

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

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL  
Y MEJORA DE LA CALIDAD DE LA SOLDADURA  
EN EL ENSAMBLE DE TARJETAS ELECTRONICAS  
MEDIANTE SMT**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

**TRINIDAD RUIZ TREJO**

**SEPTIEMBRE DEL 2000**



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

**CAMPUS MONTERREY**

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



**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA  
CALIDAD DE LA SOLDADURA EN EL ENSAMBLE DE TARJETAS  
ELECTRÓNICAS MEDIANTE SMT**

**TESIS**

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

**MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA**

**TRINIDAD RUIZ TREJO**

**SEPTIEMBRE DEL 2000**

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES  
DE MONTERREY

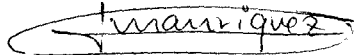
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

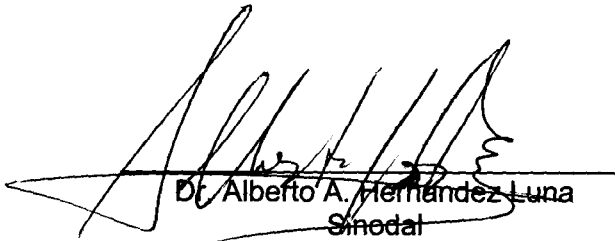
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente  
tesis del Ing. Trinidad Ruiz Trejo, sea aceptada como requisito parcial  
para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias con especialidad en:

SISTEMAS DE MANUFACTURA

COMITÉ DE TESIS



Dr. Jorge A. Manríquez Frayre  
Asesor

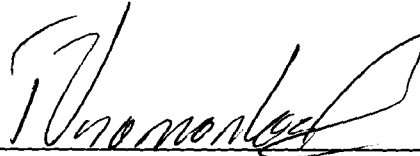


Dr. Alberto A. Hernández Luna  
Sinodal



M. C. Heriberto García Reyes  
Sinodal

APROBADO



Dr. Federico Viramontes Brown  
Director del Programa de Graduados en Ingeniería

Septiembre del 2000

## **DEDICATORIA**

***A Jesucristo mi Salvador y Señor, por quien soy y a quien sirvo.***

*A quien por su amor dio su vida por la mía en la cruz del Calvario para hacerme libre del pecado, darme vida eterna y concederme cada día la dicha incomparable de tener entrada a la presencia de Dios.  
Jesucristo vive y salvará a toda persona que se lo pida.*

***A mis padres, por el amor que me han dado.***

*Su entrega y sacrificio han hecho posible mi preparación académica.  
Ellos han sido para mí un ejemplo de fe que no sucumbe ante la adversidad, amor que todo lo da y de un estilo de vida que pone su vista en las cosas eternas y en aquellas buenas y nobles metas de esta vida.  
De manera especial quiero agradecer a mi padre por sus oraciones y el ánimo constante que me ha infundido y a mi madre por sus sabios consejos y por enseñarme a ser perseverante.*

***A mis hermanos en la fe y amigos.***

*A todos aquellos con los que he compartido de afecto, confianza y alegría.  
En particular a Ana Laura Sabre (Anita), Carlos Cantú (Chant), Eduardo Díaz (Lalito), Fernando Torres (Manchy), Jesús Cornelio (Chuchito), Jonathan González (Jonathan), Jorge Portillo (George), Luis Cáceres (Luilli), Marciano Trejo (Chano), Mauro González (Mauro), Moisés Ruiz (Moi), Nay Mónica Cabrera (Mony), Roberto Elizarraraz (Robert) y Yola Murillo (Yolita).*



## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Lic. Eduardo Cárdenas, director del Departamento de Ingeniería Mecánica del ITESM Campus Monterrey por permitirme trabajar durante la realización de mis estudios de maestría en el Departamento que él preside.*

*Al Dr. Jorge A. Manríquez por depositar su confianza en mí para el desarrollo de la presente tesis y por todo el apoyo recibido. De sumo valor fueron su asesoría y analíticos cuestionamientos en las revisiones de este trabajo.*

*Al Dr. Alberto A. Hernández por formar parte del comité de tesis. Su enfoque práctico en la resolución de los problemas y su entusiasta forma de impartir sus conocimientos serán una enseñanza perdurable para mí.*

*Al M. C. Heriberto García por haber aceptado ser parte del comité de tesis. Sus acertados comentarios fueron de gran ayuda para complementar la presente tesis.*

*Al Ing. Eduardo García por su amable disposición y por todas las facilidades concedidas al establecer el vínculo entre la planta en la que él labora y el proyecto de tesis.*

*Al Ing. Alberto Hernández por el tiempo y empeño puesto en la realización de los experimentos del caso de aplicación.*

*A los ingenieros de SMT, Francisco Yáñez, Joel Duque y Roberto Navarro quienes contribuyeron con su experiencia en la generación de la base de conocimiento técnico de SMT.*

*A los operarios de línea de la planta del caso de aplicación, Blanca Barboza, María Rosa Contreras, Arnulfo Cruz y Sergio Flores por su participación en los experimentos.*

*A todas las personas en las cinco plantas que decidieron gentilmente participar en la encuesta.*

*Al Ing. Juan Carlos Cárdenas por la programación en LabVIEW del modelo para el control de calidad de la impresión de pasta.*

*A mis compañeros de estudio, Ing. Raziel Vallejo, Ing. Angel Brito e Ing. Jesús Salgado por facilitarme de apoyos diversos para la redacción de esta tesis.*

## RESUMEN

En la última década la industria mexicana dedicada al ensamble de tarjetas electrónicas de circuitos impresos ha sido una de las que mayor crecimiento ha experimentado, de manera particular se ha incrementado la utilización de la tecnología de montaje superficial (SMT) por la ventaja de tener tarjetas con una mayor densidad de componentes electrónicos. Sin embargo, las empresas que manufacturan productos mediante el empleo de SMT enfrentan problemas relacionados con la calidad de las uniones soldadas por la presencia de diversos defectos. En forma tradicional la calidad de las uniones soldadas se inspecciona en la etapa final del proceso. Para prevenir la presencia de defectos, la costumbre es realizar ajustes en los parámetros del proceso de una manera reactiva. Los defectos derivados de la mala calidad de la soldadura son eliminados mediante retrabajo o bien se traducen en desperdicios y por lo tanto en pérdidas económicas para la empresa.

Esta tesis presenta un sistema basado en la metodología seis sigma que permite el control efectivo y la mejora de la calidad de las tarjetas electrónicas producidas, desde el punto de vista de la calidad integral de las uniones de soldadura y que puede ser implantado en líneas de producción SMT. Como parte del desarrollo del sistema, se generó una base de conocimiento técnico de SMT, que se requiere en las etapas del sistema llamadas etapas de conocimiento del proceso y que son: identificación de tipos de defectos, establecimiento de la relación entre CTQs y defectos, diagramas de pescado de defectos, matrices de causa-efecto y FMEAs. Se dan a conocer los resultados de la aplicación del sistema a una línea de producción SMT de una planta de ensamble de tarjetas electrónicas y finalmente, se presenta un programa de computadora realizado en LabVEW para el control de calidad de la operación de impresión de pasta.





# ÍNDICE

<b>Dedicatoria</b>		<b>i</b>
<b>Agradecimientos</b>		<b>iii</b>
<b>Resumen</b>		<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>		<b>xi</b>
<b>Lista de tablas</b>		<b>xiii</b>
<b>Lista de abreviaturas</b>		<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes	1
1.2	Definición del problema	4
1.3	Justificación	4
1.4	Objetivo	5
1.5	Supuestos	5
1.6	Método	6
1.7	Organización de la tesis	7
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>EL PROCESO DE ENSAMBLE DE TARJETAS ELECTRÓNICAS MEDIANTE SMT</b>	<b>9</b>
2.1	Surgimiento de SMT	9
2.2	El proceso de manufactura	10
2.3	Materiales y partes	12
	2.3.1 Componentes electrónicos	12
	2.3.2 PCB	13
	2.3.3 Pasta de soldadura	13
2.4	Operaciones del proceso de manufactura	14
	2.4.1 Aplicación de pasta	14
	2.4.2 Colocación de componentes	15
	2.4.3 Soldadura	17
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
3.1	Calidad en los productos manufacturados por SMT	19
3.2	Indicadores de calidad	21
	3.2.1 Defectos por unidad	21
	3.2.2 Rendimiento	22
	3.2.3 Partes por millón	22
	3.2.4 Defectos por millón de oportunidades	23

---

3.2.5	Conteo de defectos y del número de oportunidades	24
3.2.6	Rendimiento compuesto	25
3.2.7	Supuestos de los indicadores de calidad	26
3.3	Selección de la estrategia de inspección de calidad	26
3.4	Inspección en las operaciones del proceso SMT	28
3.5	Equipos de prueba e inspección	29
3.5.1	Visión humana	30
3.5.2	Inspección óptica automática	31
3.5.3	Inspección por rayos X	32
3.5.4	Prueba en circuito	33
3.5.5	Prueba funcional	34
3.6	Selección de la muestra a inspeccionar	35
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>		<b>39</b>
4.1	Situación actual de una muestra de empresas mexicanas de ensamble de tarjetas electrónicas	39
4.1.1	Herramientas estadísticas utilizadas para la solución de los problemas de calidad	40
4.1.2	Metodología seguida en la solución de los problemas de calidad	43
4.1.3	Indicadores de calidad empleados	45
4.1.4	Niveles de calidad obtenidos en producción	46
4.1.5	Conocimiento del producto y del proceso	49
4.1.6	Formas de realizar la inspección de calidad	49
4.1.7	Diagnóstico general	51
4.2	Sistema para el control y mejora de la calidad en SMT	51
4.2.1	Diagrama de flujo del proceso	56
4.2.2	Tipos de defectos en los productos SMT	56
4.2.3	CTQs y defectos	59
4.2.4	Diagramas de pescado de defectos	59
4.2.5	FMEA de proceso	62
4.2.6	Matriz de causa-efecto	62
4.3	Aplicación de la metodología de control y mejora de la calidad a la impresión de pasta	65
4.3.1	Antecedentes	65
4.3.2	Diagrama de flujo del proceso	66
4.3.3	CTQ y defectos	67
4.3.4	Aplicación de gráficos de control	67
4.3.5	Análisis del sistema de medición	69
4.3.6	Capacidad del proceso	71
4.3.7	Revisión de la matriz de causa-efecto	71
4.3.8	Diseño de experimentos factorial completo	72
4.3.9	Diseño de experimentos factorial fraccionado	75
4.3.10	Superficies de respuesta	80
4.3.11	Niveles óptimos de KPIVs	84
4.3.12	Conclusiones del caso de aplicación	85

4.4	Programa computacional (primera fase) desarrollado para la impresión de pasta	85
4.4.1	¿Por qué un programa de computadora para el control de calidad?	85
4.4.2	Características generales del programa desarrollado	86
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
5.1	Conclusiones	93
5.2	Recomendaciones	95
<b>ANEXO A</b>	<b>HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD</b>	<b>97</b>
A.1	Las siete herramientas básicas de calidad	97
A.1.1	Diagramas de flujo	98
A.1.2	Histogramas	98
A.1.3	Hojas de verificación	99
A.1.4	Gráficos de Pareto	100
A.1.5	Diagramas de causa y efecto	100
A.1.6	Diagramas de dispersión	101
A.2	Generalidades de un gráfico de control	101
A.2.1	Causas comunes y asignables de variación de la calidad	103
A.2.2	Errores tipo I y II	103
A.2.3	Tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo	104
A.2.4	Grupos subracionales	104
A.2.5	Reglas de sensibilidad para los gráficos de control	105
A.3	Gráficos de control para variables	106
A.3.1	Gráficos de control para $\bar{x}$ y $S$	106
A.3.2	Gráficos de control $\bar{x}$ y $S$ con tamaños de muestra variable	109
A.3.3	Gráficos de control para $\bar{x}$ y $R$	110
A.3.4	Gráfico de control para mediciones individuales	111
A.3.5	Gráfico de control de suma acumulada	112
A.3.6	Gráfico de control de promedio en movimiento exponencialmente ponderado	114
A.3.7	Límites de control de prueba	115
A.3.8	La función característica de operación	116
A.3.9	El tamaño de corrida promedio para el gráfico $\bar{x}$	117
A.4	Gráficos de control para atributos	118
A.4.1	Gráfico de control $p$	118
A.4.2	Gráfico de control $np$	120
A.4.3	Gráfico de control $p$ para tamaño de muestra variable	121
A.4.4	Gráfico de control $c$	121
A.4.5	Gráfico de control $u$	122
A.4.6	Gráfico de control para muestras de tamaño variable	122



