones cuantificables de un proyecto en una tabla o gráfica para comparar el desarrollo de un proyecto respecto a objetivos definidos a través del tiempo [11].

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

La figura 5.4.1 muestra los scorecards para los componentes de los carretes 42-24-24 2C y 60-32-32 3C.



**PARTS ASSEMBLY**

**Assembly Description:**  
Carrete 60-32-32 3C

**Analyst:**  
Juan Villarreal

**Date Last Modified:**  
16-Sep-04

**z CTQs by Maturity**

M Phases	M	Performance
(I)dentified	0.1	0%
(A)llocated	0.2	0%
(P)redicted	0.4	0%
(M)easured	0.6	100%
(V)alidated	0.9	0%
(C)ontrolled	1	0%

Total Opportunities: 120

Assembly DPU: 4.475E+01

Assembly dpmo: 372953

**Assembly Z<sub>ST</sub>: 1.82**

**Assembly M: 0.60**

Figura 5.4.1. Scorecards para componentes de carretes de madera

El scorecard de la figura 5.4.1 esta compuesto primeramente por una sección donde se documentan datos generales de la pieza, después por una gráfica de barras donde se muestra el rango de Z de los CTQs estudiados, enseguida una gráfica circular y una tabla las cuales ilustran el grado de madurez de los componentes estudiados (identificados, localizados, predecidos, medidos, validados o controlados).

En la parte inferior se tienen los títulos de los ensambles con sus CTQs y sus estadísticos descriptivos, en esa misma sección se captura el grado de madurez y se calculan los valores de Z. Por último en la parte inferior se tiene el valor de Z del conjunto de CTQs y la madurez del ensamble.

Podemos apreciar que el valor de  $Z = 1.86$  para un carrete 42-24-24 2C y de  $Z = 1.82$  para un carrete 60-32-32 3C; estos datos representan un proceso muy pobre. La gran ventaja del scorecard es que se va a poder comparar en una etapa posterior de esta investigación los resultados con un índice de madurez de datos controlados y se va a poder cuantificar la mejora.

## **5.5 CONCLUSIONES**

En el desarrollo de este capítulo fue posible determinar la estadística descriptiva de los componentes del carrete, también fue posible determinar a través de un estudio de homogeneidad de varianza las medidas que presentan un comportamiento estadístico similar y con esto comprobar que se pueden extender los resultados de estudios estadísticos posteriores al resto de los diseños de carretes.

Además en este capítulo se desarrolló un estudio de capacidad de proceso flow up para poder visualizar aquellos componentes que están contribuyendo con una pobre capacidad al ensamble y por último se pudieron registrar los resultados en los scorecards para su posterior comparación.

En el siguiente capítulo se dará inicio a la fase de Diseño del proyecto donde se pretende definir las funciones de transferencia del producto, se llevarán a cabo estudios de tolerancias por medio de simulaciones, se definirán nuevas tolerancias de diseño en base a los resultados de las simulaciones, se optimizarán las dimensiones que contribuyan con la mayor variación al diseño, se desarrollará el AMEF para la validación del nuevo diseño y se compararán los scorecards con los resultados obtenidos.

## ***CAPITULO VI.- ETAPA DE DISEÑO***

En el capítulo anterior se presentó la etapa de Análisis de la metodología de DFSS aplicada en el ensamble de carretes de madera. En ese capítulo se hicieron estudios de estadística descriptiva para cada una de las dimensiones que componen el carrete, también mediante un análisis de varianza se determinaron los componentes que presentan el mismo comportamiento estadístico. En la etapa de Análisis se llevó a cabo el estudio de capacidades flow up cuyos resultados fueron plasmados en los scorecards para su análisis posterior.

En el presente capítulo, en el que se llevará a cabo el desarrollo de la etapa de Diseño de la investigación se definirán las funciones de transferencia del producto, se llevarán a cabo estudios de tolerancias a través de simulaciones con análisis Montecarlo, se definirán nuevas tolerancias de diseño en base a los resultados de las simulaciones, se optimizarán las dimensiones que contribuyan con la mayor variación al diseño, se desarrollarán los análisis de modo de efecto de falla para la validación del nuevo diseño y se compararán los scorecards con los resultados obtenidos.

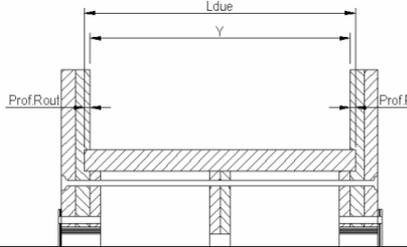
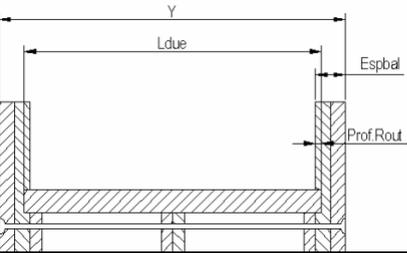
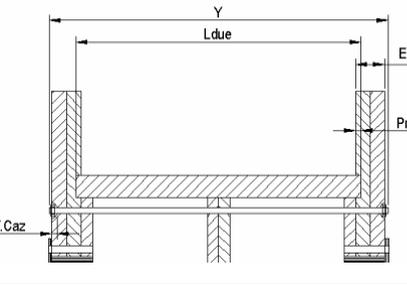
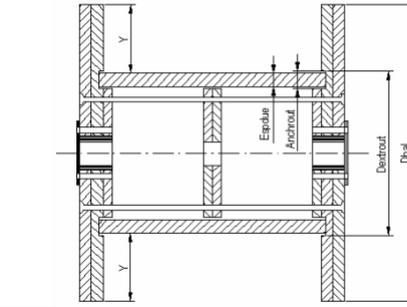
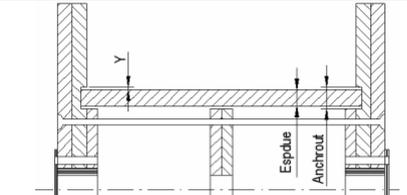
### **6.1 DISEÑO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA**

Una vez que ha sido determinada la capacidad de proceso de los componentes del carrete, el siguiente paso es simular los ensambles con dichas capacidades para determinar las tolerancias óptimas del nuevo diseño.

Un paso sumamente necesario para llevar a cabo dichas simulaciones es la definición de las funciones de transferencia. Se conoce como función de transferencia a aquella función mediante la cual se representa la tolerancia de estudio y que por medio de una simulación ilustra el comportamiento de dicha tolerancia considerando la variación del proceso.

Para el caso de estudio, el ensamble está compuesto por una serie de dimensiones cuya variación interactúa para determinar el comportamiento del ensamble total. Las funciones de transferencia por medio de las cuales serán llevadas a cabo las simulaciones están representadas en la figura 6.1.1.

**Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera**

Esquema de dimensiones	Función de transferencia	Descripción
	<p><b>Largo de Carrera</b>  <math>Y = Ldue - 2Prof.Rout.</math></p>	<p>Ldue = Largo de duela                  Prof.Rout = Profundidad del Router</p>
	<p><b>Longitud Exterior Carrete</b>  <math>Y = 2Espbal + Ldue - 2Prof.Rout.</math></p>	<p>Espbal = Espesor de balona                  Ldue = Largo de duela                  Prof.Rout = Profundidad del Router</p>
	<p><b>Longitud Exterior Herrajes</b>  <math>Y = 2Espbal + Ldue - 2Prof.Rout - 2Prof.Caz + Hcaz + Anchuer</math></p>	<p>Hcaz = Alto de cazuela cte.                  Anchuer = Ancho de tuerca                  Espbal = Espesor de balona                  Ldue = Largo de duela                  Prof.Rout = Profundidad del Router                  Prof.Caz = Profundidad de Cazuela</p>
	<p><b>Altura de Trabajo</b>  <math>Y = Dbal + Dextrout - 2Anchrouit - 2Espdue</math></p>	<p>Dbal = Diámetro de balona                  Dextrout = Diámetro exterior del router                  Anchrouit = Ancho del router                  Espdue = Espesor de duela</p>
	<p><b>Gap Ancho del Router</b>  <math>Y = Anchrouit - Espdue</math></p>	<p>Anchrouit = Ancho del router                  Espdue = Espesor de duela</p>

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

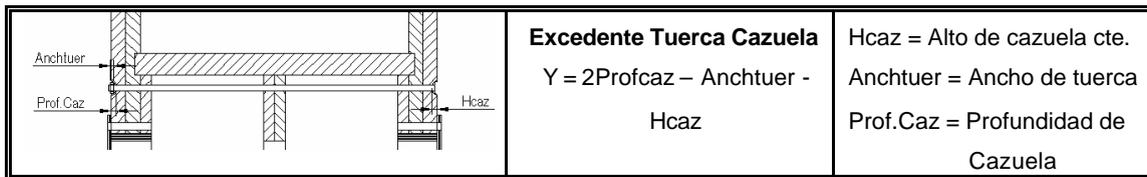


Figura 6.1.1 Diseño de Funciones de Transferencia

## 6.2 SIMULACION DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Una vez que han sido definidas las funciones de transferencia, el siguiente paso es determinar las tolerancias reales más importantes de las dimensiones del ensamble de carrete asegurando que su diseño cumpla con el estándar Six Sigma.

Para poder determinar las tolerancias se procederá a simular las funciones de transferencia con el software Crystal Ball [12].

El primer paso para poder llevar a cabo dicho análisis es obtener la media y la desviación estándar de cada una de las dimensiones de estudio en datos por unidad (PU), esto se logra dividiendo las mediciones entre el valor nominal para luego calcular los valores necesarios.

Como fue definido en la sección 5.2 de este documento la gran parte de las dimensiones en estudio presentan el mismo comportamiento estadístico, por lo tanto, es posible determinar la media y la desviación estándar de cada uno de los diseños en estudio con solo multiplicar los valores de diseño por los valores por unidad.

Para poder facilitar, y además, para asegurar la veracidad de los resultados obtenidos de las simulaciones, se estudiarán de una sola vez todas las dimensiones, incluyendo las que tienen comportamiento estadístico distinto, esto podrá ser posible al seleccionar el caso crítico de las tolerancias con comportamiento distinto y las tolerancias más estrechas resultado del estudio de capacidad de proceso.

Como resultado de la simulación de cada función de transferencia se obtendrán la media y la desviación estándar "real" que se referirán a las predicciones de los casos críticos de las variaciones de los componentes que integran la función de transferencia, de modo tal que para definir una tolerancia que cumpla con Six Sigma para "Y", solo será necesario sumar 3 desviaciones estándar resultado de la simulación para el LES y restar 3 desviaciones estándar resultado de la simulación para el LEI. Con esto se asegura que las dimensiones del ensamble queden dentro de especificación ya que se están considerando los datos del desempeño actual del proceso (largo plazo) y además los límites de control que establece Crystal Ball son de 3 sigmas (Apéndice C).

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Se tiene que señalar que a pesar de que se asegure que el ensamble este dentro de las nuevas especificaciones definidas como resultado de la simulación, puede ser que las nuevas tolerancias queden fuera de las especificaciones del cliente y con esto no podemos hablar de un Diseño Six Sigma.

### 6.2.1 Simulación del Largo de Carrera

El largo de carrera es una de las dimensiones más críticas del ensamble de un carrete de madera, ya que es la que incide directamente en la cantidad de producto que es devanado. El largo de carrera esta determinado por el largo de duela y la resta de la profundidad del router en ambos lados de la balona.

Las carreras de los carretes de madera esta definidas por estándar en rangos de 6 pulgadas entre cada una de ellas. La figura 6.2.1.1 muestra la hoja de cálculo donde se preparó la simulación del largo de carrera de 8 diseños que cubren el total de las carreras estándar. En la columna "Y real" podemos observar como los resultados de la simulación muestran que la media esta por encima del valor de diseño y que el rango de la tolerancia de Diseño Six Sigma es de aproximadamente  $\frac{3}{4}$ " o más para todos los diseños. Como esta es una medida crítica para los clientes, no es factible manejar estas tolerancias de diseño, mas delante en este capítulo, en la sección 6.5 de optimización, se buscará mejorar el desempeño de esta medida.

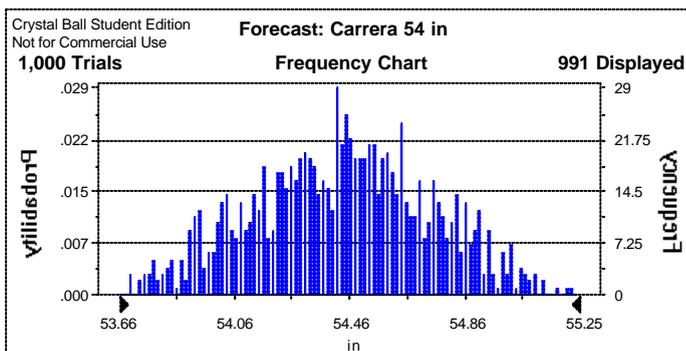
#### Simulación para Tolerancia de Largo de Carrera

	Long. Duela PU	Prof. Router PU
Mean	1.00460	0.83796
Std.Dev	0.00532	0.11877

#### Ec'n de Transferencia

$$Y = Ldue - 2Prof. Router$$

Diseño	Long. Duela dis.	Prof. Router Dis.	Long. Duela Real	Prof. Router Real	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	12.75	0.38	12.80865	0.31424	0.06780	0.04454	12	12.18	0.11	11.85	12.51
30-20-13 2C	20.75	0.38	20.84545	0.31424	0.11035	0.04454	20	20.21	0.14	19.79	20.63
36-18-18 2C	18.75	0.38	18.83625	0.31424	0.09971	0.04454	18	18.22	0.14	17.8	18.64
42-24-24 2C	24.75	0.38	24.86385	0.31424	0.13162	0.04454	24	24.24	0.17	23.73	24.75
54-32-32 3C	33.00	0.50	33.15180	0.41898	0.17549	0.05938	32	32.32	0.21	31.69	32.95
66-36-32 3C	37.00	0.50	37.17020	0.41898	0.19677	0.05938	36	36.33	0.23	35.64	37.02
84-48-48 4C	49.00	0.50	49.22540	0.41898	0.26058	0.05938	48	48.4	0.27	47.59	49.21
96-54-56 4C	55.00	0.50	55.25300	0.41898	0.29249	0.05938	54	54.43	0.31	53.5	55.36



Statistics	
Statistic	Value
Trials	1,000
Mean	54.43
Median	54.44
Mode	---
Standard Deviation	0.32
Variance	0.10
Skewness	0.01
Kurtosis	2.69
Coeff. of Variability	0.01
Range Minimum	53.60
Range Maximum	55.46
Range Width	1.86
Mean Std. Error	0.01

Figura 6.2.1.1 Simulación del largo de carrera

La tabla 6.2.1.1 muestra los resultados del análisis y el diseño de tolerancias. Las tolerancias obtenidas son con base en el valor nominal de diseño y son asimétricas debido a que la simulación dio como resultado valores superiores de las medias a los de diseño.

**Tolerancias Largo Carrera**

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.15	0.51	-0.250	0.625
30-20-13 2C	-0.21	0.63	-0.250	0.750
36-18-18 2C	-0.20	0.64	-0.250	0.750
42-24-24 2C	-0.27	0.75	-0.375	0.750
54-32-32 3C	-0.31	0.95	-0.375	1.000
66-36-32 3C	-0.36	1.02	-0.375	1.250
84-48-48 4C	-0.41	1.21	-0.500	1.250
96-54-56 4C	-0.50	1.36	-0.500	1.375

Tabla 6.2.1.1 Tolerancias definidas para el largo de carrera

## 6.2.2 Simulación de la Longitud Exterior del Carrete

La longitud exterior del carrete esta definida como la longitud medida hasta las caras exteriores de las balonas sin considerar los herrajes. En la conformación de esta dimensión interviene el largo de la carrera más el espesor de las balonas. La figura 6.2.2.1 muestra la hoja de cálculo de la simulación de la longitud exterior del carrete.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

### Simulación para Tolerancia de Longitud Exterior de Carrete

	Long. Duela PU	Prof. Router PU	Esp. Balona
Mean	1.00460	0.83796	1.00056
Std.Dev	0.00532	0.11877	0.01075

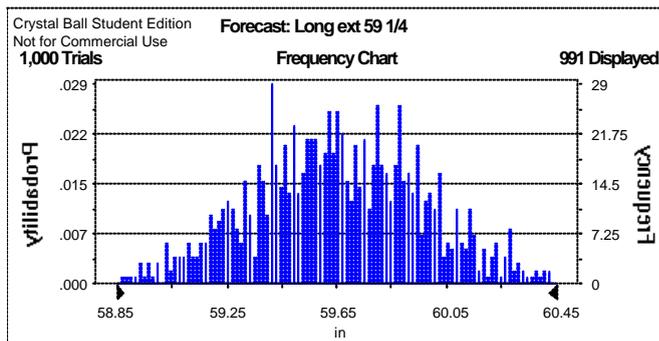
#### Ec'n de Transferencia

$$Y = 2\text{Espbal} + \text{Ldue} - 2\text{Prof. Router}$$

Diseño	Long. Duela Dis.	Prof. Router Dis.	Esp. Balona Dis.	Long. Duela Real	Prof. Router Real	Esp. Balona Real	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	St.dv. Esp. Balona
24-12-10 2C	12.75	0.38	1.50	12.80865	0.31424	1.50084	0.06780	0.04454	0.01612
30-20-13 2C	20.75	0.38	1.50	20.84545	0.31424	1.50084	0.11035	0.04454	0.01612
36-18-18 2C	18.75	0.38	1.50	18.83625	0.31424	1.50084	0.09971	0.04454	0.01612
42-24-24 2C	24.75	0.38	1.50	24.86385	0.31424	1.50084	0.13162	0.04454	0.01612
54-32-32 3C	33.00	0.50	2.06	33.15180	0.41898	2.06366	0.17549	0.05938	0.02217
66-36-32 3C	37.00	0.50	2.06	37.17020	0.41898	2.06366	0.19677	0.05938	0.02217
84-48-48 4C	49.00	0.50	2.63	49.22540	0.41898	2.62647	0.26058	0.05938	0.02821
96-54-56 4C	55.00	0.50	2.63	55.25300	0.41898	2.62647	0.29249	0.05938	0.02821

Diseño	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	15	15.18	0.12	14.82	15.54
30-20-13 2C	23	23.21	0.15	22.76	23.66
36-18-18 2C	21	21.21	0.14	20.79	21.63
42-24-24 2C	27	27.24	0.16	26.76	27.72
54-32-32 3C	36.125	36.44	0.22	35.78	37.10
66-36-32 3C	40.125	40.46	0.23	39.77	41.15
84-48-48 4C	53.25	53.64	0.29	52.77	54.51
96-54-56 4C	59.25	59.66	0.33	58.67	60.65

Figura 6.2.2.1 Simulación de la longitud exterior del carrete



Statistics	
Statistic	Value
Trials	1,000
Mean	59.66
Median	59.65
Mode	...
Standard Deviation	0.32
Variance	0.10
Skewness	-0.01
Kurtosis	2.95
Coeff. of Variability	0.01
Range Minimum	58.53
Range Maximum	60.63
Range Width	2.16
Mean Std. Error	0.01

Figura 6.2.2.1 Simulación de la longitud exterior del carrete

La tabla 6.2.2.1 muestra los resultados del análisis y el diseño de tolerancias. Las tolerancias obtenidas son con base en el valor nominal de diseño y son asimétricas debido a que la simulación dio como resultado valores superiores de las medias a los de diseño.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Tolerancias Longitud Exterior de Carrete

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.180	0.540	-0.250	0.625
30-20-13 2C	-0.240	0.660	-0.250	0.750
36-18-18 2C	-0.210	0.630	-0.250	0.750
42-24-24 2C	-0.240	0.720	-0.250	0.750
54-32-32 3C	-0.345	0.975	-0.375	1.000
66-36-32 3C	-0.355	1.025	-0.375	1.250
84-48-48 4C	-0.480	1.260	-0.500	1.375
96-54-56 4C	-0.580	1.400	-0.625	1.500

Tabla 6.2.2.1 Tolerancias definidas para la longitud exterior de carrete

Al igual que en el largo de carrera la longitud externa del carrete presenta mucha variación y los resultados están por encima de las especificaciones de los clientes.

### 6.2.3 Simulación de la Longitud Exterior de Herrajes

La longitud exterior de los herrajes por diseño debería ser igual a la longitud exterior del carrete. La realidad es que debido a la variación de la profundidad de las cazuelas actualmente se tiene que los herrajes exceden esta dimensión. La figura 6.2.3.1 muestra la hoja de cálculo con la simulación de la longitud exterior de herrajes.