	A.4.7 Cálculo de la función de la característica de operación y del tamaño promedio de corrida	123
A.5	Análisis del sistema de medición	124
	A.5.1 Consideraciones en el análisis del sistema de medición	125
	A.5.2 Análisis R&R	126
A.6	Análisis de capacidad del proceso	129
	A.6.1 Razones de capacidad de proceso	129
	A.6.2 Capacidad y control del proceso	130
A.7	Matriz de causa-efecto	131
A.8	Análisis de modos y efectos de falla	132
A.9	Diseño de experimentos	133
	A.9.1 Diseño factorial completo $2^k$	134
	A.9.2 Estimación de los efectos significativos	136
	A.9.3 Diseño factorial fraccionado $2^{k-p}$	139
	A.9.4 Modelo matemático de un diseño factorial	141
	A.9.5 Análisis de varianza para verificar ajuste del modelo matemático	142
A.10	Metodología de superficies de respuesta	143
A.11	Plan de control de calidad	145
<b>ANEXO B</b>	<b>ENCUESTA</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>TABLAS</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO D</b>	<b>DEFINICIONES DE DEFECTOS</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO E</b>	<b>DIAGRAMAS DE CAUSA-EFECTO DE LOS DEFECTOS DE SOLDADURA</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO F</b>	<b>ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA DEL PROCESO SMT (FASE INICIAL)</b>	<b>179</b>
<b>ANEXO G</b>	<b>PROGRAMA DE COMPUTADORA</b>	<b>183</b>
<b>CONSULTAS</b>		<b>201</b>
<b>VITA</b>		<b>203</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b>	Forma tradicional de control de calidad en el proceso SMT	3
<b>Figura 2.1.</b>	Diagrama de flujo de proceso para una línea SMT con ensamble de SMDs exclusivamente	11
<b>Figura 2.2.</b>	SMDs comercialmente disponibles en la actualidad	13
<b>Figura 2.3.</b>	Elementos principales que intervienen en las uniones soldadas de un PCB	14
<b>Figura 2.4.</b>	Perfil típico de temperatura en el proceso de reflujo para una soldadura Sn/Pb	18
<b>Figura 3.1.</b>	Ángulo de contacto en la soldadura	20
<b>Figura 3.2.</b>	Formas de realizar la inspección según el tipo de muestreo	37
<b>Figura 4.1.</b>	Diagrama de flujo del sistema para el control y mejora de la calidad en SMT	55
<b>Figura 4.2.</b>	Diagrama de flujo del proceso SMT con la integración del sistema para el control y mejora de la calidad	57
<b>Figura 4.3.</b>	Diagrama de causa-efecto para el defecto de puente de soldadura	61
<b>Figura 4.4.</b>	Matriz de causa-efecto para impresión de pasta	63
<b>Figura 4.5.</b>	Matriz de causa-efecto para colocación de componentes	64
<b>Figura 4.6.</b>	Matriz de causa-efecto para soldadura	64
<b>Figura 4.7.</b>	Diagrama de flujo de la línea 6 de SMT de la planta del caso de aplicación	66
<b>Figura 4.8.</b>	Gráficos de control x-MR para la altura de la pasta (mils)	69
<b>Figura 4.9.</b>	Curvas de nivel de la ecuación de segundo grado ajustada	83
<b>Figura 4.10.</b>	Representación tridimensional de la superficie de respuesta	84
<b>Figura 4.11.</b>	Diagrama de flujo del programa computacional para el control de calidad en impresión de pasta	88





## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b>	Organización de la tesis según actividades realizadas	8
<b>Tabla 3.1.</b>	Cálculos para obtener DPMO	23
<b>Tabla 3.2.</b>	Conteo de defectos que discrimina entre defectos individuales y colectivos	25
<b>Tabla 3.3.</b>	Cálculos para obtener el rendimiento compuesto	25
<b>Tabla 3.4.</b>	Alternativas de equipo de prueba e inspección para cada operación SMT	29
<b>Tabla 3.5.</b>	Comparación entre sistemas AOI para inspección de impresión de pasta	32
<b>Tabla 4.1.</b>	Empresas SMT y empleados encuestados	40
<b>Tabla 4.2.</b>	Herramientas básicas de calidad empleadas (pregunta 2, sección A)	40
<b>Tabla 4.3.</b>	Tipos de gráficos de control utilizados (pregunta 3, sección A)	41
<b>Tabla 4.4.</b>	Reglas de sensibilidad en el análisis de los gráficos de control (pregunta 5, sección A)	41
<b>Tabla 4.5.</b>	Forma de elaborar los gráficos de control (pregunta 4, sección A)	41
<b>Tabla 4.6.</b>	Responsable en la interpretación de los gráficos de control (pregunta 6, sección A)	41
<b>Tabla 4.7.</b>	Periodo de almacenamiento de la información proveniente de los gráficos de control (pregunta 7, sección A).	42
<b>Tabla 4.8.</b>	Herramientas estadísticas usadas para la mejora de la calidad (pregunta 11, sección A)	42
<b>Tabla 4.9.</b>	Metodología usada para solucionar problemas de calidad en el producto (pregunta 7, sección B)	43
<b>Tabla 4.10.</b>	Formación profesional del personal involucrado directamente con el proceso SMT (pregunta 6, sección B).	43
<b>Tabla 4.11.</b>	Destino de la información generada al solucionar un problema de calidad (pregunta 8, sección A)	44
<b>Tabla 4.12.</b>	Empresas certificadas por ISO-9000 (pregunta 1, sección A)	44
<b>Tabla 4.13.</b>	Indicadores de calidad utilizados (pregunta 18, sección A)	45
<b>Tabla 4.14.</b>	Forma de cálculo de ppm (pregunta 19, sección A)	45
<b>Tabla 4.15.</b>	Niveles de capacidad del proceso (pregunta 12, sección A)	46
<b>Tabla 4.16.</b>	Nivel de ppm (pregunta 1, sección B)	46
<b>Tabla 4.17.</b>	Porcentaje de retrabajo (pregunta 2, sección B)	46
<b>Tabla 4.18.</b>	Operaciones en las cuales se realiza retrabajo (pregunta 13, sección A)	47
<b>Tabla 4.19.</b>	Porcentaje de desperdicio (pregunta 3, sección B)	47
<b>Tabla 4.20.</b>	Costo de retrabajo (pregunta 4, sección B)	47
<b>Tabla 4.21.</b>	Costo de paro de línea (pregunta 5, sección B)	47
<b>Tabla 4.22.</b>	Tiempo típico para hallar la causa de un defecto de producto (pregunta 9, sección A)	47
<b>Tabla 4.23.</b>	Costos anuales de fracciones porcentuales de retrabajo y desperdicio para una línea de producción de la empresa SMT X	48

<b>Tabla 4.24.</b>	Conocimiento de las causas que originan problemas en el producto (preguntas 14-17, sección A)	49
<b>Tabla 4.25.</b>	Recursos utilizados en la inspección de la impresión de pasta (pregunta 20, sección A)	49
<b>Tabla 4.26.</b>	Recursos utilizados en la inspección de la colocación de componentes (pregunta 21, sección A)	50
<b>Tabla 4.27.</b>	Recursos utilizados en la inspección de la soldadura (pregunta 22, sección A)	50
<b>Tabla 4.28.</b>	Pasos y actividades del sistema para el control y mejora de la calidad en SMT	54
<b>Tabla 4.29.</b>	Defectos en productos manufacturados por SMT	58
<b>Tabla 4.30.</b>	CTQs y defectos relacionados	60
<b>Tabla 4.31.</b>	Muestras tomadas de la altura de la pasta impresa	68
<b>Tabla 4.32.</b>	Parámetros de los gráficos de control $\bar{x}$ y MR de la altura de la pasta (mils)	68
<b>Tabla 4.33.</b>	Resultados del análisis del sistema de medición para la altura de la pasta (mils)	70
<b>Tabla 4.34.</b>	Índices de capacidad de proceso	71
<b>Tabla 4.35.</b>	KPIVs que influyen en la altura de la pasta	72
<b>Tabla 4.36.</b>	Factores y niveles para el diseño de experimentos factorial completo	72
<b>Tabla 4.37.</b>	Matriz del diseño factorial completo y resultados de mediciones	73
<b>Tabla 4.38.</b>	Altura de pasta modificada para el diseño factorial completo	73
<b>Tabla 4.39.</b>	Matriz de cálculo para el diseño factorial completo y resultados de efectos. Unidades de la altura de pasta en mils	74
<b>Tabla 4.40.</b>	Resultados de $Sp^2$ , <i>Sefecto</i> y valor de $t$ para el diseño factorial completo. Unidades de la altura de pasta en mils	74
<b>Tabla 4.41.</b>	Desviaciones típicas e intervalos de confianza de la media y efectos para el diseño factorial completo. Unidades de la altura de pasta en mils	75
<b>Tabla 4.42.</b>	Factores y niveles para el diseño de experimentos factorial fraccionado	76
<b>Tabla 4.43.</b>	Mediciones de altura de pasta para el diseño de experimentos factorial fraccionado	76
<b>Tabla 4.44.</b>	Altura de pasta modificada para el diseño de experimentos factorial fraccionado	77
<b>Tabla 4.45.</b>	Matriz de cálculo para el diseño factorial fraccionado y resultados de efectos confundidos. Unidades de la altura de pasta en mils	77
<b>Tabla 4.46.</b>	Resultados de $Sp^2$ , <i>Sefecto</i> y valor de $t$ para el diseño factorial fraccionado	78
<b>Tabla 4.47.</b>	Desviaciones típicas e intervalos de confianza de la media y efectos para el diseño factorial fraccionado. Unidades de la altura de pasta en mils	79
<b>Tabla 4.48.</b>	ANOVA para comprobar ajuste del modelo matemático del diseño factorial fraccionado	80
<b>Tabla 4.49.</b>	Factores y niveles para el diseño de experimentos $2^2$	81
<b>Tabla 4.50.</b>	Resultados experimentales del diseño $2^2$ . Unidades de la altura de pasta en mils	81
<b>Tabla 4.51.</b>	Efectos del diseño $2^2$ . Unidades de la altura de pasta en mils	82
<b>Tabla 4.52.</b>	Coefficientes del modelo de primer orden y desviaciones típicas	82
<b>Tabla 4.53.</b>	Diseño estrella para formar un diseño compuesto de segundo orden. Unidades de la altura de pasta en mils	82
<b>Tabla 4.54.</b>	Niveles óptimos de KPIVs	85