Simulación para Tolerancia de Longitud Exterior de Herrajes de Carrete

	Long. Duela PU	Prof. Router PU	Esp. Balona	Prof. Cazuela	
Mean	1.00460	0.83796	1.00056	1.27820	<i>Ec'n de Transferencia</i>
Std.Dev	0.00532	0.11877	0.01075	0.22248	$Y = 2Espbal + Ldue - 2Prof. Router - 2Prof.Caz + Anchuer + Hcaz$

Diseño	Long. Duela Dis.	Prof. Router Dis.	Esp. Balona Dis.	Prof. Cazuela Diseño	Long. Duela Real	Prof. Router Real	Esp. Balona Real	Prof. Cazuela Real
24-12-10 2C	12.75	0.38	1.50	0.375	12.80865	0.31424	1.50084	0.4793
30-20-13 2C	20.75	0.38	1.50	0.375	20.84545	0.31424	1.50084	0.4793
36-18-18 2C	18.75	0.38	1.50	0.375	18.83625	0.31424	1.50084	0.4793
42-24-24 2C	24.75	0.38	1.50	0.375	24.86385	0.31424	1.50084	0.4793
54-32-32 3C	33.00	0.50	2.06	0.500	33.15180	0.41898	2.06366	0.6391
66-36-32 3C	37.00	0.50	2.06	0.500	37.17020	0.41898	2.06366	0.6391
84-48-48 4C	49.00	0.50	2.63	0.500	49.22540	0.41898	2.62647	0.6391
96-54-56 4C	55.00	0.50	2.63	0.500	55.25300	0.41898	2.62647	0.6391

Diseño	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	St.dv. Esp. Balona	St.dv. Prof. Cazuela	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	0.06780	0.04454	0.01612	0.0834	15	14.99	0.20	14.39	15.59
30-20-13 2C	0.11035	0.04454	0.01612	0.0834	23	23.03	0.22	22.37	23.69
36-18-18 2C	0.09971	0.04454	0.01612	0.0834	21	21.00	0.22	20.34	21.66
42-24-24 2C	0.13162	0.04454	0.01612	0.0834	27	27.03	0.23	26.34	27.72
54-32-32 3C	0.17549	0.05938	0.02217	0.1112	36.125	36.15	0.31	35.22	37.08
66-36-32 3C	0.19677	0.05938	0.02217	0.1112	40.125	40.18	0.31	39.25	41.11
84-48-48 4C	0.26058	0.05938	0.02821	0.1112	53.25	53.37	0.38	52.23	54.51
96-54-56 4C	0.29249	0.05938	0.02821	0.1112	59.25	59.41	0.38	58.23	60.57

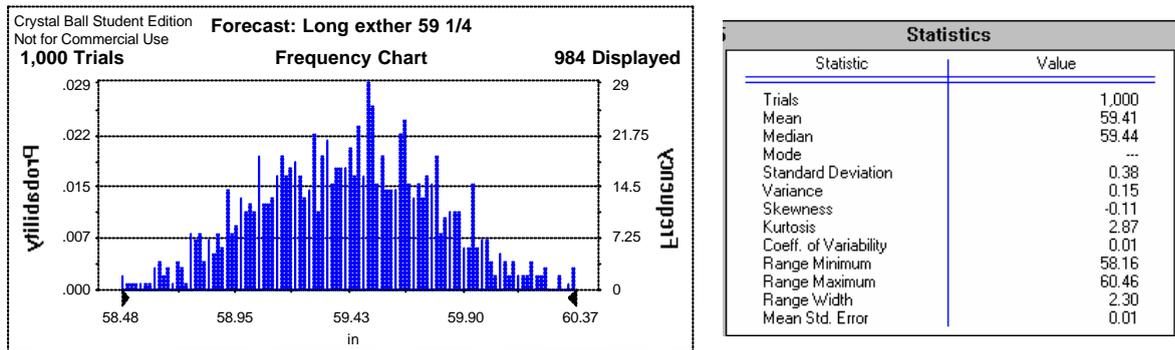


Figura 6.2.3.1 Simulación de la longitud exterior de herrajes

La tabla 6.2.3.1 muestra los resultados del análisis y el diseño de tolerancias. Las tolerancias obtenidas son con base en el valor nominal de diseño.

**Tolerancias Longitud Exterior de Herraje**

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.610	0.590	-0.750	0.750
30-20-13 2C	-0.630	0.690	-0.750	0.750
36-18-18 2C	-0.660	0.660	-0.750	0.750
42-24-24 2C	-0.660	0.720	-0.750	0.750
54-32-32 3C	-0.905	0.955	-1.000	1.000
66-36-32 3C	-0.875	0.985	-1.000	1.000
84-48-48 4C	-1.020	1.260	-1.125	1.375
96-54-56 4C	-1.020	1.320	-1.125	1.375

Tabla 6.2.3.1 Tolerancias definidas para la longitud exterior de herrajes

### 6.2.4 Simulación de la Altura de Trabajo

Otra dimensión de gran importancia en la fabricación del carrete que también incide directamente en la cantidad de producto que puede ser utilizada es la altura de trabajo. La altura de trabajo esta definida por la diferencia entre el diámetro exterior de la balona menos el diámetro donde el cable se asienta en la duela.

La figura 6.2.4.1 muestra la hoja de cálculo donde se muestra la simulación de la altura de trabajo.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

### Simulación para Altura de trabajo

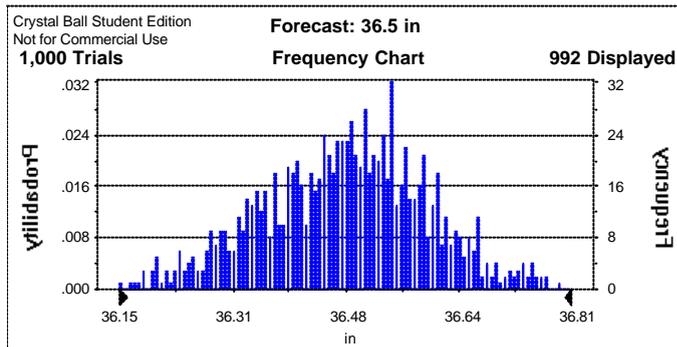
	Diam. Balona	Diam. Ext. Router	Ancho Router	Esp. Duela
Mean	1.00222	1.00494	1.00027	1.00428
Std.Dev	0.00132	0.00243	0.00191	0.00780

#### Ec'n de Transferencia

$$Y = Dbal - Dextrout + 2Anchout - 2Espdue$$

Diseño	Diam. Balona Diseño	Diam. Ext. Router Diseño	Ancho Router Diseño	Esp. Duela Diseño	Diam. Balona Real	Diam. Ext. Router Real	Ancho Router Real	Esp. Duela Real
24-12-10 2C	23.00	10.00	0.87500	0.75000	23.05106	10.04940	0.87524	0.75321
30-20-13 2C	29.00	12.00	0.87500	0.75000	29.06438	12.05928	0.87524	0.75321
36-18-18 2C	35.00	17.00	0.87500	0.75000	35.07770	17.08398	0.87524	0.75321
42-24-24 2C	41.00	23.00	0.87500	0.75000	41.09102	23.11362	0.87524	0.75321
54-32-32 3C	53.00	31.00	0.87500	0.75000	53.11766	31.15314	0.87524	0.75321
72-36-36 3C	71.00	35.00	1.50000	1.25000	71.15762	35.17290	1.50041	1.25535
84-48-48 4C	83.00	47.00	1.50000	1.25000	83.18426	47.23218	1.50041	1.25535
96-54-56 4C	95.00	55.00	1.50000	1.25000	95.21090	55.27170	1.50041	1.25535

Diseño	St.dv. Diam Balona	St.dv. Diam Ext. Router	St.dv. Ancho Router	St.dv. Esp. Duela	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	0.03032	0.02429	0.00168	0.00585	13.25	13.25	0.04	13.13	13.37
30-20-13 2C	0.03822	0.02914	0.00168	0.00585	17.25	17.25	0.05	17.10	17.40
36-18-18 2C	0.04613	0.04129	0.00168	0.00585	18.25	18.24	0.06	18.06	18.42
42-24-24 2C	0.05404	0.05586	0.00168	0.00585	18.25	18.22	0.08	17.98	18.46
54-32-32 3C	0.06986	0.07529	0.00168	0.00585	22.25	22.21	0.10	21.91	22.51
72-36-36 3C	0.09359	0.08500	0.00287	0.00976	36.5	36.48	0.12	36.12	36.84
84-48-48 4C	0.10940	0.11415	0.00287	0.00976	36.5	36.45	0.14	36.03	36.87
96-54-56 4C	0.12522	0.13358	0.00287	0.00976	40.5	40.48	0.16	40.00	40.96



Statistics	
Statistic	Value
Trials	1,000
Mean	36.48
Median	36.48
Mode	---
Standard Deviation	0.12
Variance	0.02
Skewness	-0.13
Kurtosis	2.98
Coeff. of Variability	0.00
Range Minimum	36.08
Range Maximum	36.86
Range Width	0.78
Mean Std. Error	0.00

Figura 6.2.4.1 Simulación de la altura de trabajo

La tabla 6.2.4.1 muestra las tolerancias definidas para la altura de trabajo derivadas de la simulación. A pesar de que esta dimensión es crítica, las especificaciones de los clientes solo se refieren al diámetro de la balona.

Tolerancias Altura de Trabajo

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.120	0.120	-0.250	0.250
30-20-13 2C	-0.150	0.150	-0.250	0.250
36-18-18 2C	-0.190	0.170	-0.250	0.250
42-24-24 2C	-0.270	0.210	-0.375	0.375
54-32-32 3C	-0.340	0.260	-0.375	0.375
72-36-36 3C	-0.380	0.340	-0.500	0.500
84-48-48 4C	-0.470	0.370	-0.500	0.500
96-54-56 4C	-0.500	0.460	-0.500	0.500

Tabla 6.2.4.1 Tolerancias definidas para la altura de trabajo

En este punto de la investigación es conveniente hacer el comentario que de los juegos de tolerancias definidos hasta el momento, el de la altura de trabajo es el que tiene el comportamiento más estable, esto se debe a que cada una de las dimensiones que componen la función de transferencia en forma individual presenta muy poca variación.

### 6.2.5 Simulación del Gap del Ancho del Router

La simulación de este gap es para validar si la tolerancia de diseño actual del ancho del router y de la duela no hace que en algún momento se llegue a tener alguna interferencia. La figura 6.2.5.1 muestra el análisis del gap del ancho del router.

Simulación para Tolerancia del Gap Ancho de Router

	Ancho Router	Esp. Duela									
Mean	1.00027	1.00428									
Std.Dev	0.00191	0.00780									
			<i>Ec'n de Transferencia</i>								
			$Y = \text{Anchrou} - \text{Espdue}$								
Diseño	Ancho Router Diseño	Esp. Duela Diseño	Ancho Router Real	Esp. Duela Real	St.dv. Ancho Router	St.dv. Esp. Duela	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
Gap 1/8"	0.87500	0.75000	0.87524	0.75321	0.00168	0.00585	0.12500	0.125	0.010	0.095	0.155
Gap 1/4"	1.50000	1.25000	1.50041	1.25535	0.00287	0.00976	0.25000	0.250	0.010	0.220	0.280

Figura 6.2.5.1 Simulación del Gap del Ancho de Router

Para esta dimensión aplica el caso crítico donde “Y” es mínimo, para esta tolerancia el valor menor del gap es 0.095”, de tal modo que queda validado que la tolerancia de  $\pm 1/16$ ” (0.0625”) asegura que no generen problemas de ensamble.

**6.2.6 Simulación de Excedente de Tuerca y Cazuela**

El excedente de tuerca y cazuela se refiere a la distancia de la tuerca que sobresale de las caras exteriores de la balona debido a la variación de la profundidad de la cazuela. Por diseño se contempla que la tuerca quede totalmente embebida dentro de la profundidad de la cazuela; es importante definir esta dimensión debido a que los clientes usualmente acostumbran estibar los carretes acostados uno sobre otro. Un gran excedente de la tuerca puede ocasionar que los carretes no puedan ser estibados correctamente.

La figura 6.2.6.1 muestra la hoja de cálculo con la simulación del excedente entre la tuerca y la cazuela.

**Simulación para Excedente de Tuerca y Cazuela**

	<b>Prof. Cazuela</b>							
Mean	1.27820		<i>Ec'n de Transferencia</i>					
Std.Dev	0.22248		Y = 2 Prof.Caz - Anchuer - Hcaz					
<b>Diseño</b>	<b>Prof. Cazuela Diseño</b>	<b>Prof. Cazuela Real</b>	<b>St.dv. Prof. Cazuela</b>	<b>Y Diseño</b>	<b>Y real</b>	<b>St.dv Y</b>	<b>Y min</b>	<b>Y max</b>
Profundidad 3/8"	0.375	0.4793	0.0834	0	0.21	0.17	-0.30	0.72
Profundidad 1/2"	0.500	0.6391	0.1112	0	0.28	0.22	-0.38	0.94

Figura 6.2.6.1 Simulación del excedente de tuerca y cazuela

Se puede observar en la figura anterior que se tiene una gran variación en el resultado de la simulación de esta función de transferencia. Podemos observar que la tuerca puede estar completamente embebida hasta 3/8” o puede exceder la superficie de la balona hasta por más de 3/4”. Por lo tanto, es necesario pensar en mejorar este proceso en la fase de optimización del diseño.

### 6.3 ANALISIS DE MODO DE EFECTO DE FALLA

Un proceso muy importante de la etapa de Diseño de la metodología DFSS es el desarrollo del análisis de modo de efecto de falla (AMEF). El AMEF es un estudio mediante el cual se pretende analizar todas las causas potenciales de falla con la finalidad de mitigar riesgos antes de implementar un nuevo proceso o fabricar un nuevo producto.

Para el caso de estudio de esta tesis el desarrollo del AMEF servirá para detectar desde esta etapa de Diseño los problemas que se pueden presentar con la definición de las tolerancias finales con las que se fabricarán los prototipos en la etapa de Validación.

Un AMEF esta compuesto por 3 conceptos que es importante explicar. La severidad que indica que tan severo puede ser el modo de falla, se mide en escala del 1 al 10 (entre mas grande es mas severo). La ocurrencia se refiere a la frecuencia con la que se puede repetir dicha falla, también se mide en escala del 1 al 10 (entre mas grande es mayor la ocurrencia). Finalmente la detectabilidad se refiere a que tan buenos son los sistemas con los que se cuenta para detectar la falla, también se mide en escala del 1 al 10 (entre mas chica es mayor la posibilidad de detectar la falla).

Otro concepto importante del AMEF es el RPN o número de prioridad de riesgo. El RPN se calcula como el producto de la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad; por lo tanto esta íntimamente relacionado con los efectos, las causas y los controles.

Por lo tanto, el RPN es la salida del estudio AMEF y es un indicador que nos ayuda a visualizar el avance en las acciones recomendadas como una medida para llevar a cabo la mitigación de los riesgos.

La figura 6.3.1 nos muestra la fase inicial del AMEF para el diseño de carretes de madera. Como se puede apreciar en la figura son 5 los problemas identificados como riesgos potenciales en esta etapa. La carrera del carrete y la falta de claridad de las especificaciones de trabajo son las fallas potenciales más críticas ya que ambas cuentan con un RPN de 300.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Artículo / Función	Modo(s) Potencial de la Falla	Efecto(s) Potencial de la Falla	S e v	Causa(s) Potencial de la Falla	O c c u r	Controles Actuales	D e t	R P N	Acción(es) Recomendadas
Ensamble	Incremento de tiempo de ciclo	Incremento de costo de MO	5	Tolerancias muy estrechas	5	Ninguno	2	50	Validar diseño con corrida piloto
Carrera del carrete	Longitud de carrera demasiado corta o larga	Decremento de capacidad de embarque, falta de capacidad de carrete, devolución	10	Definición de tolerancias superiores a las de los clientes	6	Ninguno	5	300	Mejorar proceso de profundidad de router y de cazuelas
Ensamble	Incremento de contenido de materiales	Incremento de costo del carrete	7	Nuevas tolerancias requieren mayor material	5	Ninguno	2	70	Validar diseño con corrida piloto
Falta de claridad de las especificaciones de trabajo	Aplicación de tolerancias equivocadas	Ensamble fuera de tolerancia	10	No se tiene un proceso establecido para manejo de especificaciones	6	Ninguno	5	300	Diseñar formato de especificaciones de fabricación y dibujos de detalle
Mala definición de CTQs del ensamble	Carrete fuera de tolerancia	Devolución o rechazo	5	Falta de especificaciones en piso	9	Ninguno	5	225	Incluir CTQs en formatos de especificaciones

Figura 6.3.1 AMEF para diseño de carrete de madera

Una vez que se ha desarrollado el AMEF se han identificado algunos modos potenciales de efecto de falla y al mismo tiempo se están planteando acciones para mitigar esos riesgos. De tal manera que en una etapa posterior de esta investigación se revisará nuevamente el AMEF en su etapa final donde una vez que las acciones sean ejecutadas deberán de reducirse notablemente los valores de los RPNs.

### 6.4 ANALISIS DE IMPACTO DE VARIACION DE LA CARRERA DE CARRETE

Como resultado de las simulaciones de las funciones de transferencia se pudo observar que las tolerancias donde se presenta la mayor variación son las que están relacionadas con la longitud de la carrera del carrete.

Considerando que los clientes especifican valores menores a la variación que estamos obteniendo, es difícil suponer que podrán aceptar las tolerancias que estamos definiendo como resultado del estudio, por lo tanto, antes de enlistar de manera definitiva los conjuntos de tolerancias, será necesario trabajar en mejorar los procesos para obtener mejores capacidades que permitan tolerancias dentro de los parámetros de nuestros clientes.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Como una muestra del problema de trabajar con las tolerancias que han sido definidas, se va a proceder a cuantificar el impacto de la variación.

Primeramente tenemos el impacto de los casos críticos donde se combinan ambos límites inferiores de especificación y ambos límites superiores de especificación. La figura 6.4.1 muestra el cálculo de la capacidad volumétrica de algunos diseños considerando las tolerancias de la longitud de la carrera y de la altura de trabajo obtenidas en las simulaciones de este capítulo.

### Cálculo de Capacidad Volumétrica de Carrete

#### Capacidad con Variación Actual de Proceso

Diseño	B (in)	D (in)	C (in)		Y (in)		A (in)	X (in)	F (Pies)	
			LEI	LES	LEI	LES			LEI	LES
24-12-10 2C	9	1.00	11.75	12.63	5.7895	6.05263	23.00	1.00	245.23	280.22
30-20-13 2C	12	1.00	19.75	20.75	7.8947	8.15789	29.00	1.00	755.90	831.17
36-18-18 2C	17	1.00	17.75	18.75	8.4211	8.68421	35.00	1.00	929.04	1022.16
42-24-24 2C	23	1.50	23.63	24.75	7.3026	7.69737	41.00	2.00	570.70	638.09
54-32-32 3C	31	1.50	31.63	33.00	9.4079	9.80263	53.00	2.00	1312.95	1440.92
66-36-32 3C	31	1.50	31.63	33.25	16.842	17.3684	65.00	2.00	2766.11	3031.03
84-48-48 4C	47	1.50	47.50	49.25	15.789	16.3158	83.00	3.00	5138.04	5549.31
96-54-56 4C	55	2.00	53.50	55.38	17.895	18.4211	95.00	3.00	4284.29	4596.57

Donde:

B = Diámetro del Tambor

D = Diámetro del Cable

C = Longitud de la Carrera

$Y = (A - 2X - B)/1.9 = (\text{Alt trab} - 2X)/1.9$

A = Diámetro de la Balona

X = Claro

F = Capacidad Volumétrica

#### Capacidad con Valores Nominales de Cliente

Diseño	B (in)	D (in)	C (in)	Y (in)	A (in)	X (in)	F (Pies)
24-12-10 2C	9	1.00	12.00	6.32	23.00	1.00	282.64
30-20-13 2C	12	1.00	20.00	7.89	29.00	1.00	765.47
36-18-18 2C	17	1.00	18.00	8.42	35.00	1.00	942.12
42-24-24 2C	23	1.50	24.00	7.37	41.00	2.00	586.21
54-32-32 3C	31	1.50	32.00	9.47	53.00	2.00	1339.90
66-36-32 3C	31	1.50	36.00	15.79	65.00	2.00	2889.17
84-48-48 4C	47	1.50	48.00	15.79	83.00	3.00	5192.13
96-54-56 4C	55	2.00	54.00	17.89	95.00	3.00	4324.33

#### Eficiencia

%F LEI	%F LES
86.77%	99.14%
98.75%	108.58%
98.61%	108.50%
97.36%	108.85%
97.99%	107.54%
95.74%	104.91%
98.96%	106.88%
99.07%	106.30%

Figura 6.4.1 Comparativo de eficiencia de capacidad volumétrica

Si revisamos el porcentaje de eficiencia de la figura podemos verificar que casi en la totalidad de los casos la variación es mayor del 1% con respecto al 100%. Las empresas cableras tienen una tolerancia en la medición (longitud del cable devanado) de  $\pm 1\%$ , por lo tanto de presentarse la combinación del caso inferior de las tolerancias en el ensamble no estarían en la posibilidad de devanar al menos el 99%. Por otro lado, a pesar de que en la combinación de las tolerancias superiores no se presenta el problema del caso anterior, se tiene el inconveniente de que el carrete se está embarcando demasiado vacío y esto genera problemas de espacio en el embarque.