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ANOVA</b>	Analysis of variance	Análisis de varianza
<b>AOI</b>	Automatic optical inspection	Inspección óptica automática
<b>ARL</b>	Average run length	Longitud promedio de corrida
<b>c, gráfico</b>		Gráfico de control para no conformidades
<b>CL</b>	Center line	Línea central en un gráfico de control
<b>C<sub>p</sub></b>	Capability index	Índice de capacidad potencial del proceso
<b>C<sub>pk</sub></b>	Capability index	Índice de capacidad del proceso
<b>CUSUM</b>	Cumulative sum	Gráfico de control de suma acumulada
<b>CTQ</b>	Critical to quality	Característica crítica de calidad
<b>DET</b>	Detection	Número para detección de un defecto en un FMEA
<b>DOE</b>	Design of experiments	Diseño de experimentos
<b>DPU</b>	Defects per unit	Defectos por unidad
<b>DPMO</b>	Defects per million opportunities	Defectos por millón de oportunidades
<b>EWMA</b>	Exponentially weighted moving average	Gráfico de control de movimiento promedio exponencialmente ponderado
<b>FMEA</b>	Failure mode and effects analysis	Análisis de modos y efectos de falla
<b>FT</b>	Functional test	Prueba funcional
<b>KPIV</b>	Key process input variable	Variable clave de entrada al proceso
<b>IC</b>	Integrated circuit	Circuito integrado
<b>ICT</b>	In circuit test	Prueba en circuito
<b>LCL</b>	Lower control limit	Límite inferior en un gráfico de control
<b>MR</b>	Moving range	Movimiento en el rango en un gráfico de control
<b>n</b>		Tamaño de muestra
<b>np, gráfico</b>		Gráfico de control para productos no conformes
<b>OC</b>	Operating characteristic curve	Curva característica de operación
<b>OCC</b>	Occurrence	Número para ocurrencia de un defecto en un FMEA
<b>p, gráfico</b>		Gráfico de control para fracción no Conforme
<b>PCB</b>	Printed circuit board	Tarjeta de circuitos impresos
<b>ppm</b>	Parts per million	Partes por millón
<b>QFP</b>	Quadratic flat pack	SMD del tipo cuadrático plano
<b>RPN</b>	Risk priority number	Número de prioridad de riesgo en un FMEA
<b>R&amp;R</b>	Repeatability and reproducibility	Repetibilidad y reproducibilidad
<b>SEV</b>	Severity	Número para severidad de un defecto en un FMEA



<b>SMD</b>	Surface mount device	Componente de montaje superficial
<b>SMT</b>	Surface mount technology	Tecnología de montaje superficial
<b>SPC</b>	Statistical process control	Control estadístico de procesos
<b>TH</b>	Through hole technology	Tecnología de sujeción mediante orificios
<b><math>t_{\alpha, \nu}</math></b>		Valor de la distribución t para un riesgo $\alpha$ y $\nu$ grados de libertad
<b>UCL</b>	Upper control limit	Límite superior en un gráfico de control
<b>u, gráfico</b>		Gráfico de control para número de no conformidades por unidad

# 1

## INTRODUCCIÓN

Este capítulo proporciona un panorama general al establecer los antecedentes de la tesis. Partiendo del área de oportunidad identificada aquí, se establecen la definición del problema, la justificación, el objetivo, los supuestos, el método utilizado y la organización del trabajo.

### 1.1 ANTECEDENTES

La manufactura electrónica en México ha mostrado en los últimos años un acelerado crecimiento. Según datos del INEGI para el periodo 1995-1999 [1], el índice del volumen físico de producción de la industria maquiladora de exportación creció un 93.73%, superando al crecimiento del total de la industria manufacturera que fue de un 32.97%; en este mismo periodo, el número de empleados en el ramo de ensamble de productos electrónicos para exportación se incrementó en un 41.37%, aventajando también este incremento al total del sector manufacturero que fue del 10.08%.

Productos de uso cotidiano como televisores, computadoras personales o teléfonos celulares requieren para su fabricación del ensamble de tarjetas electrónicas, que en términos generales comprende la unión por soldadura de los componentes electrónicos a las tarjetas de circuitos impresos. Una de las tecnologías de montaje para el ensamble de tarjetas electrónicas que se usa con mayor frecuencia en la actualidad es la tecnología de montaje superficial (SMT).

El número de componentes soldados a las tarjetas depende del tipo de producto electrónico por fabricar, pero usualmente son cientos y pueden ser del orden de hasta casi 10,000. Cada componente cuenta con un mínimo de dos uniones, por lo tanto, el número de uniones soldadas por tarjeta es también elevado. En general, el proceso de SMT enfrenta

problemas relacionados con la calidad de las uniones soldadas, por la presencia de diversos defectos tales como puentes de soldadura y componentes desalineados.

Supóngase el caso del ensamble de tarjetas de mediana complejidad en una línea SMT en una planta en EUA; asúmase que el producto es la tarjeta madre de una computadora con 500 componentes y 3500 uniones de soldadura y que el proceso de manufactura origina un nivel promedio de 200 uniones defectuosas por cada millón de uniones realizadas. Se produce a una razón de 33 tarjetas/hora, se laboran 24 horas/día, 5 días/semana y 50 semanas/año. Considérese también que, luego de inspeccionar, se reabajan en mayor o menor grado en las operaciones SMT un 55% de las tarjetas, se cuenta además con un nivel de tarjetas desperdiciadas del 0.44%. El costo de manufactura de cada tarjeta es de 400 dls. con un costo promedio por cada tarjeta reabajada de 10.68 dls. [2].

Para el caso anterior, puede hallarse una producción de 792 tarjetas por día, con 2,772,000 uniones por día con la posibilidad de contar con un defecto, lo cual representa un alto número de oportunidades de falla para un proceso de manufactura. Para este caso, se encuentra que los costos internos de falla anuales por conceptos de reabajo y desperdicio ascienden a 1,163,052 dls. y 269,280 dls. respectivamente.

Las posibles causas que originan los defectos de soldadura en las uniones son varias y dependen, entre otros factores, de parámetros no óptimos del proceso SMT. De esta manera, se ha definido a SMT como un proceso de manufactura complejo en donde la presencia de un cierto defecto puede involucrar más de 20 parámetros de proceso, varios de los cuales pueden interactuar entre sí [3].

En muchas empresas mexicanas de ensamble de tarjetas electrónicas, la calidad de las uniones soldadas se inspecciona en la etapa final del proceso. Los defectos derivados de la mala calidad de la soldadura son eliminados mediante reabajo o bien se traducen en desperdicios y por lo tanto pérdidas económicas para la empresa. Para prevenir la presencia de defectos, la costumbre es realizar ajustes en los parámetros del proceso, sin tener muchas veces un conocimiento de las causas raíces del problema. Esto se debe a dos razones fundamentales: la carencia de una metodología que agrupe de manera integrada un conjunto de métodos y herramientas de calidad, estadísticas y experimentales para el control y mejora de la calidad, y el poco conocimiento con el que se dispone de las

complejidades propias del proceso SMT y de las causas potenciales que originan los defectos de soldadura [4]. La figura 1.1. muestra la forma en que típicamente se realiza el control de calidad en este tipo de empresas.

Conviene señalar que la inspección de la soldadura se hace necesaria dado el fuerte impacto que tienen ligeras variaciones de los parámetros de proceso en la calidad de la soldadura. Sin embargo, la inspección aunada a un control de la calidad realizado en forma reactiva en donde se ajustan los parámetros del proceso y en ocasiones se modifican los materiales o las operaciones involucradas que no son la causa raíz del problema de calidad, genera pérdidas en términos de tiempo y costo.

La presencia de altos niveles de defectos (por encima de los 50 ppm) que afectan la calidad de la soldadura, y en consecuencia, los costos de calidad generados por concepto de desperdicio y retrabajo dañan la rentabilidad y la posición competitiva de las empresas mexicanas de ensamble de tarjetas electrónicas, en un ambiente global en donde la mano de obra barata como criterio para competir está siendo desplazada por un mercado cada vez más exigente en materia de la calidad de los productos manufacturados [4].

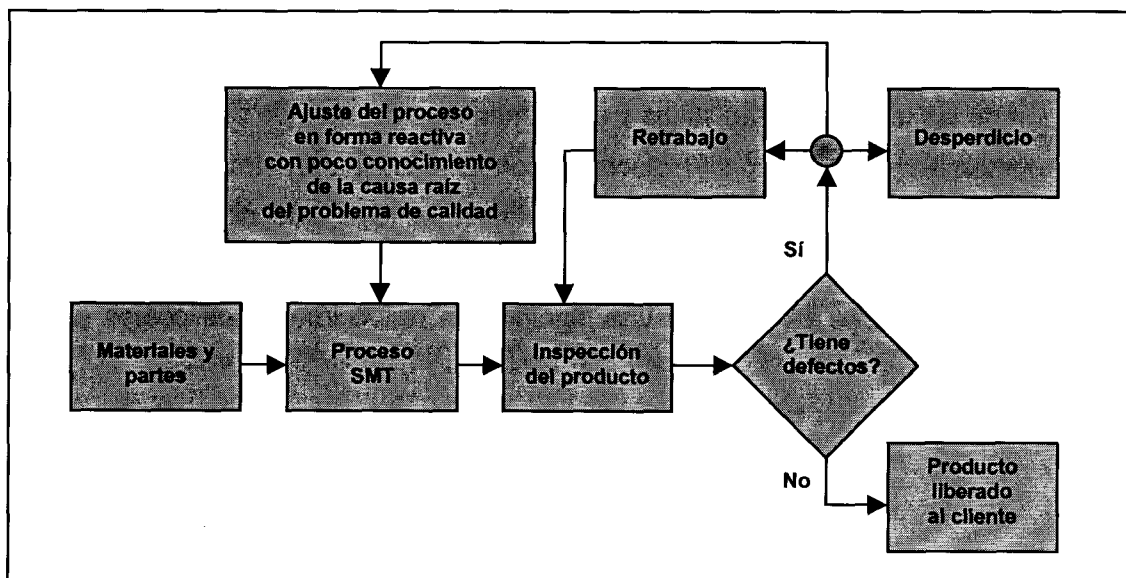


Figura 1.1. Forma tradicional de control de calidad en el proceso SMT.

## 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La compleja naturaleza de los problemas de calidad en las uniones soldadas sugiere el desarrollo de sistemas que permitan el control efectivo y la mejora de la calidad de las tarjetas electrónicas producidas, desde el punto de vista de la calidad de las uniones de soldadura y que puedan ser implantados en líneas de producción SMT.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

La forma actual de resolver los problemas de calidad es caracterizada frecuentemente por atender aquellos parámetros del proceso que no son la causa fundamental del problema, con el consecuente desperdicio de tiempo y recursos. El sistema de calidad que se desarrolla cuenta con una base de conocimiento técnico de SMT en relación con la identificación de las causas probables de defectos, fallas y cómo se relacionan con el proceso SMT, lo cual permitirá el enfocar esfuerzos para la eliminación o atenuación de las causas raíces de los problemas.

La aplicación de las técnicas estadísticas y experimentales del modelo propuesto contribuirá a que el personal de producción involucrado conozca los parámetros del proceso que afecten la calidad de la soldadura, se permita paulatinamente la reducción de la variabilidad del proceso y de los defectos de soldadura, la mejora en la calidad de las uniones soldadas por SMT y eventualmente se obtenga una significativa reducción de los costos por mala calidad del producto.

## **1.4 OBJETIVO**

Partiendo de las áreas de oportunidad que presentan las empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas con relación a la forma de resolver los problemas de mala calidad de la soldadura, es el objetivo de esta tesis, desarrollar un sistema para el control y mejora de la calidad de la soldadura en el ensamble de tarjetas electrónicas en líneas de producción SMT.

El desarrollo del sistema implica en esencia dos aspectos: el planteamiento del modelo para el control y mejora de la calidad que integre herramientas de calidad, estadísticas y experimentales; así como el llevar al cabo la base de conocimiento técnico de SMT a utilizar como parte de este sistema que identifique a su vez, las relaciones entre el proceso SMT, las distintas características de calidad del producto, sus defectos y las variables de entrada al proceso.

Como un objetivo adicional de la presente tesis se contempla la programación en computadora en su primera fase, de la parte del sistema que corresponda al control estadístico del proceso para su aplicación en líneas de SMT.

## **1.5 SUPUESTOS**

Es posible el desarrollo de un sistema para el control y mejora de la calidad de la soldadura en el ensamble de tarjetas electrónicas en líneas de producción SMT que integre herramientas de calidad, estadísticas y experimentales y cuente con herramientas de ayuda sustentadas por una base de conocimiento técnico que identifique las relaciones entre el proceso SMT, las distintas características de calidad del producto, sus defectos y las variables de entrada al proceso.

## 1.6 MÉTODO

El método seguido en el desarrollo del proyecto involucró investigación bibliográfica, trabajo de campo y experimental. Inicialmente, previa investigación bibliográfica, se elaboró el modelo general de ensamble de tarjetas electrónicas por SMT, para ello se requirieron definir las partes y la materia prima utilizadas en el ensamble.

Se estableció el marco teórico de la tesis en relación con el panorama general relativo a las formas actuales de inspección, evaluación y control de calidad utilizados en las plantas mexicanas. Se necesitó llevar a cabo investigación bibliográfica en diversas fuentes, además de la información proporcionada por el Laboratorio de Manufactura Electrónica del ITESM Campus Monterrey.

Se aplicó una encuesta a 5 empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas y a 28 de sus empleados provenientes de diversas áreas relacionadas con el proceso SMT, a fin de tener una mayor certeza en las suposiciones hechas con relación a los procedimientos y herramientas empleados para la solución de los problemas de calidad y los niveles de los indicadores de calidad de las empresas mexicanas de este giro.

Como parte de la investigación de campo y a fin de conocer en mayor profundidad el proceso SMT, se estableció especial vinculación con los ingenieros del proceso SMT de la planta donde posteriormente se realizó el caso de aplicación. Con la información recabada a partir de investigación bibliográfica y de campo, se seleccionó un modelo fundamentado en la metodología seis sigma que integra herramientas experimentales, estadísticas y de calidad para ser aplicadas en el control y mejora de la calidad de las uniones soldadas. La experiencia de los ingenieros de la planta del caso de aplicación fue de especial ayuda en la generación de la base de conocimiento técnico del sistema propuesto para el control y mejora de la calidad.

Como un caso de aplicación, se utilizó el sistema propuesto en la operación de impresión de pasta en una de las líneas de una planta que ensambla tarjetas electrónicas mediante SMT. Finalmente, se desarrolló la primera fase de un programa de computadora enfocado en el

control del proceso, para ser aplicado en línea de producción en la primera operación SMT: impresión de pasta de soldadura.

## **1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

El capítulo 2 presenta información general del proceso de ensamble de tarjetas electrónicas mediante SMT. El capítulo 3 que constituye el marco teórico, discute los indicadores que pueden ser utilizados para medir la calidad de las uniones soldadas, plantea los aspectos que deben considerarse en la selección de una estrategia de inspección de calidad y presenta los recursos de inspección utilizados actualmente.

El capítulo 4 contiene los resultados y su análisis. Se presenta, a partir de la encuesta realizada, la situación actual de las empresas que participaron y se desarrolla el sistema para el control y mejora de la calidad. Se dan a conocer los resultados de la aplicación del sistema propuesto a la operación de impresión de pasta en la línea 6 de una planta que utiliza SMT y las características del programa de computadora para el control de calidad en la operación de impresión de pasta.

El capítulo 5 expone las conclusiones y las recomendaciones que se derivan de la realización de este trabajo. El anexo A es el más extenso y contiene la descripción y muchas de las ecuaciones y procedimientos de las herramientas de calidad, estadísticas y experimentales del sistema propuesto. La tabla 1.1 presenta la lista de actividades en las que se organiza la presentación de este trabajo.



Tabla 1.1. Organización de la tesis según actividades realizadas.

Actividad	Capítulo y sección de la tesis
Descripción del proceso SMT, materiales, partes y operaciones	Capítulo 2
Discusión sobre calidad e indicadores de calidad usados en SMT	Capítulo 3. Secciones 3.1 y 3.2
Discusión sobre los criterios para seleccionar la estrategia de inspección	Capítulo 3. Secciones 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6
Análisis de la situación actual de empresas mexicanas en relación con el control y mejora de la calidad	Capítulo 4. Sección 4.1
Desarrollo del modelo para el control y mejora de la calidad	Capítulo 4. Sección 4.2
Aplicación del modelo a la operación de impresión de pasta de una línea SMT	Capítulo 4. Sección 4.3
Desarrollo de un programa de computadora (primera fase) para el control de la calidad de la operación de impresión de pasta en líneas SMT	Capítulo 4. Sección 4.4
Descripción y procedimientos generales de aplicación de las herramientas de calidad, estadísticas y experimentales para el control y mejora de la calidad	Anexo A

# 2

## EL PROCESO DE ENSAMBLE DE TARJETAS ELECTRÓNICAS MEDIANTE SMT

El objetivo del presente capítulo es definir la tecnología de montaje superficial, las partes y materiales que típicamente intervienen en este proceso y las operaciones de manufactura llevadas a cabo para obtener el producto final.

### 2.1 SURGIMIENTO DE SMT

Los primeros montajes electrónicos que se llevaron a cabo hacia el año de 1925, se realizaban sobre un soporte metálico llamado chasis. Los distintos componentes se sujetaban mediante unos sencillos elementos aislantes de cerámica o de cartón, y se interconectaban mediante hilos y cables conductores, sirviendo el propio chasis como conductor de retorno [5].

En los años 50's este sistema se abandonó por no resultar práctico. Con el desarrollo de la electrónica se hizo imperiosa la necesidad de una reducción del volumen ocupado por los montajes, siendo entonces cuando, después de laboriosos trabajos, aparecieron las primeras tarjetas de circuitos impresos (PCBs).

Actualmente, para la soldadura de componentes electrónicos a la tarjeta se utilizan dos tecnologías de montajes: tecnología de sujeción mediante orificios (TH) y tecnología de montaje superficial (SMT). La sujeción mediante agujeros es la tecnología tradicional en donde los componentes son montados en agujeros que atraviesan la tarjeta. SMT usa dispositivos que se montan, como su nombre lo indica, sobre las superficies de la tarjeta.

Los dispositivos de montaje superficial (SMDs) que son ensamblados al PCB bajo la tecnología SMT, algunas veces también son llamados componentes de montaje superficial y pueden ser definidos como cualquier componente eléctrico con o sin terminales, montado en

uno o ambos lados de un sustrato e interconectado a la tierra del sustrato a través de una unión de soldadura. Un SMD sólo hace contacto metalúrgico con el lado del sustrato sobre el cual es montado. De esta manera un PCB puede contener SMDs por ambos lados.

Las primeras aplicaciones de SMT se dieron a mediados de los años 60's en dispositivos electrónicos militares y aeroespaciales. El dispositivo de montaje superficial que hizo posible esto es llamado encapsulado plano (flat pack). El flat pack que consistía en un encapsulado cerámico con terminales planas tipo cinta, vino a reemplazar al encapsulado doble en línea (DIP). La razón mayor por la cual los flat packs fueron usados en lugar de los DIPs era la habilidad de colocar estos componentes en ambos lados del PCB. Este fue precisamente el motivo por el cual se empezó a utilizar SMT, pues produce circuitos de más alta densidad en comparación con TH [6].

En la década de los 70's, varias compañías comerciales comenzaron a introducir al mercado varios SMDs fabricados de materiales plásticos, tales como SOT 23, SOIC y PLCC, los cuales ofrecían más altas densidades. A partir de allí las industrias de automóviles y computadoras comenzaron a diseñar nuevos productos y a rediseñar otros utilizando estos nuevos SMDs. Estas dos grandes industrias iniciaron el despegue y el uso intensivo que hasta el día de hoy se le da a SMT en la manufactura de casi todo tipo productos electrónicos, que incluyen desde equipo para la industria aeroespacial hasta las industrias que fabrican dispositivos electrónicos para artículos de uso cotidiano como televisores, teléfonos celulares y computadoras portátiles.

## 2.2 EL PROCESO DE MANUFACTURA

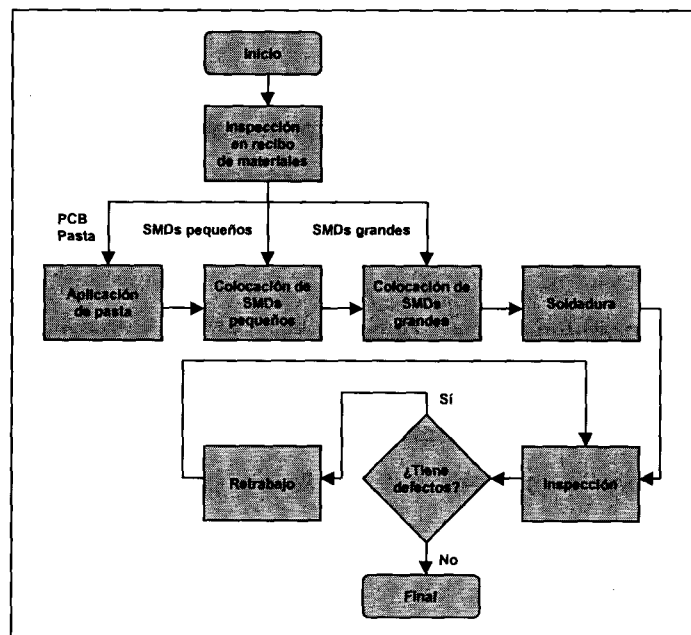
En general, cuando se trabaja en SMT deben distinguirse 3 operaciones fundamentales para unir en forma permanente los componentes al PCB:

1. Aplicación de pasta de soldadura
2. Colocación de componentes
3. Reflujo de la soldadura

Existen cuatro grandes categorías de diseños para montaje superficial, los cuales se mencionan a continuación:

- I. Los SMDs serán ensamblados a un sólo lado del PCB y no existen componentes convencionales de sujeción mediante agujeros.
- II. Los componentes convencionales coexistirán con SMDs sobre el mismo lado del PCB.
- III. Los SMDs serán ensamblados a un lado del PCB, y los componentes convencionales serán unidos al lado opuesto del PCB.
- IV. Los SMDs serán unidos a ambos lados del PCB y coexistirán con componentes convencionales.

El tipo de diseño del montaje superficial que será ensamblado dictará el tipo de operaciones así como la secuencia de manufactura en el proceso. El trabajo realizado en la presente tesis estará enfocado en el proceso de manufactura que corresponde a la categoría I mencionada anteriormente. Un diagrama de flujo del proceso para una línea SMT típica que opera bajo este esquema se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Diagrama de flujo de proceso para una línea SMT con ensamblaje de SMDs exclusivamente.

## 2.3 MATERIALES Y PARTES

### 2.3.1 Componentes electrónicos

A diferencia de los componentes convencionales, cada SMD tiene terminales soldadas solamente sobre una de las superficies del PCB. Los SMDs pueden provenir de tres agrupaciones de componentes electrónicos: pasivos, discretos y activos.

Los componentes pasivos pueden ser resistores o capacitores. Un resistor simple para montaje superficial consiste en una pastilla rectangular de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) con dos terminales externas. También existen redes de resistores y resistores variables con terminales múltiples disponibles en varios tipos de diseños de encapsulados. Un capacitor consiste de dos o más placas paralelas conductoras separadas entre sí por un material aislante, como vidrio o mica. Los capacitores pueden ser del tipo monolítico o de tantalio.

Los componentes discretos pueden ser diodos o transistores. El cuerpo de estos dispositivos está construido de silicio o epoxy. Son componentes discretos típicos el SOT 23', el SOT 89' y el MELF.

Los componentes activos, también llamados circuitos integrados (IC) están presentes en una gran variedad de encapsulados, materiales, configuraciones de terminales y número de las mismas que van desde 8 hasta más de 1000 entradas/salidas. Algunos IC típicos son SOIC, PLCC, chip carrier, QFP, BGA, entre otros.

Las terminales de los componentes sean pasivos, discretos o activos están compuestas de paladio-plata, oro, plata, cobre u otras aleaciones; aunque no es regla, las terminales se recubren con una barrera de níquel o plata y en ocasiones con una protección externa de plomo-estaño para preservar su soldabilidad. La figura 2.2 muestra algunos SMDs usados en la actualidad.