Para el caso crítico de las tolerancias del límite exterior de especificaciones, el excedente de la longitud de la carrera y de la longitud exterior del carrete son dimensiones críticas para la mayoría de los usuarios finales, por lo tanto, si no cumplen con la especificación el carrete es motivo de rechazo.

La figura 6.4.2 muestra las gráficas de frecuencia y la acumulada para la simulación de la carrera de 54 in. Si consideramos la tolerancia del cliente de  $\pm 0.375$  in tenemos que el intervalo de certeza de cumplimiento es muy pobre y es de tan solo de 44.5%, por lo tanto, la carrera del carrete tiene una probabilidad de 55.5% de exceder las especificaciones del cliente y por consiguiente de generar un defecto.

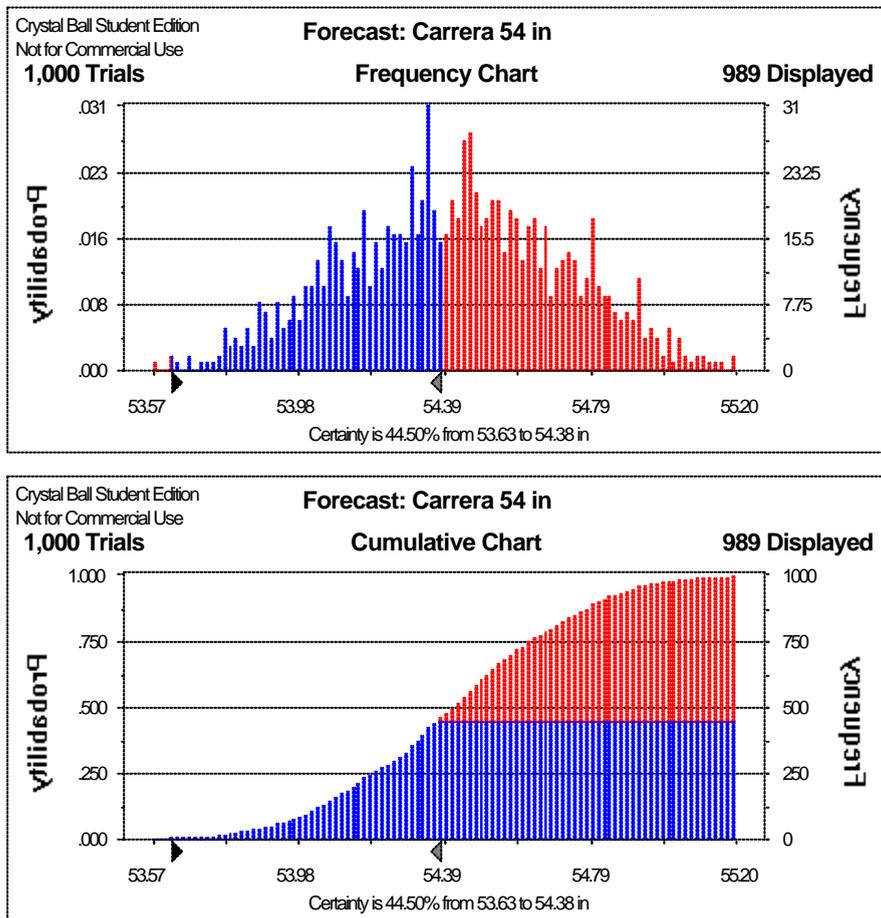


Figura 6.4.2 Simulación de carrera de carrete de 54 in con tolerancia de cliente

Después de haber analizado brevemente la problemática de trabajar con las tolerancias definidas de las simulaciones de los procesos actuales, se rescata que es necesario trabajar en la optimización de las dimensiones de mayor variación para poder asegurar un Diseño para Six Sigma.

### **6.5 OPTIMIZACION DEL PROCESO Y DEL DISEÑO**

Como se ha venido comentando en el desarrollo de este capítulo, las dimensiones asociadas con la longitud de carrera del carrete tienen la principal contribución en la variación del ensamble y por lo tanto no se pueden establecer nuevas tolerancias de diseño sin antes mejorar los procesos.

Básicamente son 3 los procesos de fabricación que intervienen en la construcción de los componentes y sus dimensiones de ensamble:

- Proceso de ranurado o router.
- Proceso de perforación de cazuelas.
- Proceso de dimensionado de duela.

La capacidad de proceso de los 3 procesos mencionados es muy pobre y esta variación es la que esta generando descontrol en el ensamble de carretes.

#### **6.5.1 Optimización de Proceso de Ranurado o Router**

El proceso de ranurado o router es el proceso mediante el cual se realiza una pista en la balona que sirve como apoyo para la duela. En dicho proceso la balona es pivoteada del centro en la mesa de trabajo para que luego una broca ataque el material después de que es accionado un pedal.

Seguido de esto, el operador empieza a girar la balona para empezar a desbastar la madera hasta que se completa la ranura.

Después de revisar detenidamente el proceso de fabricación se llegó a la conclusión que la principal causa de la variación de la profundidad del router es generada debido a una oposición natural de la brida cuando es girada para desbastar el material. Cuando la balona gira, el contacto del material con la broca provoca que haya un brincoteo y es ahí donde se presenta la variación en la fabricación.

Otro punto muy importante para la variación del proceso es el ajuste de la broca. Actualmente el ajuste de la broca se realiza utilizando un flexómetro y esto genera que no haya plena seguridad de un ajuste adecuado.

Después de revisar los factores críticos que afectan el comportamiento del proceso se definieron actividades para poder mejorar la capacidad del mismo. La primer actividad fue implementar un apoyo para evitar que la balona se mueva al momento de estar girando sobre la broca, con esto se pretende controlar la variación del proceso. La segunda actividad realizada fue el implementó de un patrón que se utiliza como pokayoke para asegurar un perfecto ajuste de la broca. Con esto se pretende mejorar el centrado del proceso.

La figura 6.5.1.1 muestra las fotografías del proceso antes y después de los cambios comentados.



a) Estación para manufactura de router sin apoyo



b) Estación para manufactura de router con apoyo

Figura 6.5.1.1 Mejoras al proceso de fabricación de router

Una vez que fueron realizadas las adecuaciones al proceso de fabricación del router, se procedió a realizar un nuevo análisis de capacidad de proceso con la finalidad de determinar el impacto de los cambios en la variación de las mediciones. La figura 6.5.1.2 muestra la gráfica con los resultados del estudio de la nueva capacidad de proceso.

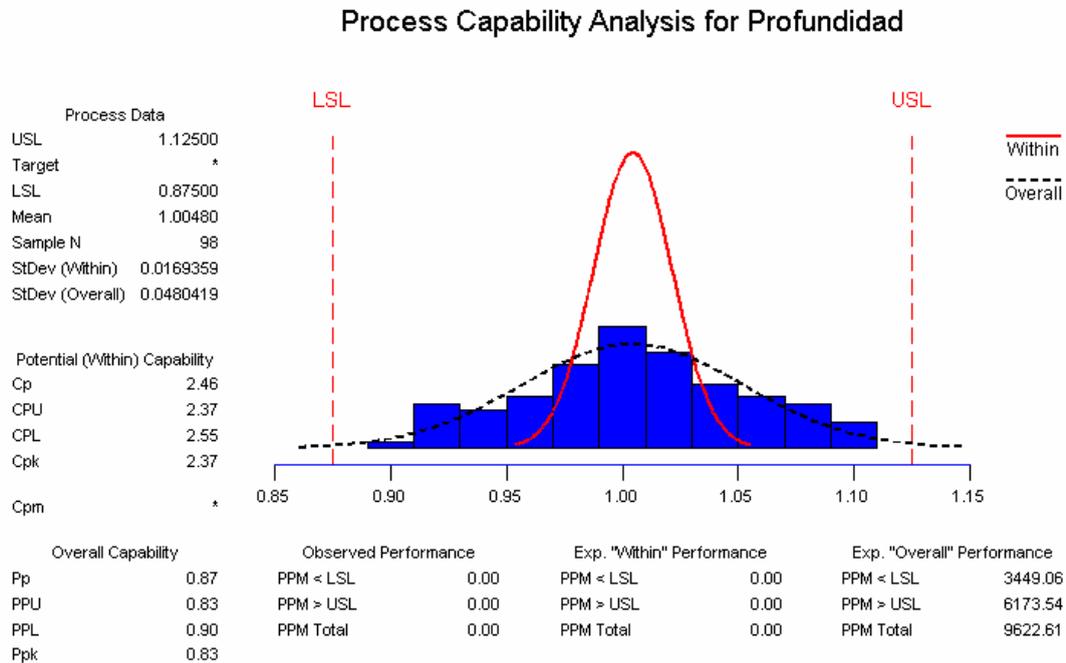


Figura 6.5.1.2 Estudio de capacidad de proceso para manufactura de router con apoyo

Los resultados de las adecuaciones al proceso de manufactura de router muestran una gran mejoría, el Cp obtenido del análisis en conjunto de los dos modelos representativos es de 2.46. Por otro lado los estudios de homogeneidad de varianza comprueban que en esta ocasión las dos profundidades de diseño que se utilizan (3/8" y 1/2") tienen el mismo comportamiento estadístico.

Los datos de estadística descriptiva para el diseño 42-24-24 2C son: valor de P 0.717, media 0.379 y desviación estándar 0.021. Los datos de estadística descriptiva para el diseño 60-32-32 3C son: valor de P 0.887, media 0.501 y desviación estándar 0.0214. Con estos valores se comprueba que los datos son normales; en una etapa posterior de esta sección se utilizarán dichos resultados para redefinir las tolerancias de diseño.

### 6.5.2 Optimización de Proceso de Perforación de Cazuela

El proceso de perforación de cazuela es la operación mediante la cual se dimensiona el alto de cazuela que es la dimensión donde la tuerca del herraje es alojada.

En este proceso la balona es colocada en el taladro múltiple en el pivote del centro para luego ser perforada por las brocas tipo cazuela. Una vez que revisamos el proceso, se puede visualizar que se tienen 2 problemas fundamentales. El primero es que el pivote no fija la balona y al momento de realizar la perforación la balona no esta estabilizada en la parte inferior y esto provoca variación en la perforación. El segundo es que la alineación de las brocas se realiza con flexómetro y esto no asegura una alineación uniforme.

Una vez identificados los problemas se procedió a realizar 2 acciones fundamentales: la primera fue cambiar el pivote por un pistón de presión para asegurar el fijado de la balona en la base del taladro; la segunda fue implementar la alineación de las brocas por medio de un ojo electrónico con láser.

La figura 6.5.2.1 muestra los cambios al proceso de perforación de cazuela donde se puede apreciar la uniformidad de la perforación después del taladrado.



Figura 6.5.2.1 Proceso mejorado de perforación de cazuela

Después de realizar las adecuaciones al proceso se procedió a realizar un estudio de capacidad para determinar la mejora en la variación de la profundidad de la cazuela. La figura 6.5.2.2 muestra la gráfica de capacidad de proceso de perforación de cazuela.

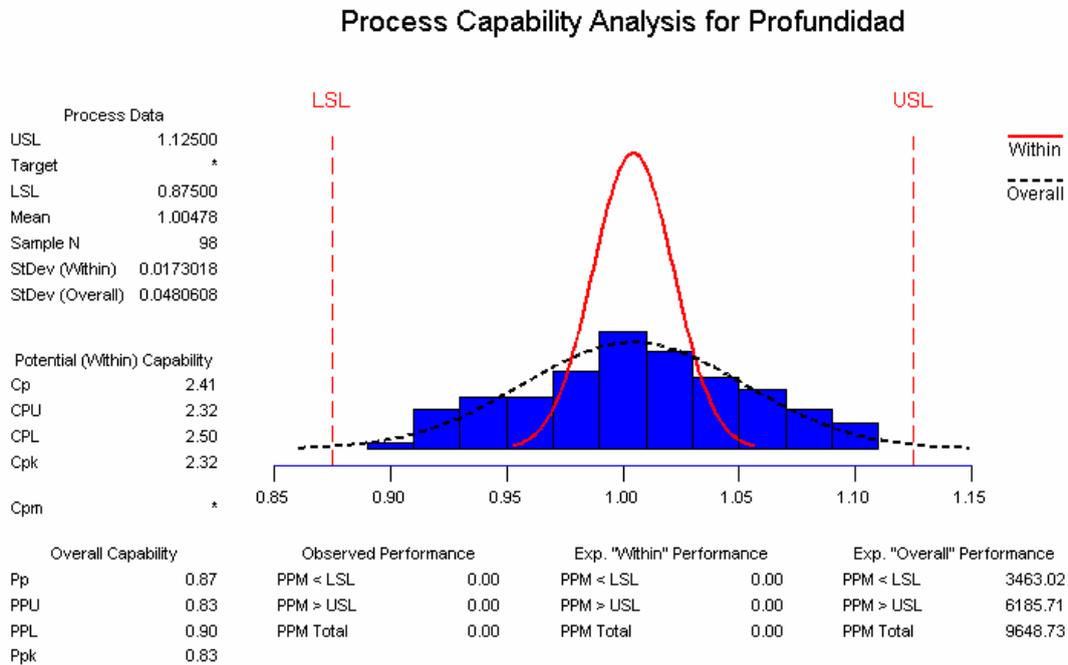


Figura 6.5.2.2 Estudio de capacidad de proceso para la perforación de la cazuela

Los resultados de las adecuaciones al proceso de perforación de la cazuela muestran una gran mejoría, el Cp obtenido del análisis en conjunto de los dos modelos representativos es de 2.41. Por otro lado los estudios de homogeneidad de varianza comprueban que en esta ocasión las dos profundidades de perforación de cazuela de diseño que se utilizan (3/8" y 1/2") tienen el mismo comportamiento estadístico.

Los datos de estadística descriptiva para el diseño 42-24-24 2C son: valor de P 0.674, media 0.379 y desviación estándar 0.0212. Los datos de estadística descriptiva para el diseño 60-32-32 3C son: valor de P 0.855, media 0.5014 y desviación estándar 0.021. Con estos valores se comprueba que los datos son normales; en una etapa posterior de esta sección se utilizarán dichos resultados para redefinir las tolerancias de diseño. También con estas adecuaciones se mejoró el proceso de diámetro de cazuela donde para el diseño 42-24-24 2C se obtuvo una media de 2.008 y una desviación estándar de 0.011. Para el diseño 60-32-32 3C se obtuvo una media de 3.011 con una desviación estándar de 0.013.

### 6.5.3 Optimización de Dimensionado de Duela

El proceso de dimensionado de duela es la operación mediante la cual se corta la duela al tamaño necesario para el ensamble del tambor del carrete. En este proceso la duela es colocada en la base del trocero donde un tope es ajustado de acuerdo al largo que será utilizado.

El ajuste del tope se realiza por medio de un flexómetro. Esta operación de ajuste no asegura una plena precisión de la longitud. Después de identificar este problema potencial se procedió a desarrollar un patrón que se utiliza como pokayoke para asegurar un perfecto ajuste de la longitud, con esto se pretende mejorar el centrado del proceso. La figura 6.5.3.1 muestra el proceso de ajuste y de corte del trocero.



Figura 6.5.3.1 Proceso mejorado de ajuste para dimensionado de duela

Después de realizar las adecuaciones al proceso se procedió a realizar un estudio de capacidad para determinar la mejora en la variación del dimensionado de duela. La figura 6.5.2.2 muestra la gráfica de capacidad de proceso del proceso de dimensionado.

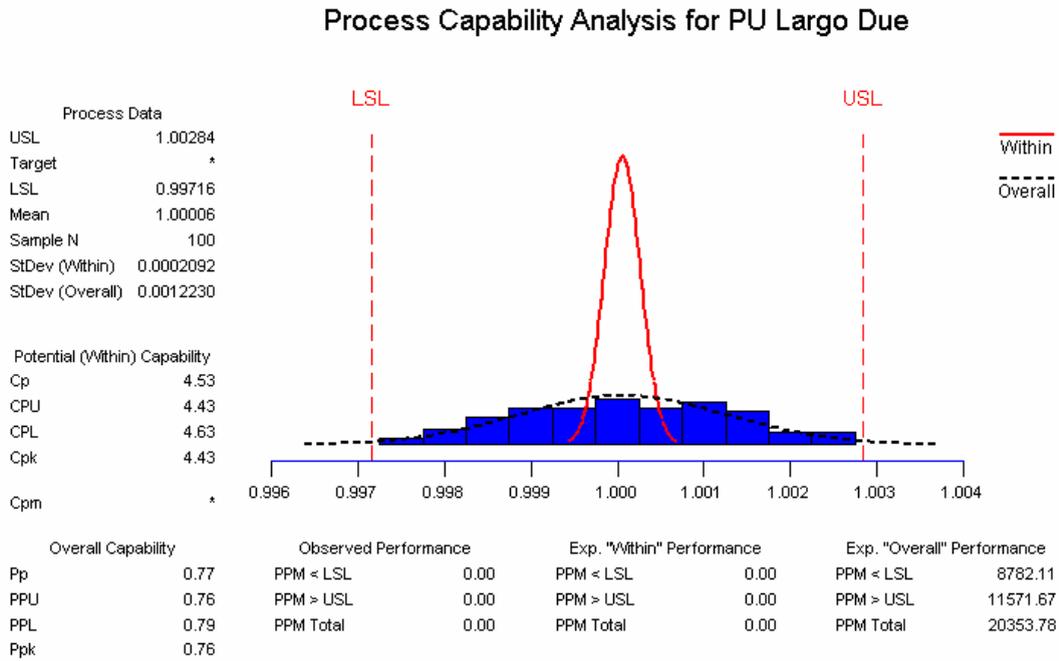


Figura 6.5.3.2 Estudio de capacidad de proceso para dimensionado de duela

La capacidad de proceso para el dimensionado de duela utilizando patrones de ajuste mejoró considerablemente, el Cp obtenido del análisis en conjunto de los dos modelos representativos es de 4.53. Por otro lado los estudios de homogeneidad de varianza para la longitud de 24.75" y la de 33" comprueban que tienen el mismo comportamiento estadístico.

Los datos de estadística descriptiva para el diseño 42-24-24 2C son: valor de P 0.172, media 24.752 y desviación estándar 0.0367. Los datos de estadística descriptiva para el diseño 60-32-32 3C son: valor de P 0.459, media 33.0011 y desviación estándar 0.0295. Con estos valores se comprueba que los datos son normales; en una etapa posterior de esta sección se utilizarán dichos resultados para redefinir las tolerancias de diseño.

### 6.5.4 Optimización de Simulación del Largo de Carrera

En la sección 6.2.1 se desarrolló una simulación para el largo de carrera de carrete utilizando los datos de capacidad de proceso con resultados muy pobres. En esta sección se pretende redefinir las tolerancias una vez que el proceso ha sido mejorado.

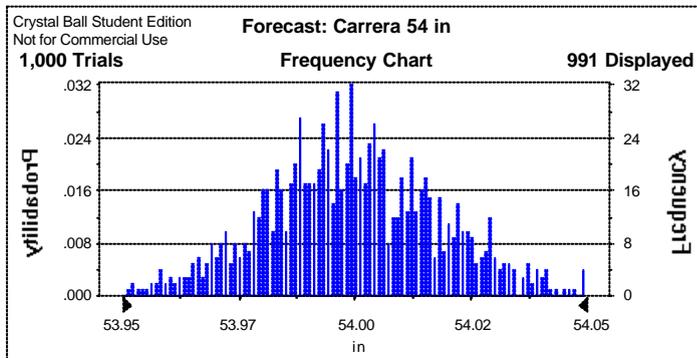
La figura 6.5.4.1 muestra la hoja de cálculo con el análisis de la simulación y muestra también la gráfica de frecuencia y las estadísticas. Se puede apreciar que la variación se reduce considerablemente y de hecho el proceso resulta estar centrado, por lo tanto se pueden definir tolerancias simétricas para abarcar el grueso de los diseños.