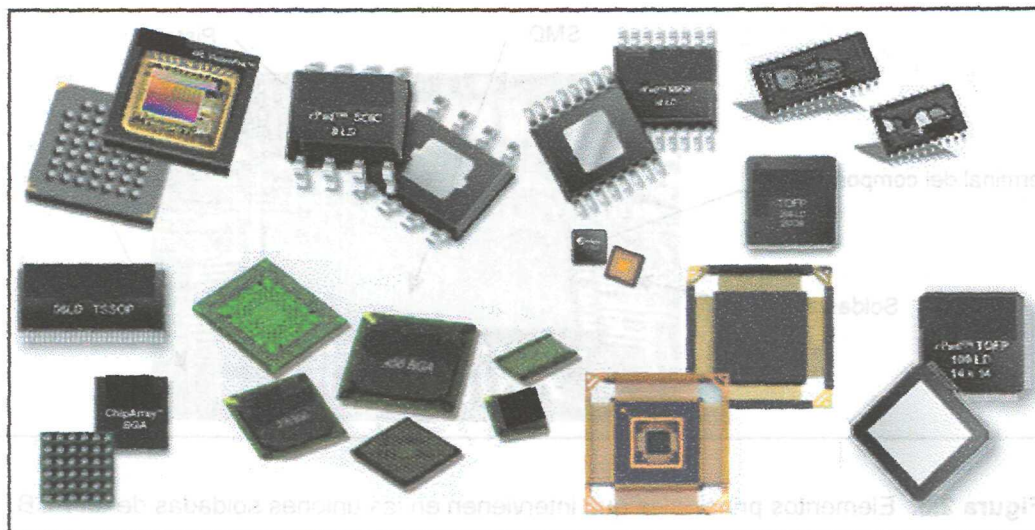


Figura 2.2. SMDs comercialmente disponibles en la actualidad [7].

### 2.3.2 PCB

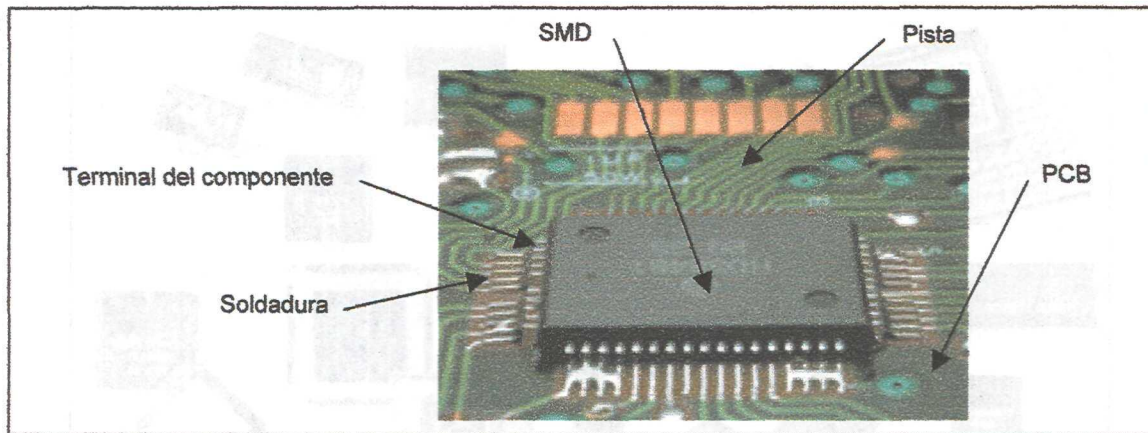
Básicamente, un PCB es una placa de material aislante (bakelita, fibra de vidrio, etc.), donde se depositan tiras de material conductor que constituyen los circuitos impresos o pistas. En la placa aislante se sitúan los componentes del circuito como lo son resistencias, capacitores y circuitos integrados, los cuales se ponen eléctricamente en contacto con los circuitos impresos, siendo éstos los que sirven de conductores eléctricos entre los distintos componentes, formando un circuito de dimensiones reducidas.

Para fijar los componentes a la tarjeta se sueldan sus terminales a las terminales (pads) de las pistas de cobre del PCB, con lo que también se logran mejores contactos eléctricos [5]. La figura 2.3 muestra los elementos principales que constituyen la unión entre un PCB y un componente del tipo SMD.

### 2.3.3 Pasta de soldadura

La pasta de soldadura consiste de partículas de soldadura (generalmente soldadura Pb-Sn) de un determinado diámetro, las cuales forman una mezcla con flux, el cual a su vez está constituido por activadores, solventes, resinas estables y modificadores de viscosidad.





**Figura 2.3.** Elementos principales que intervienen en las uniones soldadas de un PCB.

El contenido del metal puede ser entre el 82 y el 92% en peso y depende del procedimiento de aplicación de pasta que será usado. Las propiedades importantes de los polvos de soldadura de alta calidad usados en las pastas de soldadura son el que tengan una forma esférica, un tamaño y una distribución adecuada, un bajo contenido de óxido y un mínimo de impurezas.

## 2.4 OPERACIONES DEL PROCESO DE MANUFACTURA

### 2.4.1 Aplicación de pasta

Los procedimientos que se utilizan típicamente en la aplicación de la pasta de soldadura al PCB son impresión mediante cedazo (screen printing), impresión mediante estencil (stencil printing) y dispensación mediante jeringa (dispensing),

El screen consiste en una red de cables retenidos en una estructura y cubiertos con una emulsión fotosensitiva. Antes de su uso, la emulsión es expuesta en el deseado patrón y procesada de tal forma que se producen aberturas en las regiones donde la pasta ha de ser depositada. Cuando está en uso, el screen se pone en contacto con el PCB, la pasta es aplicada sobre el screen y un aplicador de pasta en forma de cuchilla metálica o de polímero

(squeegee) se hace pasar sobre el screen, esto fuerza a la pasta a pasar por las aberturas sobre la emulsión y sobre el PCB. El proceso requiere zonas de temperatura y humedad controladas.

El método dominante en la aplicación de pasta en SMT es la impresión mediante estencil, que evolucionó del screen printing. En este tipo de impresión, el estencil metálico que contiene aberturas es colocado sobre el PCB, la pasta es aplicada mediante el squeegee y forzada a pasar por los orificios del estencil para luego ser retirado dejando depósitos de pasta sobre los apropiados pads del PCB. Las ventajas de este método sobre el uso del screen printing son la mayor duración del estencil y la facilidad de colocar capas más delgadas de pasta. Los estenciles son preferidos cuando se tiene una producción de alto volumen.

Para producción de bajo volumen, el método de dispensión mediante jeringa es frecuentemente usado. En estos sistemas se usa un tornillo que guía a un pistón para ejercer la presión necesaria que libere una cantidad controlada de pasta sobre el PCB.

#### **2.4.2 Colocación de componentes**

En cuanto a la colocación de componentes se distinguen 3 principales métodos: colocación automática (pick and place), colocación por medio de robots y colocación manual.

La mayor parte de los componentes SMDs son ensamblados al PCB mediante la utilización de una máquina del tipo pick and place. Este equipo está típicamente diseñado para manejar un específico tamaño o rango de tamaños de componentes. Los componentes son suministrados a la máquina en paquetes, tubos o en forma de carretes. La máquina controlada por computadora remueve los componentes de su empaque y los coloca en el PCB en su lugar correcto. Muy a menudo se utilizan marcas de referencia en las tarjetas (fiduciales) para centrar, ajustar y asegurar una precisión en la colocación del componente de  $\pm 0.004$  in o menos.

Las máquinas pick and place son diseñadas para colocación secuencial o simultánea. Las máquinas secuenciales colocan un componente a la vez a velocidades altas, por ejemplo



20000 por hora. Muchos tipos de máquinas secuenciales están diseñadas para manejar un amplio rango de componentes desde pequeños capacitores cerámicos hasta circuitos integrados de gran tamaño sin la intervención del operador.

Una variación de la colocación secuencial es la colocación en línea. En este caso una serie de cabezas son usadas para colocar todos los componentes sobre un PCB secuencialmente. Cada cabeza coloca solamente un componente, de esta manera el número de cabezas utilizadas está determinada por el número de componentes sobre el PCB. Estos sistemas en línea son utilizados para producción de alto volumen. Dado que la colocación es secuencial, el tiempo de ciclo efectivo para un PCB completo es justamente el tiempo que la máquina toma en colocar un componente. Por el gran número de cabezas que son necesarias, las manufactureras con colocación en línea requieren una elevada inversión de capital, además de la dificultad que existe para reconfigurar para diferentes tipos de PCB.

Las máquinas de colocación simultánea son diseñadas para montar todos los componentes sobre un PCB en un solo paso. Por consiguiente, estas máquinas son capaces de velocidades mucho más altas de colocación que las máquinas secuenciales y a velocidades muy cercanas a los equipos de colocación en línea. Los componentes son alimentados de debajo de un arreglo de cabezas de colocación arregladas para montarlos directamente sobre los lugares requeridos en el PCB. Los tiempos de ciclo típicos son de 5 a 10 segundos por PCB. Estas máquinas son configuradas para un PCB específico, y al igual que los equipos en línea, carecen de la flexibilidad de las máquinas de colocación secuencial. Sin embargo, para ensambles de alto volumen sobre un PCB de baja complejidad son una alternativa muy económica.

La colocación por medio de robots es usada en aquellos casos donde se requiere una precisión o versatilidad extrema. El brazo articulado de un robot de propósito general es capaz de complejos movimientos necesarios para colocar muchas formas singulares de componentes. Un robot es capaz de una mayor precisión en la colocación, sin embargo su velocidad de operación es menor que las máquinas pick and place, con un tiempo de colocación promedio de 3 a 10 segundos por componente.

La colocación manual está limitada a una producción de bajo volumen. Operadores con experiencia pueden colocar componentes con un bajo número de terminales a una velocidad de 50 a 100 componentes por hora. Los componentes con espacios entre terminales menores a 0.050 in son muy difíciles de colocarse de manera manual. En este tipo de colocación se recomienda usar instrumentos ópticos para lograr que el operador trabaje con ampliaciones de 3 a 10x. Se ha mostrado que los niveles de defectos en la colocación manual son de 10 a 100 veces más altos que en la colocación automática [8].

### 2.4.3 Soldadura

El proceso de soldadura (soldering) es definido como un método de unión metalúrgico que usa un metal con un bajo punto de fusión (usualmente bajo 315°C) como material de aporte. La soldadura requiere el mojado del metal a ser soldado por el material de aporte para la formación de la unión. Es esta humidificación por el fundido de la soldadura la que genera la interfase de unión entre los materiales.

Una vez establecida la condición inicial de humidificación del metal base, habrá un área de agitación térmica entre la soldadura líquida y el metal base lo cual originará difusión atómica y por lo tanto la formación de soluciones sólidas o compuestos intermetálicos los cuales una vez solidificada la soldadura constituirán los medios de unión intermetálica. La continuidad metálica establecida constituye una unión con propiedades de conductividad térmica y eléctrica, así como de resistencia mecánica [9].

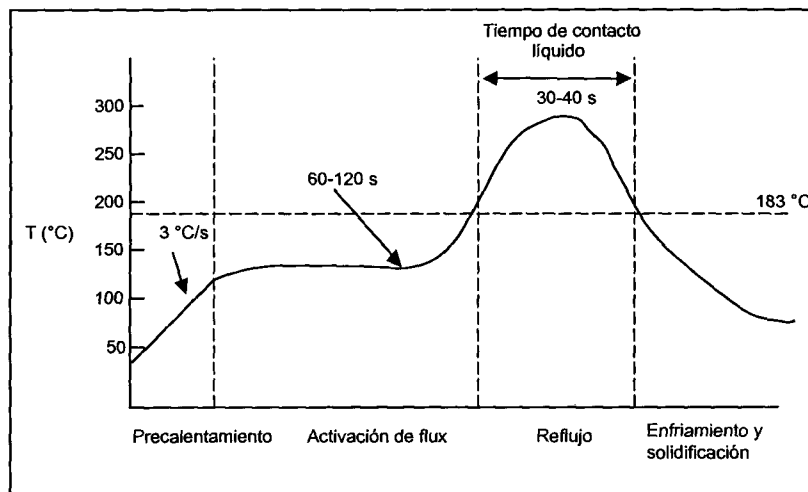
La soldadura más comúnmente utilizada para unir los componentes a la tarjeta electrónica contiene 61.9% estaño (Sn) y 38.1% plomo (Pb) y tiene un punto de fusión de aproximadamente 183°C. En este caso en particular, la unión se lleva a cabo entre las terminales de los componentes y los conductores impresos en el PCB.

El proceso de soldadura utilizado en SMT es efectuado en un horno por el método de reflujo. El proceso de reflujo a su vez se divide en tres principales subprocesos: activación de flux, reflujo y enfriamiento y solidificación. La figura 2.4 muestra un perfil típico de temperatura para una pasta de soldadura durante su proceso de reflujo.

En la activación de flux se tiene un precalentamiento para evitar daños en los componentes electrónicos debido a cambios bruscos en la temperatura. Conforme se eleva la temperatura empieza a evaporarse el solvente. La temperatura de activación del flux varía dependiendo del tipo que se utilice, generalmente es entre 150°C y 170°C, esta temperatura debe ser menor que la de fusión de la soldadura. En este rango de temperaturas el flux se activa y limpia las superficies que van a ser soldadas.

En el reflujo las partículas de soldadura primeramente tienen un reacomodo debido a la evaporación del solvente. El reflujo se empieza a propagar en una región pastosa frontal a la transferencia de calor, en donde se encuentran partículas líquidas y sólidas. Este comportamiento se observa entre 180 y 200°C para la soldadura Sn/Pb 63/37. La región líquida aparece siguiendo la formación de la zona pastosa. En este momento empieza el extendimiento de la soldadura, por la parte curva de la terminal, provocando que posteriormente se tenga un hundimiento de la misma para conservar el volumen de la soldadura. El proceso de extendimiento debe estar entre 15 y 30°C arriba del punto de fusión de la soldadura.

El punto más alto de temperatura tiene lugar al final del túnel de calentamiento, para inmediatamente salir de este y empezar el proceso de enfriamiento y solidificación que influye de manera importante en las propiedades mecánicas y microestructura de la unión



**Figura 2.4.** Perfil típico de temperatura en el proceso de reflujo para una soldadura Sn/Pb.

# 3

## MARCO TEÓRICO

En este capítulo se dan a conocer los distintos criterios utilizados para evaluar la calidad de un producto manufacturado por SMT. Se indican los elementos principales de una estrategia de inspección de calidad en términos de la etapa del proceso, la alternativa de equipo de prueba o inspección y la manera de obtener la muestra a inspeccionar. Además, se describen los equipos de prueba e inspección utilizados típicamente en el proceso SMT.

### 3.1 CALIDAD EN LOS PRODUCTOS FABRICADOS POR SMT

Son muchas las definiciones que existen acerca de la calidad. Desde un punto de vista tradicional, la calidad para un producto manufacturado es el grado en el cual cumple con las especificaciones establecidas en el diseño. Cuando las uniones en un PCB no cumplen con las especificaciones es porque cuentan con uno o más defectos. Un defecto o falla es cualquier aspecto de una unión soldada que no satisface los requerimientos especificados.

En un sentido estricto un artículo defectuoso es una unidad o producto que contiene uno o más defectos, sin embargo dado que no todos los defectos son críticos para el desempeño del producto, el seguimiento que se le da a cada PCB defectuoso depende de la severidad del defecto presentado.

El enfoque de calidad que ha dado Taguchi, si bien considera el diseño como el aspecto más importante para lograr la calidad del producto final, pretende que el producto manufacturado cumpla con el valor nominal establecido en el diseño con una mínima variación respecto a este valor. De acuerdo con Taguchi toda variación del producto respecto a su valor nominal está asociada con una pérdida de calidad y por lo tanto con un costo.

Las uniones permanentes de calidad logradas por la soldadura bajo SMT deberán tener ciertas características visuales y eléctricas. Las características visuales proporcionan información acerca del comportamiento de las etapas de impresión de pasta, colocación de componentes y soldadura. Las características visuales que debe cumplir una soldadura de calidad de acuerdo con la norma J-STD-001B [10] son las siguientes:

1. La unión de soldadura debe indicar evidencia de humidificación y adherencia en donde la soldadura y la superficie del pad formen un ángulo de contacto de  $90^\circ$  o menos (ver figura 3.1), excepto cuando la cantidad de soldadura resulte en un contorno el cual se extienda sobre el borde de la tierra.
2. La unión soldada debe tener generalmente una apariencia suave con brillo metálico. Un brillo raso es aceptable.

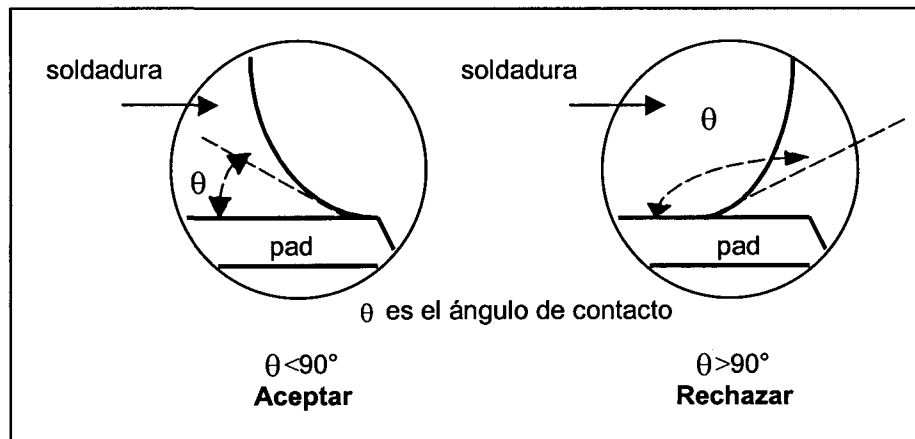


Figura 3.1. Ángulo de contacto en la soldadura.

Las características eléctricas son las típicamente inspeccionadas después de la soldadura. En una prueba eléctrica se determina que el comportamiento de los parámetros eléctricos de cada componente ensamblado al PCB sea el adecuado, o bien que el funcionamiento global del PCB como producto sea el establecido en el diseño. Las pruebas eléctricas proporcionan información acerca de problemas presentados en cada etapa del proceso de manufactura pero también identifican fallas derivadas del diseño, fabricación del PCB y de los SMDs.

De manera tradicional la calidad se ha inspeccionado en la etapa final de los procesos de manufactura para asegurar que no lleguen productos defectuosos al cliente. De esta manera en la literatura [3] [8] [10] se reportan diversos tipos de defectos en la soldadura por SMT, como son: puentes, excesos de soldadura, insuficiencias de soldadura, desalineamientos, componentes movidos, componente equivocado, unión abierta, no humidificación, porosidad, unión fracturada, soldadura retraída, bolas de soldadura, unión granulosa y unión opaca.

### 3.2 INDICADORES DE CALIDAD

Las empresas de manufactura electrónica en México típicamente utilizan 2 tipos de indicadores para medir la calidad: las partes por millón (ppm) defectuosas en los PCBs y el rendimiento (yield) en las operaciones del proceso de manufactura. Sin embargo, no existe unidad en cuanto a la forma de calcularlos [4], por lo tanto, en este apartado se darán a conocer las formas de obtener estos y otros indicadores, varios de los cuales son utilizados en la metodología seis sigma (Six Sigma) [11].

#### 3.2.1 Defectos por unidad

El número de defectos por unidad (DPU) es el número de defectos observados entre las unidades (PCBs) inspeccionadas. Matemáticamente este indicador se obtiene de la siguiente forma:

$$DPU = \frac{D}{U} \quad (3.1)$$

Donde:

D = Defectos observados

U = Unidades inspeccionadas

### 3.2.2 Rendimiento

El rendimiento se define como la probabilidad de cero fallas en las unidades producidas. Si se define como variable aleatoria  $X$ , el número de fallas obtenidas en las unidades producidas, entonces la distribución Poisson puede ser utilizada para representar el comportamiento de esta variable aleatoria. El parámetro  $\lambda$  de la distribución Poisson estará dado por el número de defectos por unidad. Matemáticamente la relación para el rendimiento es:

$$Y = P(x = 0) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} = e^{-\lambda} = e^{-\text{DPU}} \quad (3.2)$$

Donde:

$\lambda$  = Media de la distribución

$X$  = Número de defectos o fallas

En las manufactureras mexicanas, el rendimiento para cada operación SMT se obtiene de manera directa dividiendo el número de unidades sin defectos entre el número total de unidades procesadas [4].

### 3.2.3 Partes por millón

Cuando el valor de  $\lambda$  es pequeño, la distribución Poisson también puede ser usada para estimar el valor  $Z$  de la distribución normal. Esta estimación será bastante buena cuando el valor del parámetro  $\lambda$  sea menor a 1, lo cual ocurre generalmente en un proceso SMT en donde los valores de DPU están muy por debajo de 1. Para estimar el valor  $Z$  de la distribución normal a partir de la Poisson se obtiene el valor  $Z$  para los defectos por unidad (DPU). Este valor  $Z$  se define como la variable  $Z$  equivalente ( $Z_{\text{equiv}}$ ) y algunas veces se expresa usando  $Z$  de largo término ( $Z_{\text{LT}}$ ). Si se considera además que típicamente los procesos presentan un cambio en la media igual a  $1.5 \sigma$ , de acuerdo a como es asumido en seis sigma, entonces es posible también obtener un valor  $Z$  de corto término ( $Z_{\text{ST}}$ ).

$$Z_{LT} = Z_{equiv} \quad (3.3)$$

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

Para determinar el nivel de partes por millón (ppm), es decir, el número de unidades defectuosas por cada millón producidas se convierte el valor  $Z_{ST}$  también llamado nivel de calidad sigma a nivel de partes por millón defectuosas. En el anexo C.1 se presenta una tabla para convertir niveles de calidad sigma a ppm.

### 3.2.4 Defectos por millón de oportunidades

El indicador de defectos por millón de oportunidades (DPMO) considera el número de oportunidades de falla. Para obtener el DPMO primero es necesario clasificar los defectos y obtener el número de oportunidades (OP) para cada tipo. El número de defectos (D) y las unidades producidas (U) son entonces monitoreadas. Los globales pueden ser determinados para los defectos, los defectos globales por total de oportunidades así como el nivel global de defectos por millón de oportunidades pueden ser obtenidos aplicando las relaciones indicadas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Cálculos para obtener DPMO.

Tipo de defecto	Defecto	Unidades	Oportunidades	Total de oportunidades	Defectos por unidad	Defectos por total de oportunidades	Defectos por millón de oportunidades
Tipo de defecto	D	U	OP	TOP = U x OP	DPU = D / U	DPO = D / TOP	DPMO = DPO x 1000000
Globales	DG = Suma de Ds			TOP		DPOG = DG / TOP	DPMO = DPOG x 1000000

En la manufactura electrónica se procesan gran variedad de modelos. Cada uno de estos modelos tiene diferentes tipos de componentes y número de uniones soldadas. Si se utiliza DPMO se cuenta entonces con una medición uniforme para el proceso y no propiamente



para el producto, de esta forma se pueden llegar a hacer actividades de mejora de manera más efectiva sobre el proceso.

En las manufacturas mexicanas es común el uso del término ppm cuando se habla de DPMO, por lo cual en lo sucesivo en este trabajo, se usará el término ppm indistintamente para ambos indicadores.

### **3.2.5 Conteo de defectos y del número de oportunidades**

En las manufactureras mexicanas no existe uniformidad en cuánto a cómo realizar el conteo de defectos [4]: en algunas se cuenta como un defecto cada unión soldada que presente alguna falla, en otras se cuenta como un defecto cada componente en el que se halla presentado una unión defectuosa.