Simulación para Tolerancia de Largo de Carrera Rev1.0

	Long. Duela PU	Prof. Router PU
Mean	1.00006	1.00480
Std.Dev	0.00021	0.01690

*Ec'n de Transferencia*  
 $Y = Ldue - 2Prof. Router$

Diseño	Long. Duela dis.	Prof. Router Dis.	Long. Duela Real	Prof. Router Real	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	12.75	0.38	12.75077	0.37680	0.00268	0.00634	12	12	0.01	11.97	12.03
30-20-13 2C	20.75	0.38	20.75125	0.37680	0.00436	0.00634	20	20	0.01	19.97	20.03
36-18-18 2C	18.75	0.38	18.75113	0.37680	0.00394	0.00634	18	18	0.01	17.97	18.03
42-24-24 2C	24.75	0.38	24.75149	0.37680	0.00520	0.00634	24	24	0.01	23.97	24.03
54-32-32 3C	33.00	0.50	33.00198	0.50240	0.00693	0.00845	32	32	0.02	31.94	32.06
66-36-32 3C	37.00	0.50	37.00222	0.50240	0.00777	0.00845	36	36	0.02	35.94	36.06
84-48-48 4C	49.00	0.50	49.00294	0.50240	0.01029	0.00845	48	48	0.02	47.94	48.06
96-54-56 4C	55.00	0.50	55.00330	0.50240	0.01155	0.00845	54	54	0.02	53.94	54.06



Statistics	
Statistic	Value
Trials	1,000
Mean	54.00
Median	54.00
Mode	...
Standard Deviation	0.02
Variance	0.00
Skewness	0.02
Kurtosis	2.98
Coef. of Variability	0.00
Range Minimum	53.94
Range Maximum	54.06
Range Width	0.12
Mean Std. Error	0.00

Figura 6.5.4.1 Simulación de largo de carrera con procesos mejorados

De la simulación del largo de carrera de carrete donde fueron utilizados los datos que se obtuvieron de la optimización de proceso de corte de duela y de manufactura de router, se obtiene la siguiente tabla de tolerancias 6.5.4.1.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Tolerancias Optimizadas Largo Carrera

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.030	0.030	-0.125	0.125
30-20-13 2C	-0.030	0.030	-0.125	0.125
36-18-18 2C	-0.030	0.030	-0.125	0.125
42-24-24 2C	-0.030	0.030	-0.125	0.125
54-32-32 3C	-0.060	0.060	-0.125	0.125
66-36-32 3C	-0.060	0.060	-0.125	0.125
84-48-48 4C	-0.060	0.060	-0.125	0.125
96-54-56 4C	-0.060	0.060	-0.125	0.125

Tabla 6.5.4.1 Tolerancias optimizadas para largo de carrera

### 6.5.5 Optimización de Simulación del Longitud Exterior de Carrete

Siguiendo el mismo procedimiento que con el largo de carrera en la figura 6.5.5.1 se muestra la optimización de la simulación de la longitud exterior de carrete.

#### Simulación para Tolerancia de Longitud Exterior de Carrete Rev1.0

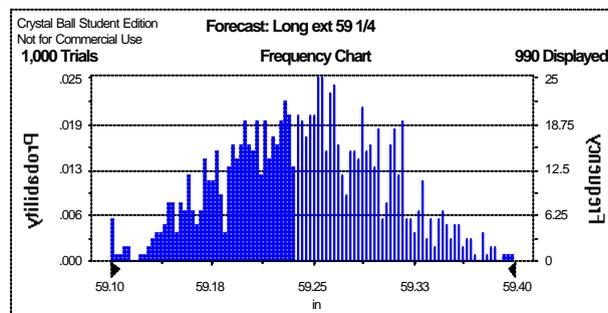
	Long. Duela PU	Prof. Router PU	Esp. Balona
Mean	1.00006	1.00480	1.00056
Std.Dev	0.00021	0.01690	0.01075

#### Ec'n de Transferencia

$$Y = 2Espbal + Ldue - 2Prof. Router$$

Diseño	Long. Duela Dis.	Prof. Router Dis.	Esp. Balona Dis.	Long. Duela Real	Prof. Router Real	Esp. Balona Real	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	St.dv. Esp. Balona
24-12-10 2C	12.75	0.36	1.50	12.75077	0.37680	1.50084	0.00268	0.00634	0.01612
30-20-13 2C	20.75	0.36	1.50	20.75125	0.37680	1.50084	0.00436	0.00634	0.01612
36-18-18 2C	18.75	0.36	1.50	18.75113	0.37680	1.50084	0.00394	0.00634	0.01612
42-24-24 2C	24.75	0.36	1.50	24.75149	0.37680	1.50084	0.00520	0.00634	0.01612
54-32-32 3C	33.00	0.50	2.06	33.00198	0.50240	2.06366	0.00693	0.00845	0.02217
66-36-32 3C	37.00	0.50	2.06	37.00222	0.50240	2.06366	0.00777	0.00845	0.02217
84-48-48 4C	49.00	0.50	2.63	49.00294	0.50240	2.62647	0.01029	0.00845	0.02821
96-54-56 4C	55.00	0.50	2.63	55.00330	0.50240	2.62647	0.01155	0.00845	0.02821

Diseño	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	15	15.00	0.04	14.88	15.12
30-20-13 2C	23	23.00	0.04	22.88	23.12
36-18-18 2C	21	21.00	0.04	20.88	21.12
42-24-24 2C	27	27.00	0.04	26.88	27.12
54-32-32 3C	36.125	36.12	0.05	35.97	36.27
66-36-32 3C	40.125	40.13	0.05	39.98	40.28
84-48-48 4C	53.25	53.25	0.06	53.07	53.43
96-54-56 4C	59.25	59.25	0.06	59.07	59.43



Statistic	Value
Trials	1,000
Mean	59.25
Median	59.25
Mode	...
Standard Deviation	0.06
Variance	0.00
Skewness	0.02
Kurtosis	2.75
Coeff. of Variability	0.00
Range Minimum	59.08
Range Maximum	59.42
Range Width	0.34
Mean Std. Error	0.00

Figura 6.5.5.1 Simulación de longitud exterior de carrete con procesos mejorados

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

La tabla 6.5.5.1 muestra las tolerancias obtenidas de la simulación optimizada de la longitud exterior de carrete.

Tolerancias Optimizadas Longitud Exterior de Carrete

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.120	0.120	-0.188	0.188
30-20-13 2C	-0.120	0.120	-0.188	0.188
36-18-18 2C	-0.120	0.120	-0.188	0.188
42-24-24 2C	-0.120	0.120	-0.188	0.188
54-32-32 3C	-0.155	0.145	-0.188	0.188
66-36-32 3C	-0.145	0.155	-0.188	0.188
84-48-48 4C	-0.180	0.180	-0.188	0.188
96-54-56 4C	-0.180	0.180	-0.188	0.188

Tabla 6.5.5.1 Tolerancias optimizadas para longitud exterior de carrete

### 6.5.6 Optimización de Simulación de Longitud Exterior de Herrajes

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la longitud exterior de carrete en la figura 6.5.6.1 se muestra la optimización de la simulación de la longitud exterior de herraje.

Simulación para Tolerancia de Longitud Exterior de Herrajes de Carrete Rev1.0

	Long. Duela PU	Prof. Router PU	Esp. Balona	Prof. Cazuela	
Mean	1.00006	1.00480	1.00056	1.00478	<i>Ec'n de Transferencia</i>
Std.Dev	0.00021	0.01690	0.01075	0.01730	$Y = 2Espbal + Ldue - 2Prof. Router - 2 Prof.Caz + Anchtuer + Hcaz$

Diseño	Long. Duela Dis.	Prof. Router Dis.	Esp. Balona Dis.	Prof. Cazuela Diseño	Long. Duela Real	Prof. Router Real	Esp. Balona Real	Prof. Cazuela Real
24-12-10 2C	12.75	0.38	1.50	0.375	12.75077	0.37680	1.50084	0.37679
30-20-13 2C	20.75	0.38	1.50	0.375	20.75125	0.37680	1.50084	0.37679
36-18-18 2C	18.75	0.38	1.50	0.375	18.75113	0.37680	1.50084	0.37679
42-24-24 2C	24.75	0.38	1.50	0.375	24.75149	0.37680	1.50084	0.37679
54-32-32 3C	33.00	0.50	2.06	0.500	33.00198	0.50240	2.06366	0.50239
66-36-32 3C	37.00	0.50	2.06	0.500	37.00222	0.50240	2.06366	0.50239
84-48-48 4C	49.00	0.50	2.63	0.500	49.00294	0.50240	2.62647	0.50239
96-54-56 4C	55.00	0.50	2.63	0.500	55.00330	0.50240	2.62647	0.50239

Diseño	St.dv. Long. Duela	St.dv. Prof. Router	St.dv. Esp. Balona	St.dv. Prof. Cazuela	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	0.00268	0.00634	0.01612	0.00649	15	15.00	0.04	14.88	15.12
30-20-13 2C	0.00436	0.00634	0.01612	0.00649	23	23.00	0.04	22.88	23.12
36-18-18 2C	0.00394	0.00634	0.01612	0.00649	21	21.00	0.04	20.88	21.12
42-24-24 2C	0.00520	0.00634	0.01612	0.00649	27	26.99	0.04	26.87	27.11
54-32-32 3C	0.00693	0.00845	0.02217	0.00865	36.125	36.12	0.05	35.97	36.27
66-36-32 3C	0.00777	0.00845	0.02217	0.00865	40.125	40.12	0.05	39.97	40.27
84-48-48 4C	0.01029	0.00845	0.02821	0.00865	53.25	53.25	0.06	53.07	53.43
96-54-56 4C	0.01155	0.00845	0.02821	0.00865	59.25	59.24	0.06	59.06	59.42

Figura 6.5.6.1 Simulación de longitud exterior de herraje con procesos mejorados

La tabla 6.5.6.1 muestra las tolerancias obtenidas de la simulación optimizada de la longitud exterior de herraje.

**Tolerancias Optimizadas Longitud Exterior de Herraje**

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.120	0.120	-0.250	0.250
30-20-13 2C	-0.120	0.120	-0.250	0.250
36-18-18 2C	-0.120	0.120	-0.250	0.250
42-24-24 2C	-0.130	0.110	-0.250	0.250
54-32-32 3C	-0.155	0.145	-0.250	0.250
66-36-32 3C	-0.155	0.145	-0.250	0.250
84-48-48 4C	-0.180	0.180	-0.250	0.250
96-54-56 4C	-0.190	0.170	-0.250	0.250

Tabla 6.5.6.1 Tolerancias optimizadas para longitud exterior de herraje

### 6.5.7 Optimización de Excedente de Varilla de Herraje

Una vieja práctica del ensamble de carretes es la fabricación de herraje con una sobredimensión de  $\frac{3}{4}$ " para permitir el corte después del ensamble con el uso de una cizalla neumática. Esta operación es derivada de los problemas de variación de la altura de la cazuela y también de un paradigma de dificultad de ensamble del mismo.

Una vez que el problema de la profundidad ha sido controlado, el siguiente paso es proceder a tratar de ajustar la longitud de la varilla a un largo tal que permita el ensamble sin desperdicio.

Para llevar esto a cabo, se simuló en Crystal Ball el sobrante de varilla para determinar el largo que debe de manejarse para cada una de las carreras y su tolerancia. Los resultados se pueden apreciar en la figura 6.5.7.1.

Se puede apreciar en la gráfica de traslape que la variación de todos los diseños de varilla tiene un excedente que va desde  $\frac{1}{2}$ " hasta 1". En la hoja de cálculo podemos corroborar en la "Ymin" que el mínimo sobrante de varilla es de  $\frac{1}{2}$ ", por lo tanto, se puede asegurar que acortando el sobredimensionado de  $\frac{3}{4}$ " a  $\frac{1}{4}$ " no se tendrán problemas de subdimensionado de herraje.

**Simulación para Excedente de Herrajes**

	Long. Var PU
Mean	1.00022
Std.Dev	0.00089

*Ec'n de Transferencia*  
 $Y = Lvar - Lxther$

Diseño	Long. Varilla Diseño	Long. Ext. Herr Diseño	Long. Varilla Real	Long. Ext. Herr real	St.dv Long. Varilla	St.dv Long. Ext. Herr	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	15.75	15.00	15.753	15.000	0.014	0.040	0.75	0.75	0.04	0.630	0.870
30-20-13 2C	23.75	23.00	23.754	23.000	0.021	0.040	0.75	0.75	0.05	0.600	0.900
36-18-18 2C	21.75	21.00	21.754	21.000	0.019	0.040	0.75	0.75	0.04	0.630	0.870
42-24-24 2C	27.75	27.00	27.755	26.990	0.025	0.040	0.75	0.75	0.05	0.600	0.900
54-32-32 3C	36.88	36.13	36.882	36.120	0.033	0.050	0.75	0.76	0.06	0.580	0.940
66-36-32 3C	40.88	40.13	40.882	40.120	0.036	0.050	0.75	0.76	0.06	0.580	0.940
84-48-48 4C	54.00	53.25	54.010	53.250	0.048	0.060	0.75	0.76	0.08	0.520	1.000
96-54-56 4C	60.00	59.25	60.011	59.240	0.053	0.060	0.75	0.77	0.08	0.530	1.010

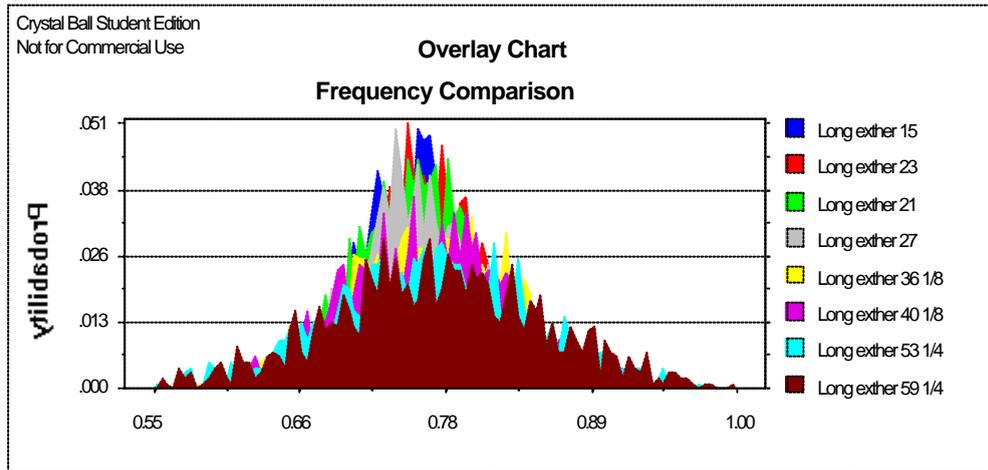


Figura 6.5.7.1 Simulación de excedente de herraje

La figura 6.5.7.2 muestra la simulación de la nueva longitud de diseño del largo del herraje. Se puede apreciar tanto en la gráfica de traslape como en la hoja de cálculo que los resultados para la “Ymin” no son negativos, por lo tanto, con una simulación de una longitud de excedente de ¼” no se presenta interferencia y se eliminan problemas de ensamble.

Por otro lado se ha definido una tolerancia de  $\pm 1/4$ ” para extender esta tolerancia a todos los diseños ya que los herrajes de mayor tamaño tienen esta variación. En principio se puede suponer que esta tolerancia es demasiado amplia, pero la gráfica de

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

tendencia nos ayudará a visualizar que los datos de los diseños tienen el 80% de probabilidad de estar dentro de una tolerancia  $\pm 1/8$ ".

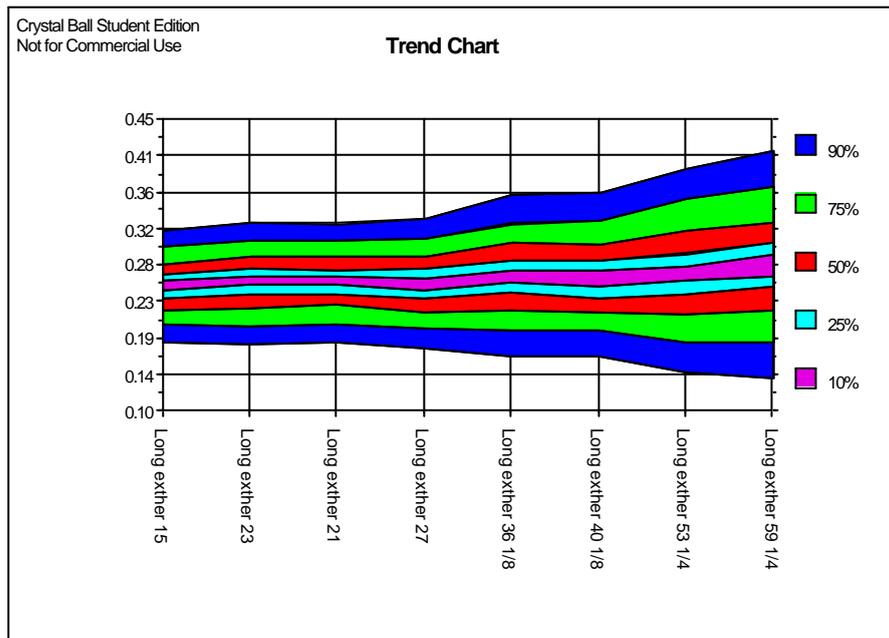
### Simulación para Excedente de Herrajes Rev1.0

	Long. Var PU
Mean	1.00022
Std.Dev	0.00089

#### Ec'n de Transferencia

$$Y = Lvar - Lexther$$

Diseño	Long. Varilla Diseño	Long. Ext. Herr Diseño	Long. Varilla Real	Long. Ext. Herr real	St.dv Long. Varilla	St.dv Long. Ext. Herr	Y Diseño	Y real	St.dv Y	Y min	Y max
24-12-10 2C	15.25	15.00	15.253	15.000	0.014	0.040	0.25	0.25	0.04	0.130	0.370
30-20-13 2C	23.25	23.00	23.255	23.000	0.021	0.040	0.25	0.26	0.05	0.110	0.410
36-18-18 2C	21.25	21.00	21.255	21.000	0.019	0.040	0.25	0.26	0.04	0.140	0.380
42-24-24 2C	27.25	27.00	27.256	26.990	0.024	0.040	0.25	0.25	0.05	0.100	0.400
54-32-32 3C	36.38	36.13	36.383	36.120	0.032	0.050	0.25	0.26	0.06	0.080	0.440
66-36-32 3C	40.38	40.13	40.384	40.120	0.036	0.050	0.25	0.26	0.06	0.080	0.440
84-48-48 4C	53.50	53.25	53.512	53.250	0.048	0.060	0.25	0.27	0.07	0.060	0.480
96-54-56 4C	59.50	59.25	59.513	59.240	0.053	0.060	0.25	0.28	0.07	0.070	0.490



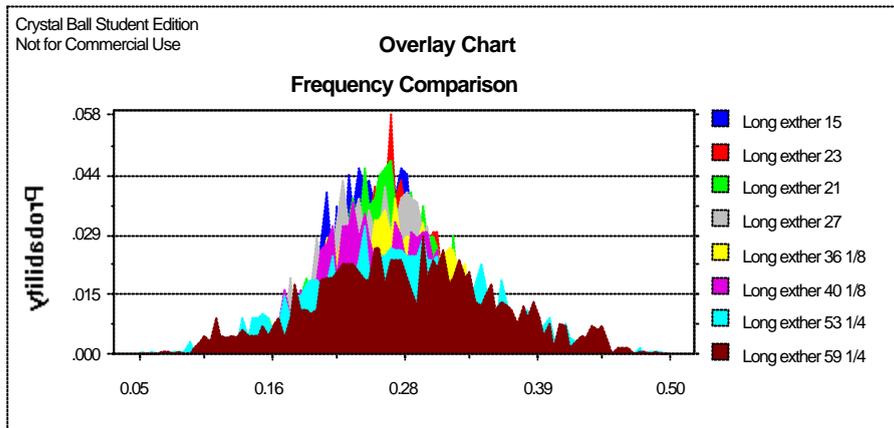


Figura 6.5.7.2 Simulación para validar nuevas tolerancias de herraje

La tabla 6.5.7.1 muestra las nuevas tolerancias de diseño para la longitud de los herrajes.

**Tolerancias Longitud de Herraje**

Diseño	LEI Simul.	LES Simul.	LEI Diseño	LES Diseño
24-12-10 2C	-0.12	0.12	-0.250	0.250
30-20-13 2C	-0.14	0.16	-0.250	0.250
36-18-18 2C	-0.11	0.13	-0.250	0.250
42-24-24 2C	-0.15	0.15	-0.250	0.250
54-32-32 3C	-0.17	0.19	-0.250	0.250
66-36-32 3C	-0.17	0.19	-0.250	0.250
84-48-48 4C	-0.19	0.23	-0.250	0.250
96-54-56 4C	-0.18	0.24	-0.250	0.250

Figura 6.5.7.1 Tolerancias optimizadas para la longitud de herraje

## 6.6 SCORECARDS CON DISEÑO OPTIMIZADO

Una vez que han sido optimizados los componentes del carrete en la fase de diseño, y que han sido validados los ensambles por medio de simulación, lo siguiente es validar la mejora obtenida antes de realizar la corrida piloto.

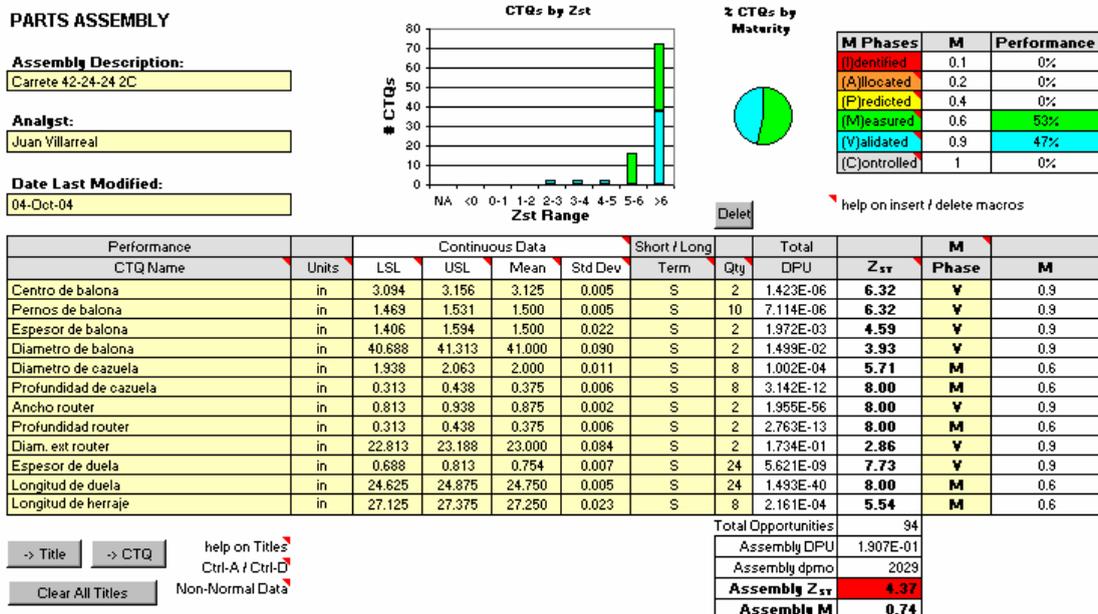
Recordando la sección 5.4 de esta investigación en la que se desarrollaron los scorecards para los carretes de estudio, los valores de desempeño de Z de ambos diseños presentaban resultados muy pobres con valores de  $Z = 1.86$  para un carrete 42-

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

24-24 2C y de  $Z = 1.82$  para un carrete 60-32-32 3C, obviamente estos niveles son el resultado de tolerancias obsoletas y de procesos sin optimización.

La figura 6.6.1 muestra los scorecards para los diseños 42-24-24 2C y 60-32-32 3C, utilizando los resultados de las tolerancias definidas en las simulaciones y los datos de los procesos optimizados. Los resultados muestran una  $Z = 4.37$  para el diseño 42-24-24 2C y una  $Z = 4.40$  para un diseño 60-32-32 3C. Estos niveles de  $Z$  de corto plazo muestran un gran desempeño de las dimensiones del carrete. Se tiene que mencionar que una evaluación en el corto plazo se considera una ventana de operación de  $\pm 1.5$  sigmas, esto debido a la incapacidad de las gráficas de control desarrolladas por el Dr. Shewhart a reaccionar rápidamente a cambios por debajo de este valor [8].

Si consideramos un análisis de largo plazo para estas dimensiones los scorecards deberán estar llegando a desempeños muy cercanos a Six Sigma. Se tiene que mencionar que a pesar de que el objetivo de esta tesis es obtener un diseño de carrete con desempeño Six Sigma, una pieza clave para lograr dicho objetivo es que los componentes del carrete tengan el mismo desempeño. A diferencia de los scorecards de la sección 5.4, vemos como el grado de madurez de la mayoría de los CTQs se consideró como “validados” debido a las simulaciones, solo aquellas dimensiones que se optimizaron se siguen considerando con un grado de madurez de “medidos”.



## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

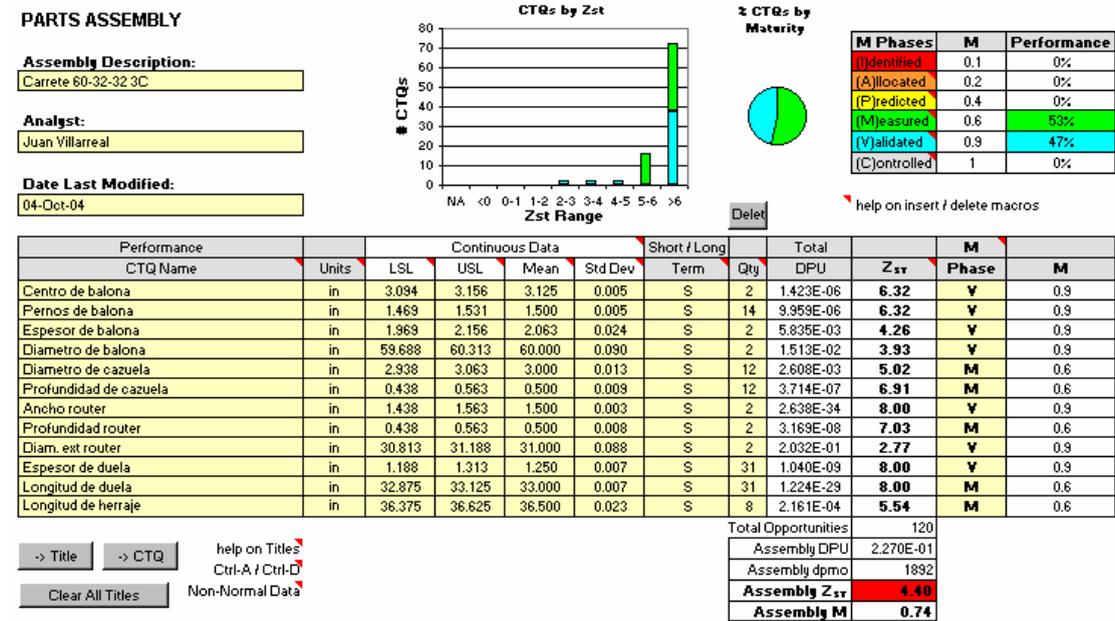


Figura 6.6.1. Scorecards de diseño para componentes de carretes de madera

## 6.7 NUEVAS TOLERANCIAS DE DISEÑO

Como conclusión de la etapa de diseño y de optimización del Diseño para Six Sigma de carretes de madera se presenta la tabla con las nuevas tolerancias que serán utilizadas para realizar las corridas pilotos con los prototipos en la fase de Validación. La tabla 6.7.1 muestra la tabla de tolerancias tanto de los componentes como del ensamble.

TABLA DE NUEVAS TOLERANCIAS DE DISEÑO DE CARRETES DE MADERA			
<b>COMPONENTES BALONA</b>			
ID	Dimensiones	Tolerancias	
A	Diámetro de balona	$\pm 5/16$	
B	Diámetro Exterior del router	$\pm 3/16$	
C	Espesor de balona	$\pm 3/32$	
D	Diámetro de pernos	$\pm 1/32$	
E	Diámetro de centro	$\pm 1/32$	
F	Profundidad del router	$\pm 1/16$	
G	Ancho del router	$\pm 1/16$	
H	Diámetro de cazuela	$\pm 1/16$	
I	Profundidad de cazuela	$\pm 1/16$	
<b>HERRAJE Y DUELA</b>			
ID	Dimensiones	Tolerancias	
J	Largo de herraje	$\pm 1/4$	
K	Espesor de duela	$\pm 1/16$	
L	Largo de duela	$\pm 1/8$	
<b>ENSAMBLE DE CARRETE</b>			
ID	Dimensiones	Tolerancias	
M	Largo de carrera	$\pm 1/8$	
N	Longitud exterior de carrete	$\pm 3/16$	
O	Longitud exterior de herrajes	$\pm 1/4$	
P	Altura de trabajo	24"- 36"	$\pm 1/4$
		42"- 66"	$\pm 3/8$
		72"- 96"	$\pm 1/2$
Q	Gap del ancho del router	$\pm 1/16$	
R	Excedente de tuerca	$\pm 1/16$	
S	Excedente de herraje	$\pm 1/4$	

Tabla 6.7.1. Tabla de nuevas tolerancias de diseño para carretes de madera

## 6.8 SELECCIÓN DE DISEÑO PARA CORRIDA PILOTO

Una vez que han sido determinadas las tolerancias que de acuerdo al análisis permitirán un ensamble con desempeño Six Sigma, será necesario validar los datos de diseño para comprobar la hipótesis de esta investigación. Para llevar esto a cabo, y tomando en consideración el diagrama de flujo de la figura 3.4.1, será necesario realizar corridas piloto para comprobar los resultados antes de liberar el nuevo diseño a la producción en serie.

En el transcurso de esta investigación se ha trabajado con los dos diseños más representativos de carretes. Para la corrida piloto se utilizará el diseño 42-24-24 2C, debido a que es el de mayor volumen de producción.

## **6.9 CONCLUSIONES**

En el desarrollo de este capítulo se llevó a cabo el diseño de las funciones de transferencia de las dimensiones críticas del ensamble, se llevó a cabo la simulación por medio del software Crystal Ball para determinar las nuevas tolerancias de diseño; también después de haber determinado los ensambles con mayor variación, se procedió a optimizar los procesos de ranurado, de perforación de cazuela y de dimensionado de duela para mejorar el desempeño del ensamble.

Se compararon los resultados de las tolerancias de diseño con las de proceso obtenidas en la etapa de Análisis por medio de los scorecards donde se valida una mejora en el desempeño de las dimensiones, de niveles de Z cercanos a 1.8 para las dimensiones obsoletas, a niveles de Z cercanos a 4.40 para las dimensiones con los procesos mejorados. Por último, se definieron las nuevas tolerancias de proceso requeridas para obtener un ensamble con desempeño Six Sigma.

En el siguiente capítulo se documentarán los datos obtenidos de la corrida piloto donde se validarán las tolerancias obtenidas en la fase de diseño. Se desarrollarán formatos de control para asegurar que las nuevas tolerancias sean utilizadas y se desarrollará la ingeniería de detalle además de validar los ahorros derivados del nuevo diseño.

## ***CAPITULO VII.- ETAPA DE VALIDACION***

En el capítulo anterior se definieron las funciones de transferencia necesarias para las simulaciones que componen el ensamble, se llevaron a cabo las simulaciones para determinar las nuevas tolerancias de diseño, se robustecieron los procesos donde se encontró la mayor variación y se optimizaron las tolerancias, se desarrolló un análisis de modo de efecto de falla para mitigar los riesgos de la manufactura del nuevo diseño, se desarrollaron los scorecards con los datos obtenidos de la simulación y se enlistaron las nuevas tolerancias de diseño.

En el transcurso de esta investigación se ha trabajado con los dos diseños más representativos de carretes. Para la corrida piloto se utilizará el diseño 42-24-24 2C, debido a que es el de mayor volumen de producción.

## **6.9 CONCLUSIONES**

En el desarrollo de este capítulo se llevó a cabo el diseño de las funciones de transferencia de las dimensiones críticas del ensamble, se llevó a cabo la simulación por medio del software Crystal Ball para determinar las nuevas tolerancias de diseño; también después de haber determinado los ensambles con mayor variación, se procedió a optimizar los procesos de ranurado, de perforación de cazuela y de dimensionado de duela para mejorar el desempeño del ensamble.

Se compararon los resultados de las tolerancias de diseño con las de proceso obtenidas en la etapa de Análisis por medio de los scorecards donde se valida una mejora en el desempeño de las dimensiones, de niveles de Z cercanos a 1.8 para las dimensiones obsoletas, a niveles de Z cercanos a 4.40 para las dimensiones con los procesos mejorados. Por último, se definieron las nuevas tolerancias de proceso requeridas para obtener un ensamble con desempeño Six Sigma.

En el siguiente capítulo se documentarán los datos obtenidos de la corrida piloto donde se validarán las tolerancias obtenidas en la fase de diseño. Se desarrollarán formatos de control para asegurar que las nuevas tolerancias sean utilizadas y se desarrollará la ingeniería de detalle además de validar los ahorros derivados del nuevo diseño.

## ***CAPITULO VII.- ETAPA DE VALIDACION***

En el capítulo anterior se definieron las funciones de transferencia necesarias para las simulaciones que componen el ensamble, se llevaron a cabo las simulaciones para determinar las nuevas tolerancias de diseño, se robustecieron los procesos donde se encontró la mayor variación y se optimizaron las tolerancias, se desarrolló un análisis de modo de efecto de falla para mitigar los riesgos de la manufactura del nuevo diseño, se desarrollaron los scorecards con los datos obtenidos de la simulación y se enlistaron las nuevas tolerancias de diseño.

En este capítulo, se validará la precisión de las tolerancias obtenidas de las simulaciones de las funciones de transferencia por medio de un estudio de capacidad de la corrida piloto del diseño 42-24-24 2C, se finalizará el análisis de modo de efecto de falla, se desarrollarán formatos de control para las especificaciones y se validarán los beneficios obtenidos.

## **7.1 VALIDACION DEL DESEMPEÑO DEL NUEVO DISEÑO**

Después de haber determinado las tolerancias de diseño se requiere validar el desempeño del nuevo diseño por medio de una corrida piloto. La fabricación de los nuevos componentes se realizó con las mejoras de los procesos comentadas en la etapa de Diseño de esta investigación y tomando en cuenta la tabla con las nuevas tolerancias de diseño.

Se seleccionó el diseño de mayor volumen por ser el más representativo y además para poder comparar los resultados con los datos que se han venido manejando en este trabajo. El número de muestras de la corrida fue de 35 carretes 42-24-24 2C, los componentes del carrete fueron sometidos a un estricto control para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

En este punto de la tesis necesariamente se tienen que recordar los críticos de calidad obtenidos en la etapa de Definición, ya que como se mencionó en esa sección los resultados y el nuevo diseño tendrán que satisfacer los CTQs.

De acuerdo a las modificaciones que se realizaron al diseño los CTQs que se pueden ver afectados y que en todo caso deben de ser validados son:

- Tiempo de ciclo de fabricación competitivo
- Ensamble eficiente
- Competitivo en costo
- Alta eficiencia en el manejo
- Calidad en el servicio
- Confiabilidad

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Después de llevar a cabo el ensamble de los carretes se recopilaron las mediciones de las dimensiones simuladas para validar el desempeño del diseño en base a las nuevas tolerancias definidas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.1.1.

### Validación de Desempeño de Nuevo Diseño

Corrida Piloto 42-24-24 2C

Dimensión	Valor Nominal	Y ( $\mu$ )	Y ( $\sigma$ )	Y min ( $\mu - 6\sigma$ )	Y max ( $\mu + 6\sigma$ )	Cp	Cpk	LEI	LES	Dentro de Tolerancia $6\sigma$ ?
Largo de carrera	24.000	24.0085	0.0128	23.9317	24.0853	3.03	3.26	23.8750	24.1250	OK
Longitud ext. carrete	27.000	26.9990	0.0301	26.8184	27.1796	2.09	2.08	26.8125	27.1875	OK
Longitud ext. herrajes	27.000	27.0009	0.0411	26.7543	27.2475	2.02	2.03	26.7500	27.2500	OK
Altura de trabajo	18.125	18.1276	0.0319	17.9365	18.3187	3.90	3.92	17.7500	18.5000	OK
Excedente de tuerca	0.000	0.0057	0.0092	-0.0496	0.0610	2.05	2.26	-0.0625	0.0625	OK
Excedente de herraje	0.250	0.2429	0.0222	0.1098	0.3759	3.87	3.76	0.0000	0.5000	OK

Tabla 7.1.1. Desempeño de diseño de corrida piloto con nuevas tolerancias

Se puede apreciar en la tabla que tomando como referencia la media obtenida de la capacidad de proceso de cada dimensión y considerando un proceso Six Sigma ( $\pm 6$  desviaciones estándar) la variación se ubica dentro de los límites de especificación superior e inferior definidos en la etapa de Diseño. Con esto quedan validadas las simulaciones y se cumple parte del objetivo de esta tesis.

Como se señaló en temas anteriores, debido a que prácticamente se comprobó que los componentes del carrete de madera presentan el mismo comportamiento estadístico, por lo tanto, se puede asumir que se deberá obtener el mismo resultado con el resto de los diseños.

De la corrida piloto se obtiene un diseño con un ensamble eficiente, confiable y de alta eficiencia de manejo, por lo tanto, se han validado algunos de los CTQ's planteados en la etapa de Definición. El resto, referentes al aspecto económico, serán validados en una fase posterior de este capítulo.

### 7.1.1 Revisión de Análisis de Modo de Efecto de Falla

Antes de realizar la corrida piloto y desde la etapa de Diseño fue desarrollado un AMEF en el cual fueron definidas algunas acciones para tratar de mitigar riesgos en la implementación del nuevo diseño.

La figura 7.1.1.1 muestra los valores de RPN recalculado una vez que las acciones fueron realizadas. Se puede apreciar que los nuevos valores representan bajo

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

riesgo de fallas, por lo tanto, se tiene la certeza de llevar a cabo la implementación sin mayores contratiempos.

Artículo/Función	Modo(s) Potencial de la Falla	Efecto(s) Potencial de la Falla	Sev	Causa(s) Potencial de la Falla	Ocurr	Controles Actuales	Det	RPN	Acción(es) Recomendadas	Responsable / Fecha de terminación	Resultados de la Acción				
											Acciones tomadas	Nueva Sev	Nueva Occ	Nueva Det	Nuevo RPN
Ensamble	Incremento de tiempo de ciclo	Incremento de costo de MO	5	Tolerancias muy estrechas	5	Ninguno	2	50	Validar diseño con corrida piloto	Juan Villarreal 9/25/2004	Se compararon tiempos	2	3	2	12
Carrera del carrete	Longitud de carrera demasiado corta o larga	Decremento de capacidad de embarque, falta de capacidad de carrete, devolución	10	Definición de tolerancias superiores a las de los clientes	6	Ninguno	5	300	Mejorar proceso de profundidad de router y de cazuelas	Juan M. Pulido 9/15/2004	Se desarrollo procedimiento de alineación de brocas y se implementó prensa para router	3	3	2	18
Ensamble	Incremento de contenido de materiales	Incremento de costo del carrete	7	Nuevas tolerancias requieren mayor material	5	Ninguno	2	70	Validar diseño con corrida piloto	Juan Villarreal 9/25/2004	Se valido el contenido de materiales	2	3	2	12
Falta de claridad de las especificaciones de trabajo	Aplicación de tolerancias equivocadas	Ensamble fuera de tolerancia	10	No se tiene un proceso establecido para manejo de especificaciones	6	Ninguno	5	300	Diseñar formato de especificaciones de fabricación y dibujos de detalle	Juan Villarreal 10/07/2004	Se desarrollaron los formatos y la ingeniería que incluye las tolerancias	2	3	2	12
Mala definición de CTQs del ensamble	Carrete fuera de tolerancia	Devolución o rechazo	5	Falta de especificaciones en piso	9	Ninguno	5	225	Incluir CTQs en formatos de especificaciones	Juan Villarreal 10/07/2004	Se incluyeron los CTQs en las espec.	2	3	2	12

Figura 7.1.1.1. Análisis de modo de efecto de falla después de implementación de acciones

### 7.1.2 Comparativo de Desempeño de Nuevo Diseño

Toda vez que la corrida piloto fue exitosa vale la pena llevar a cabo un pequeño comparativo del desempeño del diseño bajo las nuevas reglas de diseño y con los procesos mejorados vs. el diseño con la capacidad de proceso obsoleta. Los resultados de dicho comparativo están plasmados en la tabla 7.1.2.1.

#### Comparativo 42-24-24 2C

Descripción	Nuevo diseño		Diseño obsoleto	
	LEI	LES	LEI	LES
Capacidad Volumetrica (pies)	581.300	617.400	570.705	638.093
Aprovechamiento vs. Espec. Cliente	100.21%	102.12%	97.36%	108.85%
Criterio del Cliente	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Rechazado
Cont. de materiales vs. valor nominal	-0.52%	0.52%	-1.56%	3.13%

Tabla 7.1.2.1. Comparativo de desempeño de nuevo diseño vs. diseño obsoleto

De la tabla se puede comentar primeramente que con el nuevo diseño se asegura que el rango mínimo de capacidad volumétrica de los clientes se cumpla (99%), se tiene que el rango de pies que pueden ser devanados para los límites de especificación es menor en comparación con el diseño obsoleto. Además, la excesiva variación de los componentes provocaba que el diseño obsoleto tuviera alrededor de 3.13% de excedente de material en el caso crítico incrementando el costo de materiales.