Para contar los defectos Tom Clifford [12] sugiere enfocarse hacia las causas que originan los defectos y no hacia los síntomas. Para ello divide a los defectos en individuales y colectivos. Defectos individuales son aquellas uniones aisladas que presentan algún defecto y defectos colectivos son aquellos que por su naturaleza o la región en que se presentan es difícil señalar a que unión específica de un componente afectan, son contabilizados como el número de componentes a los cuales afectan.

La forma de considerar el número de oportunidades estará relacionada con el criterio escogido para contar los defectos, de esta manera se presentan tres opciones:

1. Si para contar defectos se consideran la cantidad de uniones afectadas, entonces el número de oportunidades será el número total de uniones del PCB. Para el uso de este criterio es imprescindible contar con equipos de inspección con capacidad para inspeccionar el 100% de las uniones de cada PCB.
2. Si para contar defectos se considera el número de componentes con uniones defectuosas entonces el número de oportunidades será el número total de componentes del PCB. Esta al parecer es la forma de conteo más sencilla de realizar.
3. Si en el conteo se distingue entre defectos individuales y colectivos, el número de oportunidades será igual al número de uniones soldadas más el número de

componentes totales del PCB. Este criterio es favorecido por la norma MIL-STD-2000 [12]. Sin embargo, se requiere que la persona que efectúa el conteo sepa discriminar entre defectos individuales y colectivos; la tabla 3.2 puede ser de ayuda en este sentido.

**Tabla 3.2.** Conteo de defectos que discrimina entre defectos individuales y colectivos

Tipo de defecto	Forma de contar
Puente, exceso, insuficiencia, pico, no humidificación, soldadura fría, componente levantado, unión fracturada, retracción de soldadura, unión opaca, unión granulosa	Uniones aisladas que presenten cualquiera de estos defectos deben ser contadas individualmente. Sin embargo una serie de uniones que presentan estas fallas a lo largo de uno o más bordes de un componente que están relacionadas a una causa específica deben ser contadas como un defecto.
Desalineamiento, componente movido, faltante de componente, polaridad invertida de componente, componente equivocado	Contar el componente que presenta cualquiera de estos defectos y no el número de terminales que lo presentan.
Porosidad, bolas de soldadura	Contar el número de componentes que están cerca del lugar donde la condición aparece.

### 3.2.6 Rendimiento compuesto

El rendimiento total de un proceso SMT, también conocido como rendimiento compuesto se obtiene multiplicando entre sí los rendimientos obtenidos en cada operación del proceso. La tabla 3.3 muestra como hacer los cálculos si los rendimientos de cada operación son obtenidos a partir de los defectos por unidad.

**Tabla 3.3.** Cálculos para obtener el rendimiento compuesto.

Operación	Defectos	Unidades	Defectos por unidad	Rendimiento de la operación
Se calcula para cada una de las 3 operaciones de SMT	D	U	$DPU = D / U$	$Y = e^{-DPU}$
Totales	Suma de Ds	Suma de Us	Suma de DPUs	Multiplicación de Ys <b>Rendimiento compuesto</b>

### 3.2.7 Supuestos de los indicadores de calidad

El primer supuesto considerado en el cálculo de los indicadores citados es que cada operación del proceso se considera caracterizada por una distribución normal. Como ya en su momento se citó también se considera que la media del proceso no está centrada sino tiene una desviación de  $1.5 \sigma$ . Además se asume que las medias y las desviaciones estándar son conocidas.

En el caso del uso de la distribución Poisson se considera que los defectos se encuentran uniformemente distribuidos en las unidades producidas y que existe independencia entre las operaciones del proceso. Como es difícil que todos estos supuestos se cumplan se deben tomar con reserva los indicadores calculados, lo que sí es una constante es que cualquier mejora en el proceso logrará una reducción de los mismos.

### 3.3 SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE INSPECCIÓN DE CALIDAD

La estrategia de inspección a considerar comprenderá las operaciones de una línea SMT, es decir, impresión de pasta, colocación de componentes y soldadura. Conviene señalar que en el presente estudio no se considera la inspección en recibo de materiales. La estrategia de inspección que opera en un proceso SMT responde a las siguientes interrogantes:

1. ¿En qué operaciones del proceso se requiere inspeccionar?
2. ¿Qué tipo de equipo de prueba o inspección es utilizado?
3. ¿Cuántas uniones o componentes y con qué frecuencia son inspeccionados en cada PCB?

Cuando se pretende seleccionar una estrategia óptima de inspección deben contestarse estas preguntas, previo un conocimiento de las distintas opciones que pueden satisfacer cada interrogante. Una estrategia de inspección debe considerar las ventajas y desventajas de cada alternativa de inspección. Desde el punto de vista de costos y para evaluar las alternativas de prueba e inspección, deben incluirse los siguientes principios básicos [13]:

1. Simplificar el proceso reduciendo el número de pruebas y pasos de proceso tanto como sea posible.
2. Maximizar la productividad del proceso con cortos tiempos de ciclo.
3. Maximizar la calidad del proceso mediante el uso de métodos de prueba que detecten las fallas de manera temprana en el proceso con un alto nivel de cobertura de fallas. Usar la información colectada durante la prueba para mejorar de manera continua el proceso.

Muchas compañías fallan al concretarse únicamente en inspeccionar la calidad del producto para verificar que cumpla con los estándares o especificaciones establecidos, sin realizar esfuerzos que impacten en la manufactura de un producto de calidad desde el primer momento. Usar la inspección como un medio únicamente para localizar y corregir defectos sin identificar la causa raíz del problema no ayuda a la mejora de los procesos.

Sin embargo, la inspección como parte de una estrategia que contemple el uso de la información obtenida vía inspección para conocer de manera pronta las variaciones que existen en el proceso, identificar y corregir los problemas antes de que se incrementen en magnitud o cantidad y evitar que más ensambles defectuosos sean producidos, constituye una buena filosofía que genera beneficios en términos de incremento de la calidad del producto y disminución de costos por conceptos de retrabajo y desperdicio.

La decisión acerca de cual técnica de inspección utilizar debe estar basada tanto en aspectos técnicos como económicos. Los aspectos técnicos requerirán la comparación entre las capacidades de las técnicas de inspección disponibles en el mercado. Una manera simple de hacerlo es realizar mediciones con diferentes equipos de inspección sobre muestras de PCBs que contengan defectos diversos y evaluar los resultados obtenidos en cada equipo [14].

La estrategia de inspección seleccionada debe siempre proveer un beneficio económico, es decir, el costo incurrido en utilizar determinado equipo debe ser menor a los ahorros alcanzados debido a su utilización. Para evaluar en términos económicos cuál estrategia de inspección utilizar puede usarse algún método tradicional como el valor presente neto (VPN) o la tasa interna de rendimiento (TIR), para ello se requerirá conocer tanto el costo que implique el contar con los equipos de inspección en particular y el costo de retrabajo,

desperdicio o por reclamos de garantía esperados bajo cada estrategia. La mejor opción será aquella que genere menores egresos.

### 3.4 INSPECCIÓN EN LAS OPERACIONES DEL PROCESO SMT

La inspección después de impresión de pasta es llevada a cabo de manera muy generalizada, dado que se considera que entre el 60 y 80% de los defectos de soldadura provienen de una impresión pobre de pasta [15]. Un beneficio adicional de la inspección en este punto es que las tarjetas defectuosas pueden ser fácilmente limpiadas y vueltas a procesar con muy bajo costo de retrabajo comparado con el originado por el trabajo de reparación después del proceso de soldadura. Considerando estos hechos, los costos ahorrados por la inspección de pasta son mayores a los obtenidos en otros puntos en el proceso.

La inspección posterior a la colocación puede detectar los defectos originados en esta operación. Además, se pueden detectar condiciones cambiantes del proceso que afecten la integridad, la calidad y el rendimiento del proceso de ensamble. Si una condición cambiante en el proceso puede ser detectada en forma rápida, entonces se pueden tomar acciones correctivas inmediatas para minimizar el efecto sobre el rendimiento. Es por ello que un creciente número de líneas de SMT están usando inspección automatizada en línea posterior a la colocación de componentes para monitorear los procesos de ensamble [16].

La inspección después de la soldadura es típica en todo proceso SMT y se realiza mediante pruebas visuales y eléctricas. La realización de pruebas como el ICT incrementa el rendimiento en reparaciones funcionales y produce ahorros en tiempo y dinero [17].

Se puede afirmar que una estrategia de inspección que quiera contar con altos rendimientos deberá llevar a cabo la tarea de inspección inmediatamente después de cada proceso. En orden de importancia, deben inspeccionarse soldadura, impresión de pasta y ensamble de componentes; sin embargo, una evaluación económica de los equipos utilizados en inspección justificará la tarea de inspección en los puntos de la línea donde se requiera.

### 3.5 EQUIPOS DE PRUEBA E INSPECCIÓN

La meta de las pruebas e inspecciones realizadas en manufactura electrónica es asegurar que los PCBs no tienen defectos estructurales o de componentes, que están ensamblados correctamente y que operan de manera adecuada. La tabla 3.4 da a conocer para cada operación SMT las pruebas que pueden ser aplicadas para identificar las fallas en los productos manufacturados y las alternativas de prueba/inspección. Se describen a continuación las alternativas de equipos de prueba e inspección mencionadas en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Alternativas de equipo de prueba e inspección para cada operación SMT.

Etapa de producción	Tipos de prueba usadas	Alternativas de equipo de prueba / inspección
Impresión de pasta	La inspección posterior a la aplicación de pasta monitorea el volumen, la altura o el ancho de la pasta y su alineación visualmente o vía imagen	Visión humana AOI
Colocación de componentes	La inspección antes del reflujo identifica la exactitud y precisión alcanzada en la colocación de componentes	Visión humana AOI Rayos X
Soldadura	<p>La inspección mediante visión humana, AOI o rayos X después del reflujo examina la calidad de la soldadura desde un punto de vista mecánico.</p> <p>La inspección mediante ICT monitorea la calidad de la soldadura y los componentes midiendo las características eléctricas en el PCB.</p> <p>La prueba funcional del PCB identifica problemas de operación y asegura que el PCB opere con el propósito para el cual fue diseñado</p>	<p>Visión humana</p> <p>AOI</p> <p>Rayos X</p> <p>ICT</p> <p>FT</p>

### 3.5.1 Visión humana

Esta es la técnica de inspección más popular. Una razón de su popularidad es que no se requiere equipo costoso ni complicado en términos técnicos. Los operadores usan ayudas ópticas simples incluso para inspeccionar complejos ensambles. Dichas ayudas pueden ser desde lupas con magnificaciones de 5 aumentos hasta estereoscopios con amplificaciones de 50 aumentos.

La inspección utilizando la visión humana tiene varias desventajas. La primera de ellas es que un producto que cumple con ciertos requerimientos visuales no siempre será confiable en el campo; por ejemplo, una unión soldada puede parecer ideal, pero tener poros justo por debajo de la superficie con un efecto potencial negativo; por otro lado ciertos niveles de residuos de flux pudieran ser considerados como un defecto y sin embargo no tener un impacto en la integridad del producto. Debido a que no existe una manera fácil de advertir estas diferencias, se requiere la aplicación de rígidos estándares de inspección.

La mayor desventaja de este tipo de inspección es la variabilidad inherente de la técnica. La inspección del operador depende de manera total de la interpretación subjetiva de las especificaciones. Por ejemplo un componente que un operador puede interpretar como un 20% desalineado, puede ser reportado por otro como un 30%. La precisión y exactitud de las mediciones pueden variar con la fatiga del operador.

La baja inversión inicial requerida por la inspección visual debe ser pesada contra la baja información técnica que es obtenida. Este tipo de inspección se desempeña mejor cuando los defectos son fácilmente identificables, como por ejemplo después de la impresión de pasta de soldadura donde hay pocas categorías de defectos y los problemas son generalmente obvios. Es también de utilidad después de la colocación de componentes. Sin embargo, la visión humana después de la soldadura que es donde más frecuentemente es utilizada es menos efectiva, puesto que los defectos son generalmente difíciles o imposibles de ver, de esta forma un criterio conservador debe ser aplicado al analizar las uniones.