### **7.2 VALIDACION DE CAPACIDAD VOLUMETRICA DEL CARRETE**

Como fue establecido en la sección 6.4 de este trabajo de tesis, un crítico de calidad de las empresas cableras es la medición del cable (longitud del devanado). Los estándares de la industria de fabricación de cable manejan una tolerancia en el proceso de medición de  $\pm 1\%$ .

Los resultados del análisis de capacidad volumétrica realizado con los datos de las simulaciones antes de la optimización mostraban un % de eficiencia de empaque en el caso del límite de especificación inferior por debajo del 99% para la mayoría de los diseños. Por lo tanto, de presentarse la combinación de que las dimensiones de la longitud de la carrera y de la altura de trabajo del carrete estuvieran en el límite inferior de la especificación, la medición no podría cumplirse.

En general los resultados del análisis de la figura 6.4.1 muestran como el efecto de la variación de los componentes del carrete repercutía en gran medida en la eficiencia de empaque. Este comportamiento provocaba que en algunas ocasiones la capacidad volumétrica del carrete se viera mermada y por consiguiente que se tuvieran rechazos; por otro lado, también provocaba que en algunas ocasiones se armaran carretes con una capacidad excesiva que mostraba una falta de aprovechamiento de empaque y que a su vez generaba indirectamente problemas de embarques.

Ya que la capacidad volumétrica tiene gran relevancia para el cliente se prosiguió a validar el desempeño de cada uno de los diseños del análisis realizado en la sección 6.4 para tener un punto de comparación de la mejora obtenida con las optimizaciones realizadas. Al igual que en el análisis de la figura 6.4.1 se analizan los casos críticos de la longitud de la carrera y la altura de trabajo del carrete con la única diferencia de que se están reportando los resultados reales obtenidos del ensamble. Los resultados de la validación de la capacidad volumétrica pueden ser apreciados en la figura 7.2.1.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

### Validación de Capacidad Volumétrica de Carrete

#### Capacidad Volumétrica de Carretes, Desempeño de Nuevo Diseño

Diseño	B (in)	D (in)	C (in)		Y (in)		A (in)	X (in)	F (Pies)	
Variación Dim.			LIC	LSC	LIY	LSY			LIF	LSF
24-12-10 2C	9	1.00	11.97	12.03	6.3534	6.41179	23.00	1.00	284.29	289.40
30-20-13 2C	12	1.00	19.97	20.03	7.9264	7.99716	29.00	1.00	768.58	780.44
36-18-18 2C	17	1.00	17.97	18.03	8.4507	8.52561	35.00	1.00	944.93	959.20
42-24-24 2C	23	1.50	23.93	24.09	7.3981	7.47298	41.00	2.00	587.45	598.61
54-32-32 3C	31	1.50	31.94	32.06	9.4954	9.5868	53.00	2.00	1341.15	1362.09
66-36-32 3C	31	1.50	35.94	36.06	15.787	15.9283	65.00	2.00	2883.83	2927.79
84-48-48 4C	47	1.50	47.94	48.06	15.783	15.9325	83.00	3.00	5183.13	5257.22
96-54-56 4C	55	2.00	53.94	54.06	17.881	18.0464	95.00	3.00	4315.31	4374.55

Donde:

B = Diámetro del Tambor

D = Diámetro del Cable

C = Longitud de la Carrera

$Y = (A - 2X - B)/1.9 = (\text{Alt trab} - 2X)/1.9$

A = Diámetro de la Balona

X = Claro

F = Capacidad Volumétrica

LIC = Límite Inferior de C

LSC = Límite Superior de C

LIY = Límite Inferior de Y

LSY = Límite Superior de Y

LIF = Límite Inferior de F

LSF = Límite Superior de F

#### Capacidad con Valores Nominales de Cliente

Diseño	B (in)	D (in)	C (in)	Y (in)	A (in)	X (in)	F (Pies)
24-12-10 2C	9	1.00	12.00	6.32	23.00	1.00	282.64
30-20-13 2C	12	1.00	20.00	7.89	29.00	1.00	765.47
36-18-18 2C	17	1.00	18.00	8.42	35.00	1.00	942.12
42-24-24 2C	23	1.50	24.00	7.37	41.00	2.00	586.21
54-32-32 3C	31	1.50	32.00	9.47	53.00	2.00	1339.90
66-36-32 3C	31	1.50	36.00	15.79	65.00	2.00	2889.17
84-48-48 4C	47	1.50	48.00	15.79	83.00	3.00	5192.13
96-54-56 4C	55	2.00	54.00	17.89	95.00	3.00	4324.33

#### Eficiencia

%F LIF	%F LSF
100.58%	102.39%
100.41%	101.96%
100.30%	101.81%
100.21%	102.12%
100.09%	101.66%
99.82%	101.34%
99.83%	101.25%
99.79%	101.16%

Figura 7.2.1. Validación de capacidad volumétrica del carrete

Con los datos recopilados de minicorridas de 10 piezas de cada diseño se obtuvo la media y la distribución estándar de las dimensiones de la longitud de la carrera y del altura de trabajo del carrete. Después para considerar un proceso Six Sigma, se agregaron  $\pm 6$  desviaciones estándar a la media para efectuar el cálculo de C y de Y.

Los resultados obtenidos en la figura 7.2.1 muestran como el % de eficiencia en el límite inferior de las dimensiones esta muy cerca al 100% y en ninguna ocasión debajo del 99%. Esto elimina la probabilidad de tener un rechazo por no cumplir con el mínimo de la medición del cable.

Por otro lado, considerando el caso en el cual la variación de las dimensiones tienda a los límites superiores, se tiene que la mayor eficiencia es de 102.4%. Este resultado en comparación con los valores de eficiencia de 108.9% del análisis inicial (en el caso de los LES) esta mucho mas cerca al 100% y da cuenta de un mejor aprovechamiento del empaque, esto ayuda a tener mejor apariencia del producto y mayor eficiencia en los embarques.

En conclusión la validación de la capacidad volumétrica de los nuevos diseños muestra una notable mejoría en el desempeño de la eficiencia de empaque. Los límites de variación de la capacidad de empaque real en comparación con la de especificación del cliente se acortaron, de tal suerte que, se puede asegurar la eliminación de rechazos por incumplimiento de la medición del cable.

### **7.3 VALIDACION DE BENEFICIOS**

Después de haber validado el funcionamiento del nuevo diseño es necesario revisar el cumplimiento del beneficio económico proyectado. Para llevar esto a cabo, y considerando que se tuvo un desempeño Six Sigma en el ensamble del carrete de la corrida piloto, se desarrolló un análisis del impacto en el costo de la mala calidad debido a la reducción de los defectos (costos del reemplazo), de la reducción del tiempo extra debido a la eliminación de retrabajos, de los costos de reprocesos y del incremento en la capacidad de producción por la eliminación de defectos.

La tabla 7.3.1 muestra los resultados del análisis de la proyección del ahorro derivado de la implementación del proyecto. Podemos observar que se consideró para el análisis una implementación paulatina (ramp up) debido a que es necesario consumir los inventarios con la anterior configuración; también se está considerando una desviación del 10% (breakage 0.9) en la proyección de los ahorros debido a cambios en la mezcla de producción o a contratiempos en la implementación. Se puede observar también que la reducción de los DPMUs alcanza el nivel de Six Sigma a partir de que se llega al 100% de la transición del diseño.

**Proyección de Ahorros en Carretes de Madera**

Breakage @ 0.9

Mes	DPMU Ramp up	Reducción de DPMU	Impacto en tiempo de ciclo (piezas)	Costo de Reproceso (\$USD)	Costo Tiempo Extra (\$USD)	Costo de Reemplazo (\$USD)	Ahorro Total (\$USD)
Nov	10%	18285.986	7	\$ 5.57	\$ 11.13	\$ 184.78	\$ 201.48
Dec	30%	14222.434	21	\$ 16.70	\$ 33.39	\$ 554.35	\$ 604.44
Jan	60%	8127.105	42	\$ 33.39	\$ 66.79	\$ 1,108.71	\$ 1,208.89
Feb	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Mar	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Apr	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
May	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Jun	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Jul	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Aug	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Sep	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Oct	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47
Nov	100%	3.454	70	\$ 55.65	\$ 111.30	\$ 1,847.53	\$ 2,014.47

Ahorros Proyecto	\$ 612.14	\$ 1,224.28	\$ 20,323.12	\$ 22,159.55
------------------	-----------	-------------	--------------	--------------

Tabla 7.3.1 Proyección de ahorros debido a implementación de DFSS en carretes de madera

La figura 7.3.1 muestra un resumen gráfico del análisis de la hoja de cálculo de la tabla anterior. Se puede apreciar como los ahorros están en función de la reducción de los DPMUs.

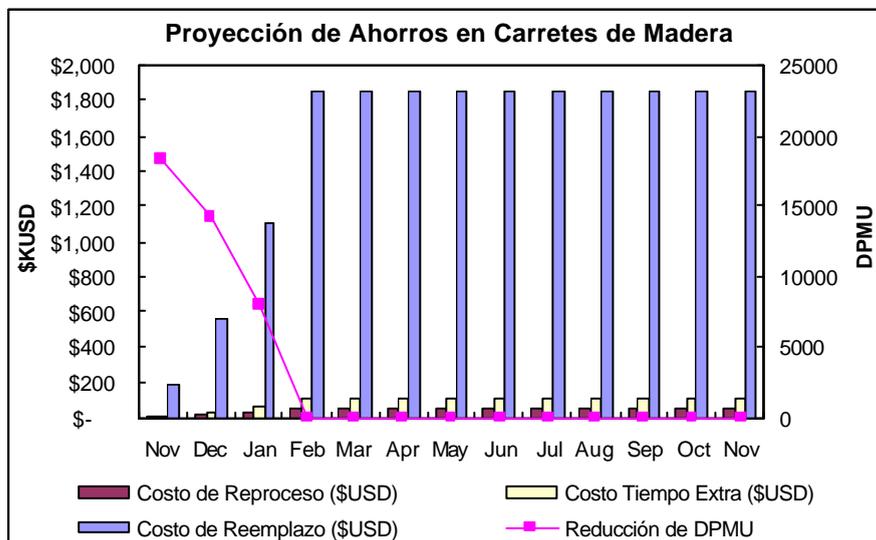


Figura 7.3.1 Gráfica de ahorros debido a implementación de DFSS en carretes de madera

Recordando la meta original del proyecto era un ahorro de \$26,800 USD y una reducción de DPMUs por debajo de los 1000. Con los resultados expresados anteriormente podemos expresar que se ha cumplido la meta de reducción de DPMUs y que el beneficio económico se quedó un poco corto debido a que se está considerando una rampa en el periodo de transición de los diseños.

Un beneficio adicional que no es cuantificado es el incremento de capacidad de producción derivada de la reducción de defectos en la línea de carretes. La figura 7.3.2 muestra como con la reducción de defectos se incrementa hay un incremento en la capacidad de la línea derivado del tiempo que no es invertido para reparar defectos.

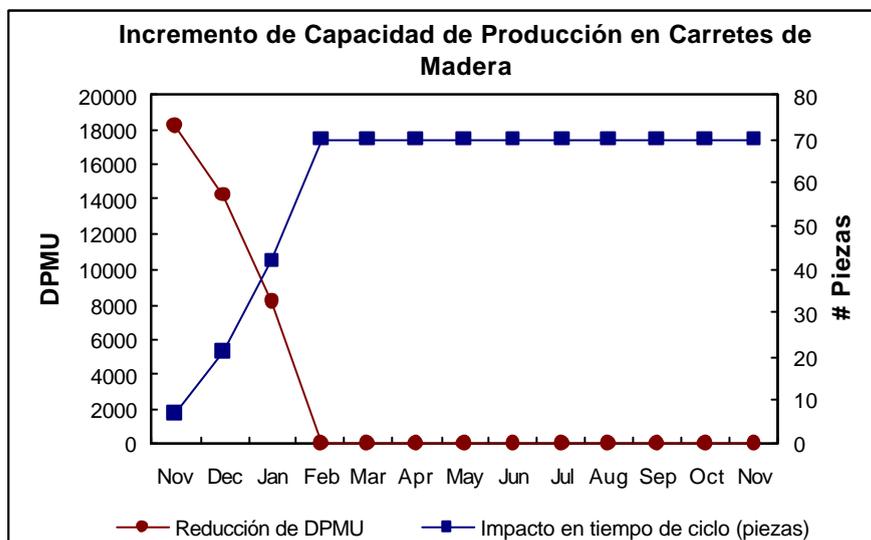


Figura 7.3.2 Incremento en capacidad de producción debido a reducción de defectos

En cuanto al costo de contenido de materiales se tiene que hacer mención que con el nuevo diseño se está reduciendo en gran medida el rango de variación de los componentes del carrete, y por consecuencia, se tendrá un mejor control sobre el contenido de materiales que es incorporado al producto; el ahorro derivado de este proceso no será cuantificado para los fines de este proyecto.

Como se ilustró en la sección 6.5.7 de esta investigación en la fabricación de los diseños obsoletos se tenía la práctica de sobredimensionar los herrajes para ser cortados al borde de la rosca después del ensamble. Esta práctica, además de desperdiciar acero, también consumía tiempo valioso de ensamble (1 min. por carrete).

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Como se comprobó en la sección 6.5.7, existe la posibilidad de reducir la longitud del herraje para eliminar la operación de corte y además para eliminar el desperdicio de acero. El riesgo de esta reducción era incrementar el tiempo de armado del carrete al reducirse el “juego” entre las balonas para incorporar la duela al tambor. Después de ensamblar la corrida piloto se pudo constatar que prácticamente el tiempo de armado estándar (8 min.) para este diseño no se incrementó y que no fue necesario llevar a cabo el corte de herrajes.

Por lo tanto se generó un ahorro adicional de \$2,400 USD derivado de la eliminación del desperdicio de corte de herraje y del tiempo de esta operación. La tabla 7.3.2 ilustra el desglose de los ahorros con el supuesto de que todos los carretes tienen 4 herrajes de 3/8”; bajo esta consideración se asegura el ahorro ya se están incluyendo diseños que normalmente tienen 6 o más herrajes de 5/8”.

### Ahorro por Nuevo Diseño de Longitud de Herrajes

Mes	DPMU Ramp up	# Unidades	Cantidad de herrajes x carrete	Total de Herrajes	Ahorro kg (3/8" diam.)	Ahorro \$USD	Ahorro por Eliminación de corte (\$USD)
Nov	10%	3642	4	1457	13	\$ 11.17	\$ 10.56
Dec	30%	3642	4	4370	39	\$ 33.51	\$ 31.67
Jan	60%	3642	4	8741	79	\$ 67.02	\$ 63.34
Feb	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Mar	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Apr	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
May	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Jun	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Jul	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Aug	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Sep	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Oct	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Nov	100%	3642	4	14566	131	\$ 111.69	\$ 105.55
Ahorros Proyecto						\$ 1,228.59	\$ 1,161.04

Tabla 7.3.2 Proyección de ahorros por nuevo diseño de longitud de herrajes

## 7.4 IMPLEMENTACION

Una parte fundamental de la metodología de DFSS es la implementación. Se tiene que estar consiente que el esfuerzo de toda la investigación puede venir a bajo si

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

no se generan los controles necesarios para una ejecución adecuada de los cambios realizados al diseño.

Para hacer extensiva la implementación al resto de los diseño se elaboró un formato para la fabricación de los componentes con la finalidad de eliminar los errores de proceso y además, dicho formato será utilizado en una rutina de revisión de primera pieza. La figura 7.4.1 muestra el formato mencionado.



**MULTIPAK, S.A. DE C.V.**  
**ESPECIFICACIONES DE CARRETES DE MADERA**  
**IP-001/01**

MODELO: \_\_\_\_\_

CUENTE: \_\_\_\_\_

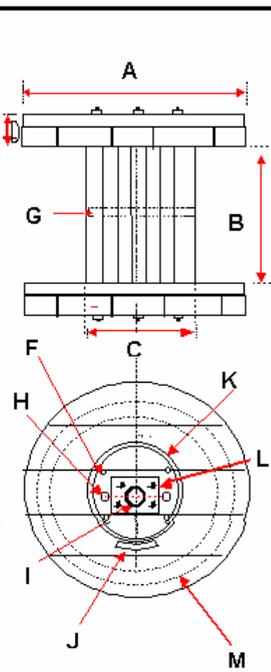
DIMENSIONES:	MEDIDAS	
<b>A</b> DIAMETRO DE BALONA		
<b>B</b> CARRERA		
<b>C</b> TAMBOR		
<b>D</b> ESPESOR TOTAL DE BALONA		
CANTIDAD, DIAMETRO Y LONGITUD DE VARILLAS		
LONGITUD DE LA ROSCA INICIAL		
<b>F</b> LONGITUD DE LA ROSCA FINAL		
CANTIDAD Y TIPO DE TUERCA PARA VARILLA		
CANTIDAD Y TIPO DE RONDANA PARA VARILLA		
<b>G</b> CANTIDAD DE CUELLOS POR CARRETE		
ESPESOR Y DIAMETRO DEL CUELLO		
<b>H</b> CANTIDAD Y DIAMETRO DE PERNOS DE ARRASTRE		
DIST. ENTRE PERF. CENTRAL Y CENTRO PERNO DE ARRASTRE		
<b>I</b> DIAMETRO DE PERFORACIÓN CENTRAL		
DIAMETRO DE LA PERFORACIÓN DEL SESGADO		
LONGITUD DE LA PERFORACIÓN DEL SESGADO		
<b>J</b> LONGITUD DEL REBAJE DEL SESGADO INTERNO Y EXTERNO		
LONGITUD DEL REBAJE DEL SESGADO INTERNO Y EXTERNO		
TIPO DE SESGADO		
<b>K</b> PROFUNDIDAD DE LA RANURA DEL TAMBOR		
ANCHO DE LA RANURA DEL TAMBOR		
DIAMETRO DE LA RANURA DEL TAMBOR		
ESPESOR, ANCHO Y LARGO DE DUELA		
<b>L</b> MEDIDA DE TUBO ENGARGOLADO		
CANTIDAD Y DIMENSIONES DE LAS PLACAS		
OBSERVACIONES:		
ELABORÓ		

Figura 7.4.1 Formato de control para implementación de nuevos diseños

Como se puede apreciar en el formato para nuevos diseño, se señalan gráficamente cada una de las dimensiones que conforman la fabricación del carrete y se expresan sus valores numéricos, cualquier nota importante o relevante es documentada

y anexada a la especificación del diseño, con esto se está minimizando el riesgo de errores de proceso y se asegura al 100% el cumplimiento de las especificaciones.

Otro punto estrictamente necesario para reforzar la fase de implementación del nuevo diseño es la generación de dibujos de detalle de los diseños de carretes con las nuevas tolerancias. La figura 7.4.2 muestra el modelo 3D de un ensamble de carrete de madera y la figura 7.4.3 ilustra el detalle del ensamble con las nuevas tolerancias.

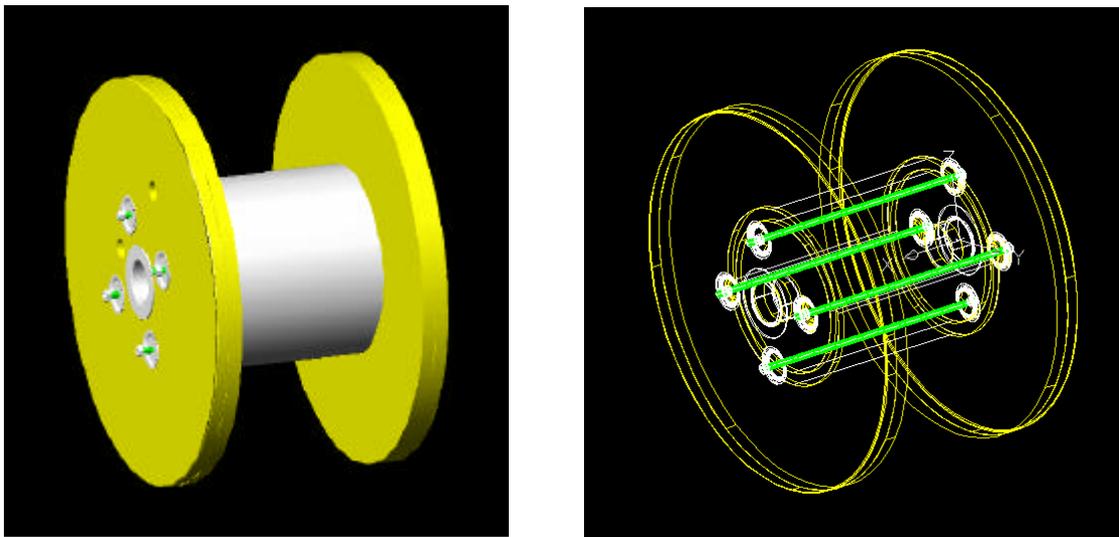


Figura 7.4.2 Modelo 3D de ensamble de carrete de madera

Con el desarrollo de los dibujos de detalle de los nuevos diseños se da el paso final en la implementación. Las mejoras realizadas en el producto por medio de la metodología de Diseño para Six Sigma quedan plasmadas en la determinación de las nuevas tolerancias incluidas en los dibujos, las cuales se obtuvieron considerando las principales variaciones del proceso y por medio de simulaciones computacionales.

Con los formatos de control de nuevos diseños y los dibujos de detalle se completan las especificaciones de proceso y de diseño necesarias para la fabricación de los componentes y el ensamble del carrete. El desarrollo de estas herramientas hace que la fase de implementación sea una tarea más eficiente, segura y sencilla.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

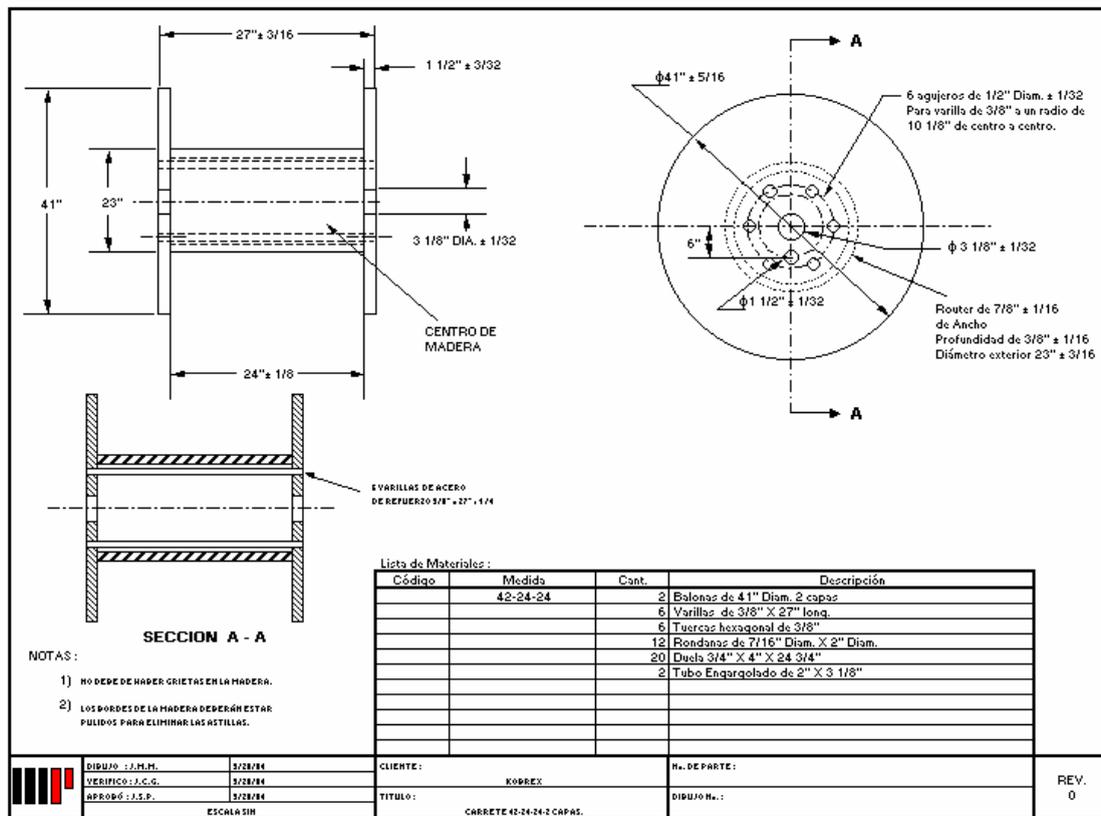


Figura 7.4.3 Dibujos de detalle de carretes de madera

## 7.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se llevó a cabo la validación de la corrida piloto del nuevo diseño, se comparó el desempeño del nuevo diseño contra el diseño obsoleto, se validó la capacidad volumétrica de los nuevos diseños, se validó el beneficio económico, se concluyó el análisis de modo de efecto de falla y se desarrollaron formatos para la implementación de nuevos diseños, revisión de la primera pieza y dibujos de detalle.

En el siguiente capítulo se documentarán las conclusiones finales de este trabajo de investigación.

## **CAPITULO VIII.- CONCLUSIONES**

### **8.1 INTRODUCCION**

En el capítulo 1 se desarrolló el marco de la tesis donde se realizó una breve introducción del problema y se planteó la hipótesis de la investigación. En el capítulo 2 se desarrolló el marco teórico donde se muestran los componentes de los carretes de madera, además se expone el problema de tolerancias desde el marco del proceso actual.

El capítulo 3 se llevó a cabo la etapa de Definición del Diseño para Six Sigma donde se ilustraron y se cuantificaron los costos de la mala calidad del diseño actual. En el capítulo 4 se realizó la etapa de Medición donde se identificaron los críticos de calidad del diseño, se desarrollaron mapas de proceso y se validaron los sistemas de medición.

En el capítulo 5 en la etapa de Análisis se llevaron a cabo estudios de estadística descriptiva para las dimensiones mas importantes del diseño, se validaron los comportamientos estadísticos de los componentes por medio de estudios de homogeneidad de varianza, se realizaron estudios de capacidad de proceso con las tolerancias obsoletas de diseño y se desarrollaron scorecards de proceso. En el capítulo 6 durante el desarrollo de la etapa de Diseño, se definieron las funciones de transferencia que fueron utilizadas para llevar a cabo simulaciones de los ensambles para determinar las nuevas tolerancias de diseño, se desarrolló un estudio de modo de efecto de falla para mitigar riesgos en el desarrollo del nuevo diseño, se optimizaron las dimensiones que presentaban mayor variación, se desarrollaron scorecards con las nuevas tolerancias y se establecieron las nuevas tolerancias de diseño.

En el capítulo 7 se llevó acabo la etapa de Validación donde se validaron las nuevas tolerancias de diseño por medio de una corrida piloto, se complementó el análisis de modo de efecto de falla, se determinó la capacidad de proceso del ensamble del nuevo diseño, se desarrollaron formatos de control para las especificaciones y se validaron los beneficios obtenidos con el nuevo diseño. En este capítulo se presentan las conclusiones finales de este trabajo de tesis.

## **8.2 CONCLUSIONES DE LA TESIS**

El objetivo general de esta investigación es la identificación, diseño óptimo y control de las variables críticas del proceso y la definición de nuevas tolerancias que permitan un óptimo desempeño del ensamble de carretes de madera por medio de la metodología de Diseño para Six Sigma.

Como fue ilustrado en la etapa de Medición de esta tesis las variaciones en el ensamble representan la mayor problemática de la empresa donde se desarrolló la investigación, por ende, el llevar el diseño del carrete a un desempeño Six Sigma representa un gran impacto en el costo de calidad en que la empresa incurre frecuentemente debido a estos defectos y ayuda a mejorar la imagen de la misma con sus clientes.

Uno de los principales retos de este trabajo de investigación fue de alguna manera documentar cada una de las fases del proyecto de Diseño para Six Sigma aplicado al ensamble de carretes, y a su vez, tratar de explicar en forma sencilla y paso a paso el uso de las herramientas utilizadas en el desarrollo de esta metodología. En gran medida uno de los objetivos alternos de este trabajo fue mostrar al lector una guía general para el desarrollo de proyectos de DFSS, se considera que este objetivo fue cubierto satisfactoriamente.

Como se pudo apreciar desde el análisis de tolerancias preliminar en el marco teórico, las tolerancias utilizadas resultaban obsoletas y no representaban el comportamiento real del carrete. En la etapa de Análisis con el estudio de capacidad de proceso de los componentes se determinó en principio que se tenía un pobre desempeño de algunos de ellos; fue muy sencillo identificar desde esta etapa las dimensiones que estaban generando el problema de ensamble; aún así, fue necesario validar la variación de los componentes al momento de llevarlos al ensamble.

En la etapa de Diseño se determinaron por medio de simulaciones nuevas tolerancias de diseño, algunas de las cuales fueron demasiado “amplias” para los requerimientos de los clientes, por lo tanto, fue necesario trabajar en mejorar la capacidad de procesos de las dimensiones con mayor variación. Los resultados obtenidos comprueban que la hipótesis de que es posible identificar y controlar las variaciones de proceso ya que la capacidad de proceso de las dimensiones con mayor variación presenta una excelente mejoría. En la tabla 8.2.1 se puede apreciar como los procesos mejorados están mas centrados y con menor dispersión en comparación con los procesos “obsoletos o actuales”.

## Diseño para Six Sigma en el Montaje de Carretes de Madera

Comparación de Desempeño de Proceso Actual contra Proceso Mejorado

Descripción	Valor nominal	Media		Desviación Estándar		Cp		Cpk	
		Actual	Mejorado	Actual	Mejorado	Actual	Mejorado	Actual	Mejorado
Longitud de duela	24.5	24.8773	24.50147	0.153	0.005145	0.26	4.53	-0.09	4.43
Profundidad de router	0.375	0.2965	0.3765	0.0675	0.006351	0.57	2.46	-0.15	2.37
Profundidad de cazuela	0.375	0.5046	0.3765	0.1509	0.0064882	0.44	2.41	-0.17	2.32

Tabla 8.2.1 Comparativo de procesos antes y después de mejora

Con los procesos mejorados y nuevas simulaciones se muestra que es posible determinar nuevas tolerancias considerando un diseño con desempeño Six Sigma. La comparación de los scorecards muestra que las dimensiones con las nuevas tolerancias tienen una mejora muy significativa en su desempeño ( $Z = 1.86$  para un carrete 42-24-24 2C y de  $Z = 1.82$  para un carrete 60-32-32 3C con diseño obsoleto en comparación con  $Z = 4.37$  para el diseño 42-24-24 2C y una  $Z = 4.40$  para un diseño 60-32-32 3C con el nuevo diseño) de corto plazo.

En la corrida piloto del nuevo diseño se observó como las capacidades de proceso de cada una de las dimensiones de estudio del ensamble del carrete de madera presentaron valores de  $Cp > 2$ , también se confirma que la desviación estándar obtenida de cada una de las dimensiones del estudio cabe al menos 6 veces entre la media y el límite de especificación, por lo tanto se comprueba que se tiene un Diseño Six Sigma.

Los resultados de la validación del diseño de este trabajo de investigación comprueban que las tolerancias obtenidas en la etapa de Diseño fueron definidas correctamente y que aseguran un ensamble de carrete con desempeño Six Sigma.

Los beneficios económicos por la reducción de defectos fueron confirmados en la etapa de validación y a pesar de que se queda un poco corta la estimación inicial, se muestra que es posible eliminar el costo de mala calidad derivado de los problemas de tolerancias de carretes de madera. La tabla 8.2.2 muestra el comparativo con los resultados y los beneficios económicos de la investigación.

Comparación de Z, Diseño Obsoleto vs. Nuevo Diseño

Descripción	Diseño Obsoleto Nivel de Z	Nuevo Diseño Nivel de Z
Largo de carrera	0.84	8.00
Longitud ext. carrete	1.20	6.14
Longitud ext. herrajes	1.74	6.03
Altura de trabajo	4.19	8.00
Excedente de tuerca	0.46	6.23
Excedente de herraje	1.69	8.00
Total Ensamble	1.48	6.26

Comparación de Beneficios Económicos

Beneficios Económicos	Estimación Inicial	Estimación Validada
Costo de Reproceso (\$USD)	\$ 742.10	\$ 612.14
Costo Tiempo Extra (\$USD)	\$ 1,484.22	\$ 1,224.28
Costo de Reemplazo (\$USD)	\$ 24,637.90	\$ 20,323.12
Ahorro kg herraje (3/8" diam.)		\$ 1,228.59
Ahorro MOD herraje \$USD		\$ 1,161.04
Ahorros Totales	\$ 26,864.22	\$ 24,549.18

Tabla 8.2.2 Comparativo de desempeño de diseño y beneficios económicos

### **8.3 TRABAJOS A FUTURO**

Si bien, es posible abordar la mayoría de los problemas de diseño en la industria manufacturera utilizando la metodología de Diseño para Six Sigma desarrollada en esta tesis, definitivamente hay áreas en las que se puede profundizar siguiendo las bases del estudio presentadas en esta investigación. Futuras tesis podrían abordar temas mucho mas complejos como el de análisis de tolerancias geométricas, donde funciones de transferencia lineales no pueden ser utilizadas; otro tema pudiese ser el estudio y desarrollo de la metodología “Design for Lean Six Sigma” (Diseño para Six Sigma Esbelto).

## **APÉNDICE A.- CONCEPTOS BASICOS DE SIX SIGMA**

### **Capacidad de Proceso y Requerimientos de Ingeniería.**

El concepto de capacidad de proceso es un elemento central en la teoría de Six Sigma. Cuando hablamos de capacidad de proceso en el contexto de la industria de la manufactura, nos referimos a que tan capaz es una línea de producción de fabricar productos que cumplan con los requerimientos de ingeniería.

Un requerimiento de ingeniería es el rango de los valores dentro del cual puede encontrarse la medición de una característica o funcionalidad del producto de manera que este conserve un nivel de desempeño satisfactorio para el cliente. Los requerimientos de ingeniería deben aplicarse a características del producto que son claves para el buen funcionamiento de éste, a las cuales llamamos CTQs (Critical to Quality). En un dibujo de ingeniería, el requerimiento esta representado por las dimensiones y sus tolerancias, definiendo estas ultimas el rango de valores que puede abarcar la dimensión sin incurrir en un detrimento del desempeño del producto. Desde luego que un requerimiento de ingeniería puede definirse también en función de una característica no geométrica, como puede ser la dureza, resistencia mecánica, temperatura, velocidad, etc. Sin embargo, estos casos escapan al alcance de este estudio.

### **La Distribución Normal y Límites de Especificación**

Cuando un producto es manufacturado, sus dimensiones criticas rara vez coincidirán con la medida nominal especificada para ellas, sino que se hallan distribuidas alrededor de este. Generalmente esta distribución es de tipo normal para la mayoría de los procesos de manufactura.

Una distribución normal se define mediante dos parámetros: la media y la desviación estándar de la población de datos (en este caso, de la colección de medidas tomadas a una determinada característica critica de un producto). La media, o promedio, se calcula de la siguiente manera:

$$media = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

En tanto que la desviación estándar es una medida de que tan dispersa se encuentra la distribución en torno a la media. Se calcula de la siguiente manera:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Una distribución normal se representa gráficamente con un eje horizontal que corresponde a los valores posibles de las mediciones tomadas a la característica en cuestión y un eje vertical que contiene la frecuencia con la que estas mediciones aparecen en la muestra. La curva resultante, para la mayoría de los procesos de manufactura, adquiere una forma que se denomina normal, es decir, para la mayoría de los procesos de manufactura, la distribución es normal. Las características morfológicas de esta curva normal se definen con la media y la desviación estándar mencionadas párrafos arriba. A mayor desviación estándar, mayor dispersión (mas individuos caen mas alejados de la media), y por lo tanto la curva normal adquirirá una forma mas baja y ancha. La figura A-1 muestra dos distribuciones normales con diferentes desviaciones estándar.

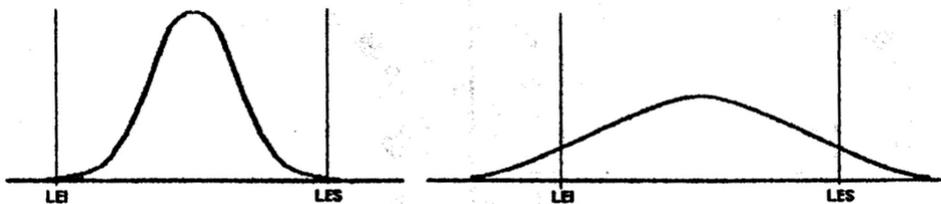


Figura A-1 Curvas normales. La curva de la izq. tiene una desviación estándar menor que la de la der.

Si tomamos un lote de la producción de una pieza e inspeccionamos una de las características críticas de cada ejemplar, podemos trazar la curva normal correspondiente a la distribución de estas mediciones. Ya que el eje horizontal representa las mediciones posibles de la característica analizada, es posible también identificar sobre este la media, el valor nominal (o "target"), el limite de especificación superior (LES), y el limite de especificación inferior (LEI) (figura A-2).

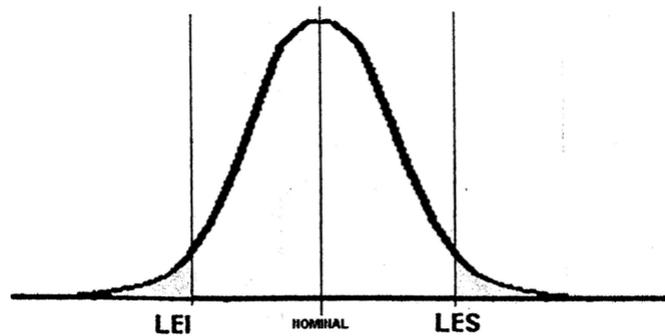


Figura A-2 Curva normal. Las zonas de defectos están sombreadas en gris.

Puesto que la curva normal representa para cada punto la cantidad de individuos en los cuales la medición arroja el valor indicado en el eje horizontal, entonces el área bajo la curva completa representa el 100 % de los individuos de la muestra (curva que, con un cierto nivel de confiabilidad, podemos considerar como válida también para la población entera). En otras palabras, y aunque suene redundante, la probabilidad de que un individuo de la muestra caiga dentro de la curva normal es 1.

Regresando a la figura A2, podemos advertir que, si se identifican los límites de especificación sobre el eje horizontal, entonces debe ser posible calcular un área bajo la curva normal que quede hacia la izquierda del LES y hacia la derecha del LEI. Esta área bajo la curva representa la probabilidad de que la característica estudiada de la población cumpla con los límites de especificación, es decir, es una representación de la capacidad de proceso.

### El Valor de Z.

La variable Z se calcula con la media de la muestra (o, en otros casos, con el valor nominal, como veremos más adelante), la desviación estándar y los límites de especificación, utilizando la siguiente fórmula:

$$z = \frac{|LE - m|}{s}$$

donde: LE = Límite de especificación

$\mu$  = media de la muestra

$\sigma$  = desviación estándar

Si se analiza brevemente esta expresión, es fácil advertir que  $Z$  no es otra cosa que la cantidad de desviaciones estándar que pueden acomodarse entre la media ( $\mu$ ) y un límite de especificación (LE). Como usualmente hay dos límites de especificación, se puede calcular una  $Z$  para cada uno de ellos.

Si bien las tablas están diseñadas para obtener probabilidades de encontrar individuos a la derecha de una  $Z$  específica, puesto que la curva de la distribución normal es simétrica, si se calcula una  $Z$  con el LEI (ZLEI) y se usa entra a la tabla con ella, el resultado puede ser interpretado como la probabilidad de encontrar un individuo de la población a la izquierda del LEI.

La meta original de Motorola era tener una  $Z$  de 6 en sus procesos, es decir, tener un proceso con una desviación estándar tan pequeña que pudiera haber 6 veces entre la media y un límite de especificación. De aquí que el método tomó el nombre de Six Sigma.

Una vez que se conoce una ZLES y una ZLEI, se puede obtener la probabilidad de que un individuo de la población quede a la derecha o a la izquierda de cada una (respectivamente). Sumando estas dos probabilidades se obtiene la probabilidad total de que un individuo quede fuera de los límites de especificación con lo cual se puede obtener una  $Z$  equivalente total.

Si se multiplica la probabilidad total de encontrar un individuo fuera de los límites de especificación por  $1E6$ , se obtiene el número de partes por millón (PPM). Como ya se ha visto, cualquiera de estos números (PPM, probabilidad o  $Z$ ) es una expresión de la capacidad de proceso y es posible convertir de uno a otro. Sin embargo, en el lenguaje de Six Sigma, se utiliza  $Z$ .

### El Descentramiento del Proceso

Uno de los aspectos que provocan más confusión en la metodología Six Sigma es el descentramiento del proceso.

Si se revisa una tabla de probabilidad  $Z$  se puede advertir que en realidad los 3.4 defectos por millón corresponden a 4.5 sigma y no a 6 sigma. Esto es porque estas tablas de distribución normal reportan probabilidades en función de  $Z$  a largo plazo (ZLP). 3.4 PPM es más o menos el equivalente a 6 sigma cuando se mide utilizando una  $Z$  a corto plazo (ZCP).

Mas que tener que ver con el tiempo en el cual fue hecho el estudio una Z a corto plazo representa el potencial máximo de capacidad que tiene el proceso. Es decir, una ZCP se calcula considerando que el proceso esta perfectamente centrado, en otras palabras, que el valor nominal corresponde exactamente a la media de la distribución. Por lo tanto, se utiliza la siguiente formula:

$$z = \frac{|LE - T|}{s}$$

Que es básicamente la misma fórmula para calcular el valor de Z, solo que utilizando T (el valor nominal, o "target") en lugar de la media. Esto deja efectivamente fuera de la ecuación a el promedio de los datos reales obtenidos en el estudio, y enfoca el calculo a la desviación estándar, que tiene que ver con la calidad de las maquinas, con el diseño de la pieza, y la habilidad del operados entre otros factores.

Por otro lado, una ZLP se calcula considerando a la media real de la muestra, y por lo tanto representa la capacidad real del proceso. Puesto que con el descentramiento una de la "colas" de la curva normal saldrá mucho mas allá de su correspondiente limite de especificación, más individuos quedaran fuera de este. Por supuesto que la otra "cola" quedara mas adentro de su limite de especificación, pero debido a la forma de la curva, son mas los individuos que salen por un lado de la curva, que los que entran por el otro. Este procedimiento incluye factores temporales, tales como cambios de turno, cambios de lotes de material, etc., y por eso se utiliza el término "plazo" en este concepto. La figura A-3 representa esto gráficamente.

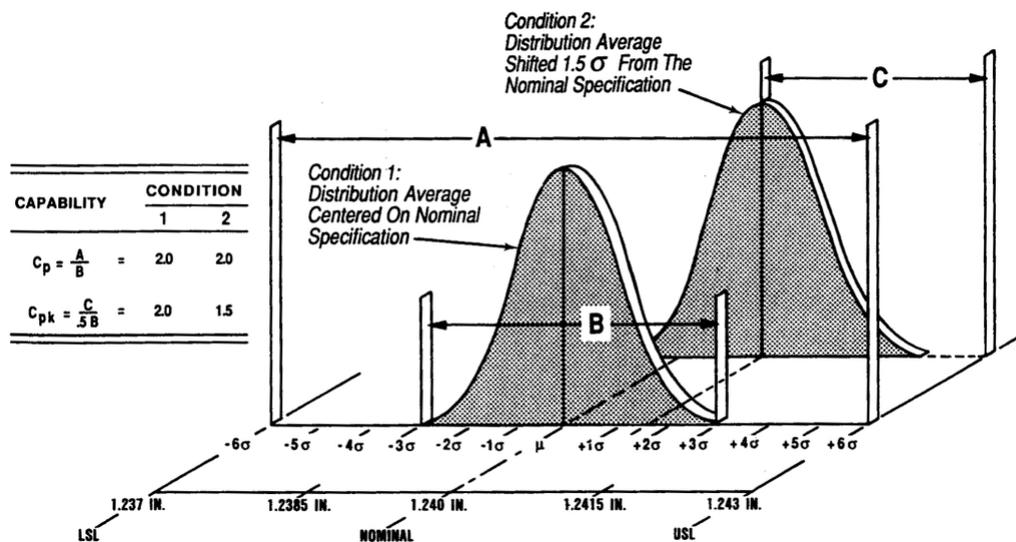


Figura A-3 Curva normal descentrada, resaltando los conceptos de Cp y Cpk [13]

$$z = \frac{|LE - m|}{s}$$

Resumiendo, ZLP nos dice “esta es la realidad de tu proceso actual”, mientras que ZCP dice; “hasta aquí puedes llegar simplemente centrando tu proceso, sin invertir en rediseños, entrenamiento o compra de maquinaria nueva”.

Generalmente se considera (y casi siempre también resulta bastante acertado) que la disminución de Z debido al descentramiento, o dicho de otra forma, la diferencia entre ZCP y ZLP es de 1.5 sigmas. Existe una convención normalmente aceptada según la cual, cuando se habla de capacidad de proceso en términos de Z, se manejan números a corto plazo, pero cuando se habla de PPM, se debe utilizar el resultado real, es decir, largo plazo. Por eso, siempre se dice que 6 sigma (es decir,  $6 - 1.5 = 4.5$  sigmas a largo plazo) equivale a 3.4 PPM.

## APÉNDICE B.- FUNCION DE DESPLIEGUE DE CALIDAD (QFD)

El QFD (por sus siglas en inglés, Quality Function Deployment) se compone de 4 etapas: planificación del producto o servicio, despliegue de las partes, planificación del proceso y planificación de la producción.

Una de las principales ventajas del QFD es la reducción de tiempo invertido y cambios de diseño en el desarrollo de un concepto hasta el diseño final (figura B-1).

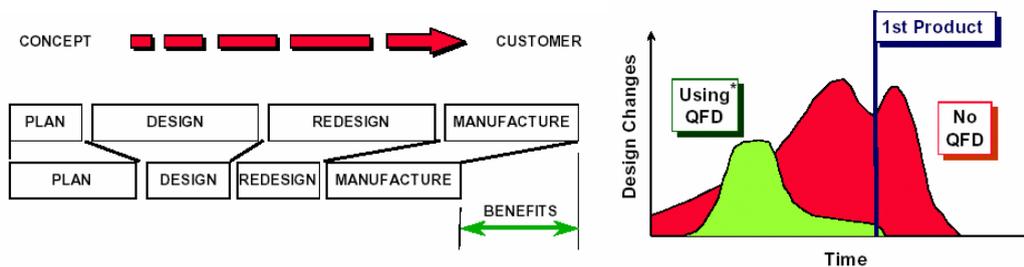


Figura B-1 Ventajas obtenidas de la realización del QFD para el diseño de nuevos productos

El QFD empieza con una lista de objetivos, o los QUE's que deseamos lograr. En el contexto del desarrollo de un nuevo producto, ésta es una lista de requerimientos del consumidor y es llamada "voz del consumidor" [14].

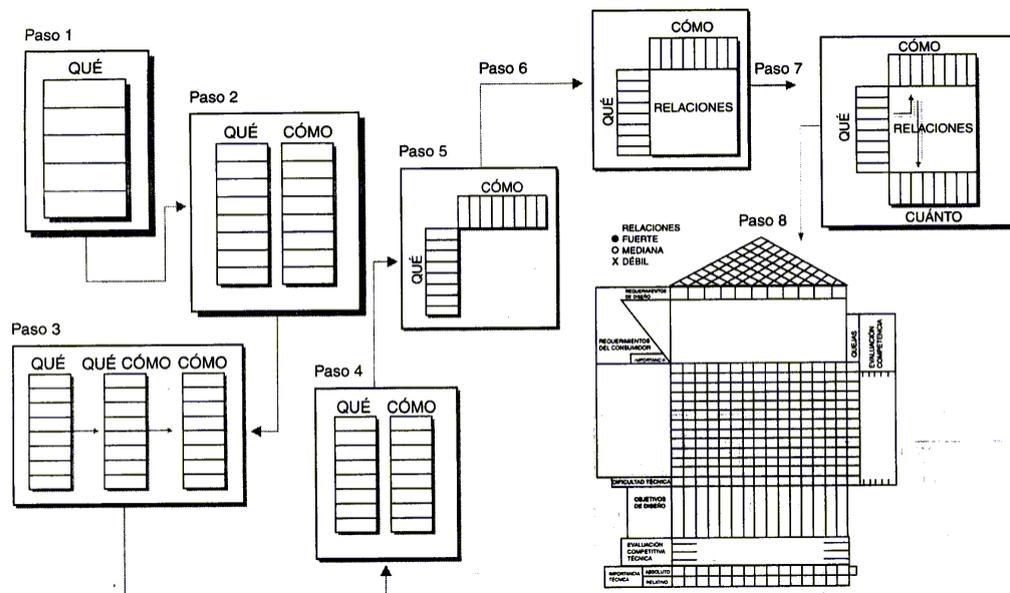


Figura B-2 Pasos para la construcción del QFD

Los elementos contenidos en esta lista son muy generales, vagos y difíciles de implementar directamente por lo que requieren una definición más detallada. Uno de estos podría ser "buen manejo", el cual tiene una amplia variedad de interpretaciones. Por lo tanto, a veces, se requiere manejar un nivel secundario o hasta uno terciario para detallar la necesidad (figura B-3) y precisar o cuantificar su verdadero sentido [15].

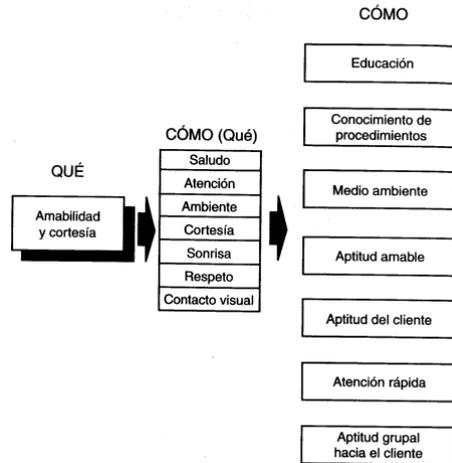


Figura B-3. Ejemplos de transformación de la demanda del cliente

### **Modelo de Afinidad (KANO)**

Los requerimientos mencionados por el usuario se conocen como la calidad del funcionamiento. Indudablemente, muchos deseos del usuario no serán expresados por el consumidor. Esto es especialmente cierto en cuanto a componentes y ensambles "escondidos". En estos casos, las funciones básicas del producto son todo lo que espera el usuario. Esto es conocido como la calidad básica. Además, muchos productos deben mostrar características emocionantes o gratas sorpresas y éstas tampoco son mencionadas por los consumidores. El consumidor tendrá dificultad en expresar necesidades que no ha sentido antes. Estas gratas sorpresas son conocidas como calidad emotiva. Estos tres tipos de calidad (básica, de funcionamiento, emotiva) son bien representadas en el modelo de Kano mostrado a continuación, el cual grafica el tipo de calidad sobre un plano que representa la satisfacción del consumidor vs. el grado de logro.



Figura B-4. Modelo de afinidad KANO

Una vez desarrollada la lista de QUE's, cada uno requiere más definición. Se refina la lista al siguiente nivel de detalle listando uno o más COMO's para cada QUE. Este proceso es similar al proceso de refinación de objetivos de mercadotecnia para obtener especificaciones de ingeniería a nivel producto. Realmente se están traduciendo requerimientos del consumidor a características globales del producto que llamaremos requerimientos de diseño. Estos requerimientos del diseño normalmente serán características medibles que podemos evaluar en el producto terminado.

El requerimiento de "buen manejo" podría traducirse a requerimientos de suspensión y estabilidad.

### Relaciones Complejas

Desafortunadamente este proceso se complica por el hecho de que algunos de los COMO's afectan a más de un QUE, e inclusive pueden afectarse opuestamente unos a otros. Sólo la mitad de las mejoras en los productos son efectivas porque muchas no produjeron la deseada mejoría o introdujeron algún problema inesperado. Esto ocurre aún con los mejores ingenieros porque estas relaciones complejas son un hecho normal de la vida que nadie es capaz de comprender totalmente.

### Tipos de Relaciones

Las relaciones son el tercer elemento clave de toda tabla de QFD y se representan mediante símbolos en las intersecciones de los QUE's y de los COMO's que están relacionados.

Es posible describir la fuerza de las relaciones utilizando diferentes símbolos. Los más comúnmente usados son:

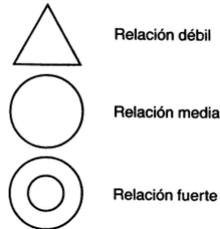


Figura B-5. Símbolos para niveles de relación

### ¿Cuánto es Suficiente?

El cuarto elemento clave de toda la tabla de QFD es la sección de CUANTO. Estas son las medidas para los COMO's. Estos valores objetivo deben representar que tan eficientes debemos ser para lograr satisfacer al consumidor y no necesariamente los niveles de funcionamiento actuales.

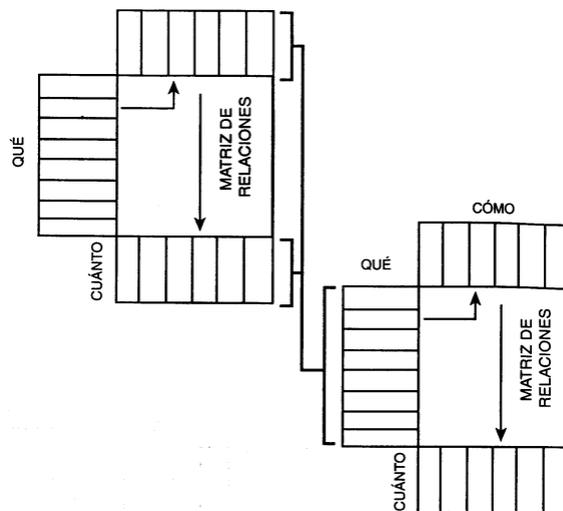


Figura B-6. Proceso del Qué al Cuánto, pasando por el Cómo

Un buen manejo, traducido a requerimientos detallados se puede medir en términos de frecuencias de manejo, proporciones de muelleo y otros valores físicos apropiados. La frecuencia de manejo sería un COMO y su medida, Hertz, sería un CUANTO.

Queremos tener los CUANTOS's por dos razones:

- Para proporcionar una manera objetiva de asegurar que los requerimientos han sido satisfechos.
- Para proporcionar metas para un posterior desarrollo más detallado.

Los CUANTO's, entonces, proporcionan objetivos específicos que guían el subsecuente diseño y son una manera de medir el progreso objetivamente, minimizando las opiniones subjetivas, además, deben ser lo más mensurables posible, por que los elementos medibles brindan una mayor oportunidad para el análisis y la optimización.

Este aspecto nos da otra oportunidad de revisar nuestra forma de pensar. Si la mayor parte de los CUANTO's no son medibles entonces no hemos detallado lo suficiente la definición de los COMO's.

### **Matriz de Correlación**

Existen varias extensiones útiles de las tablas básicas de QFD que realzan enormemente su utilidad. Estas se usan como sea necesario de acuerdo al contenido y propósito de cada proyecto en particular. La matriz de correlación es una tabla triangular a menudo unida a los COMO's (aunque también es usada en los QUE's), que establece la correlación entre cada elemento de éstos.

El propósito de esta estructura como techo es identificar áreas en donde decisiones de cambios e investigación y desarrollo pueden ser requeridas. Como en la matriz de relaciones, se utilizan símbolos para describir la fuerza de las relaciones. La matriz de correlaciones también describe el tipo de relación. Los símbolos comúnmente usados son:

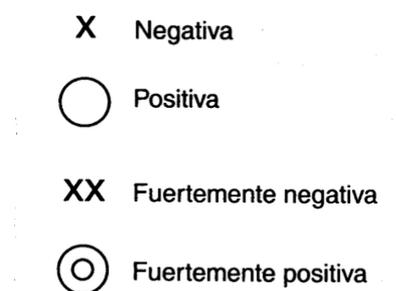


Figura B-7. Símbolos para niveles de correlación

Podemos entonces identificar cuales de los COMO's se apoyan unos a otros, y cuales están en conflicto. Correlaciones positivas son aquellas en las que un COMO apoya otro COMO. Estas son importantes ya que podemos incrementar algunas eficiencias de recursos al no duplicar esfuerzos para obtener el mismo resultado.

Correlaciones negativas son aquellas en las que un COMO afecta en forma adversa la ejecución de otro COMO. Estos conflictos son muy importantes, pues representan condiciones en las que cierta negociación es sugerida. Si no hay correlaciones negativas probablemente exista un error. Un producto bien optimizando casi siempre será el resultado de algún nivel de regateo, que será expresado por una correlación negativa.

Frecuentemente, las correlaciones negativas indican condiciones en donde el diseño y la física entran en conflicto. Cuando esto ocurre, la física siempre gana.

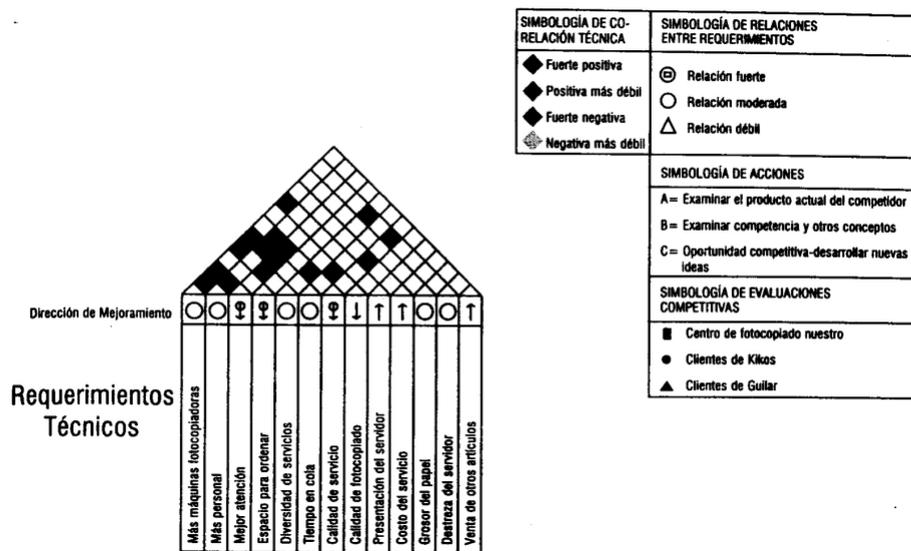


Figura B-8. Ejemplo de matriz de correlación de Comos

### Evaluación de la Competencia

La evaluación competitiva consiste en una pareja de gráficas que describen partida por partida, como se comparan los productos competitivos con los productos actuales de la compañía. Esto se hace para los QUE's así como para los COMO's.

La evaluación competitiva de los QUE's es a menudo llamada una "evaluación competitiva del consumidor" y debe utilizar información orientada al consumidor. Los ingenieros no deberían hacer esta comparación ya que sus conocimientos técnicos los predisponen. Es muy importante entender la percepción del consumidor de nuestro producto en relación con la competencia.

La evaluación competitiva de los COMO's es a menudo llamada una "evaluación competitiva técnica" y debe utilizar lo mejor del talento ingenieril para analizar productos competitivos. Lo más recomendable es que los ingenieros estén lo más directamente involucrados en este proceso para así obtener la más completa comprensión de los productos competitivos. En muchas grandes organizaciones esto se lleva a cabo por diferentes departamentos que crean maquetas y reportes que luego son compartidos con los ingenieros. La actividad independiente no puede proporcionar el mismo nivel de conocimiento al ingeniero que el estar directamente involucrado en el proceso.

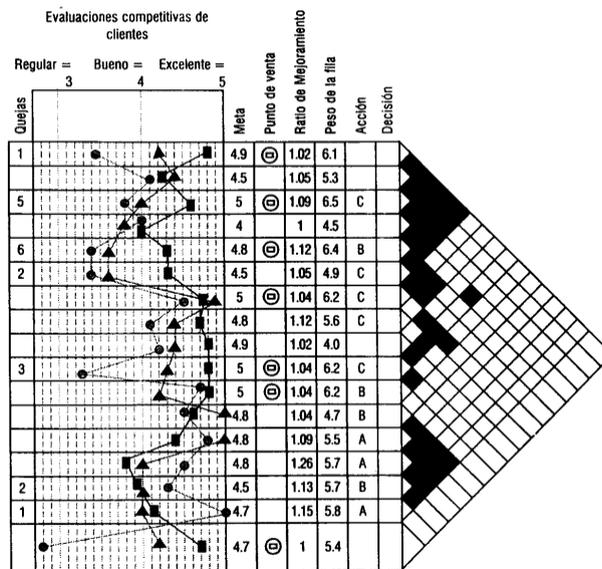


Figura B-9. Evaluación de la competencia

Por ejemplo, si creemos que una mejor amortiguación logra un manejo mejorado, es de esperarse que la evaluación competitiva muestre que productos con una superior amortiguación tienen también un superior manejo. Si esto no ocurre, existe la posibilidad de que algo significativo no se haya tomado en cuenta.

### **Grado de Importancia**

El grado de importancia es útil para priorizar esfuerzos y tomar ciertas decisiones. Las tablas numéricas ó gráficas mostrarán la importancia relativa de cada QUE ó COMO para el logro del resultado final deseado. El grado de importancia del QUE se establece con base en la evaluación del consumidor. Es expresado como una escala relativa (típicamente 1-5 ó 1-10) con los números más altos indicando una mayor importancia para el consumidor. Es importante que estos valores realmente representen al consumidor, y no a creencias internas de la compañía.

Para cada columna (ó COMO), el valor de importancia del QUE se multiplica por el peso del símbolo, produciendo un valor para cada relación. Sumando estos valores se define el valor de importancia del COMO.

El grado de importancia para los COMO's proporciona la importancia relativa de cada uno de éstos en el logro de los QUE's. Estos valores no tienen un significado directo sino que deben ser interpretados comparando las magnitudes entre ellos. Si es necesaria una decisión entre los COMO's con grado de importancia 89 y 9, se debe poner más énfasis en el COMO con grado de 89.