### 3.5.2 Inspección óptica automática

La inspección óptica automática (AOI) tiene la ventaja de eliminar en cierto grado la subjetividad del operador inherente a la inspección por visión humana. En esta técnica una o más cámaras examinan los PCBs. La imagen es digitalizada y analizada por una computadora, la cual hace la comparación con relación a los límites predefinidos.

El beneficio principal de esta técnica es una más alta repetibilidad inherente y un mayor tiempo de ciclo comparado con los métodos manuales. Dependiendo de la precisión requerida, los equipos comerciales pueden inspeccionar entre 1 y 25 componentes por segundo. Los datos para análisis estadístico posterior pueden ser fácilmente obtenidos de la computadora del equipo.

Existen dos tipos de sistemas AOI: los sistemas bidimensionales (2-D) y los tridimensionales (3-D). En un sistema AOI que proporciona una imagen bidimensional, la información relativa a la dimensión vertical se pierde en el proceso. Los sistemas tridimensionales fueron desarrollados para enfrentar dos limitaciones de las máquinas que proporcionan una imagen en dos dimensiones: la dificultad para analizar imágenes de bajo contraste y la incapacidad de medir alturas.

Un sistema AOI es usado a menudo para inspección de la impresión de la pasta de soldadura y de la colocación de componentes, dos situaciones donde los defectos son visualmente obvios. Sin embargo, la calidad de las uniones soldadas es más difícil de inspeccionar, aunque si bien, la habilidad de los sistemas tridimensionales para determinar los perfiles de las uniones les permiten ser aplicados en esta operación.

La tabla 3.5 presenta una comparación entre varios tipos de sistemas 2-D, 3-D en línea y fuera de línea usados para inspeccionar después de impresión de pasta.



Tabla 3.5. Comparación entre sistemas AOI para inspección de impresión de pasta [18].

	2-D fuera de línea	2-D/3-D incluido en impresión	3-D en línea, con muestreo	3-D en línea, inspección total de la tarjeta
<b>Costo</b>	Bajo	Bajo	Alto	Alto
<b>Velocidad</b>	Manual	Moderada	Ajustable a la velocidad de la línea	Alta velocidad
<b>Preparación</b>	Simple	2 minutos	Menos de 10 minutos	Menos de 1 día
<b>Manejo de datos</b>	Se obtienen algunos datos	Ninguno	Se obtienen suficientes datos para control estadístico de procesos	Se acumulan grandes cantidades de datos para control estadístico de procesos
<b>Entrenamiento</b>	Mínimo	Mínimo	Se recibe entrenamiento para preparación de la máquina	Se recibe entrenamiento para preparación y operación de la máquina
<b>Método</b>	Láser	Varios	Luz estructurada	Barrido con láser
<b>Mejor aplicación</b>	Selección de impresión, bajo volumen	Selección de impresión, bajo volumen	Alto volumen, moderada flexibilidad	Alto volumen, alta flexibilidad

### 3.5.3 Inspección por rayos X

La ventaja de la inspección por rayos X es que tiene la capacidad de examinar la estructura interna de las uniones. Los poros dentro de una unión, por ejemplo, pueden ser fácilmente detectados. La soldadura es bastante opaca a los rayos X, de esta forma incluso los defectos más comunes pueden ser detectados.

En un sistema de rayos X, un rayo es generado en un tubo de rayos X y dirigido hacia una pequeña porción del PCB. El rayo pasa hacia el PCB y su intensidad es disminuida en proporción a la absorción del material. El rayo transmitido incide en una pantalla que se torna fluorescente en proporción a la intensidad de los rayos X; generándose de esta forma una imagen visible del objeto. Esta imagen es vista por un sistema de cámara de video de alta resolución, el cual digitaliza y procesa la información. Después de que cada imagen es procesada, el PCB es movido a la próxima localización previamente programada. Dependiendo del número de imágenes requeridas un PCB típico puede tomar de 30 segundos a 5 minutos en ser inspeccionado [14].

Un equipo de rayos X es utilizado en primera instancia en la inspección posterior a la soldadura. Han sido desarrollados algoritmos para inspeccionar un número de defectos comunes que incluyen componentes desalineados, poros de soldadura, puentes y bolas de soldadura. Actualmente, muchos fabricantes están utilizando sistemas que operan en base a rayos X, con el fin de cubrir las limitaciones de los sistemas convencionales, este tipo de equipos es especialmente recomendable en la inspección de la calidad de la soldadura de los nuevos ICs como BGAs, microBGAs y flip chips.

Para la elección del sistema de rayos X se requiere considerar: el costo inicial, la resolución y magnificación, el procesamiento de imágenes, la integridad del análisis y el grado de automatización deseado [19]. Si se decide utilizar un sistema de rayos X, será necesario elegir entre un sistema manual, uno semiautomatizado y otro completamente automatizado.

Los sistemas manuales generalmente proveen la solución más flexible y económica para inspección por rayos X y se implementan típicamente donde el 100% de inspección no es requerido, dependen de la apreciación particular de cada operador, sin embargo son muy rápidos de implementar. Los sistemas semiautomáticos ofrecen un nivel más alto de sofisticación en la inspección y utilizan un sistema de visión y un posicionamiento programado. Los sistemas completamente automáticos, son más comúnmente usados en alto volumen/baja variedad u otras circunstancias donde se requiere 100% de inspección, utilizan análisis de imágenes, ofrecen información de control estadístico de procesos, inspección de secciones de área o inspecciones tridimensionales sobre PCBs ensamblados por ambos lados.

#### **3.5.4 Prueba en circuito**

Existen dos tipos de prueba en circuito (ICT), la análoga y la digital. El ICT análogo usa amplificadores operacionales para aislar y medir componentes tanto pasivos como activos. El ICT emplea generalmente un arreglo de puntas de prueba para medir los nodos de interés del PCB bajo análisis.

Para el caso de componentes digitales, estos son inspeccionados para verificar que cumplan con las especificaciones establecidas en sus tablas de verdad. Un sistema ICT digital típicamente incluye una librería de tablas de verdad u otra información necesaria para generar los estímulos para un componente dado.

En general para probar componentes digitales mediante ICT se utilizan dos enfoques. El primero de ellos utiliza una serie de contadores que derivan una serie de ondas cuadradas con las cuales excitan a los componentes que serán probados. Los datos de salida son típicamente guardados como una característica del componente que está operando. La otra forma de prueba digital usa pulsos de corta duración diseñados para prevenir el daño de los componentes que son sometidos a prueba. Los estímulos son obtenidos de las tablas de verdad para ese componente específico. La salida es analizada basado en la tabla de verdad para determinar si el componente es bueno o malo.

Los tipos de fallas eléctricas más comunes a ser detectadas mediante ICT son soldaduras abiertas y cortos circuitos, estas fallas pueden ser provocadas por problemas generados en impresión de pasta, colocación de componentes o en la soldadura, pero también por fallas derivadas del diseño, fabricación del PCB y de los SMDs. Debido a que cada componente es puesto a prueba respecto a un conjunto de sus parámetros, la capacidad de detectar fallas en un sistema ICT es alta. En la actualidad el equipo de prueba automatizado alcanza entre el 80 y el 85% de cobertura del total de terminales de las tarjetas. No existen limitaciones técnicas de la prueba para incrementar este rango, sin embargo se procura evitar que esta prueba incremente el tiempo total de ciclo del producto. Conviene señalar también que conforme se incrementa la complejidad de los PCBs, la inspección por ICT es menos efectiva.

### **3.5.5 Prueba funcional**

La prueba funcional (FT) determina si un producto electrónico opera apropiadamente. FT puede ser aplicado a PCBs individuales, si este es el caso, el PCB es conectado al apropiado circuito dentro del producto, donde es sometido a prueba, si el producto trabaja apropiadamente, entonces el PCB es liberado. FT es dividido en dos tipos de pruebas, la estática y la dinámica.

La prueba estática es baja en costo, en este caso, el PCB sometido a prueba es observado en un estado estático. Por otro lado, en la prueba dinámica se estimula al PCB, y la operación del mismo es observada para asegurar que su funcionamiento sea el adecuado.

Cualquiera que sea el tipo de FT utilizado, comprende tres elementos básicos. El primero de ellos es la aplicación del estímulo, seguido de la recolección de las respuestas y finalmente, una evaluación de estas respuestas contra aquellas que se consideran como propias de un PCB que opera adecuadamente. Si alguna falla es detectada, la mayoría de los sistemas de FT tienen una rutina de diagnóstico para identificar y localizar la falla en el PCB.

### **3.6 SELECCIÓN DE LA MUESTRA A INSPECCIONAR**

La forma de realizar la inspección en base al tipo de muestreo seleccionado, es decir, la decisión de cuántos PCBs y componentes inspeccionar estará afectada por la capacidad del equipo de inspección utilizado. Para el caso de la inspección de impresión de pasta se requiere partir del hecho de que existen dos tipos de sistemas de inspección: inspección fuera de línea e inspección en línea. Para el caso de los sistemas que operan fuera de línea, se está limitado a medir justamente unas pocas tarjetas cada hora y es a menudo elegido porque la misma herramienta de medición puede ser usada en varias líneas. En este caso típicamente se inspeccionan ciertas secciones del PCB consideradas críticas.

La mayor parte de los sistemas en línea actuales tienen la capacidad de inspeccionar el 100% de PCBs, pero utilizan muestreo en la inspección de los componentes, el muestreo se justifica para ganar velocidad. De manera general se utilizan dos estrategias: inspección de componentes críticos o inspección por sección. La base para inspeccionar sólo partes de una tarjeta es que los defectos son muy raros en otras áreas.

La otra estrategia es la inspección por sección con lo cual se logra un 100% de inspección a partir de la revisión de varios sitios en diferentes tarjetas hasta que la tarjeta ha sido inspeccionada por completo de una manera aleatoria. Esta estrategia puede ser combinada con inspección del 100% de áreas críticas.

La inspección por sección combinada con la inspección de componentes críticos permitirá obtener una mayor cantidad de información. Sin embargo, si una evaluación económica lo justifica, entonces es posible adquirir un equipo de alta velocidad de barrido por láser que opere en línea y que realice un 100% de inspección de componentes.

En la inspección visual de las uniones soldadas que utiliza un sistema convencional de inspección o bien los sistemas de rayos X manuales, se puede optar por realizar inspección de una muestra de uniones críticas del total de tarjetas soldadas, o por la estrategia de inspección por sección. La figura 3.2 presenta las distintas formas de realizar la inspección en función del tipo de muestreo para las distintas operaciones SMT: impresión de pasta, colocación de componentes y soldadura.

En el uso de los gráficos de control, una vez seleccionada la forma de realizar la inspección, será necesario elegir con qué frecuencia se tomará la muestra y el tamaño de la misma. Ahora bien, desde un punto de vista estadístico, el tamaño de muestra afectará la magnitud de corrida promedio y el error tipo II (ver detalles en las secciones A.2.2, A.2.3 y A.3.9 del anexo A). El número esperado de muestras a tomar antes de que un cambio sea detectado es el tamaño de corrida promedio ( $ARL_1$ ). La probabilidad del error tipo II ( $\beta$ ) de un gráfico de control consiste en concluir que el proceso está en control cuando está realmente fuera de control estadístico.

En general, tamaños de muestras más grandes harán más fácil detectar pequeños cambios en el proceso y como consecuencia el error tipo II y el tamaño de corrida promedio serán pequeños. La situación más deseable para detectar cambios en el proceso es tomar muestras grandes muy frecuentemente, sin embargo, esto no es muchas veces operacional ni económicamente factible.

La mayor parte de las industrias tienden a favorecer el uso de muestras pequeñas con una mayor frecuencia, particularmente en procesos de manufactura como SMT en donde los volúmenes de producción son altos o donde muchos tipos de causas asignables pueden ocurrir. Debe también evitarse una frecuencia de muestreo demasiado elevada que pueda llegar a incrementar los tiempos de ciclo.

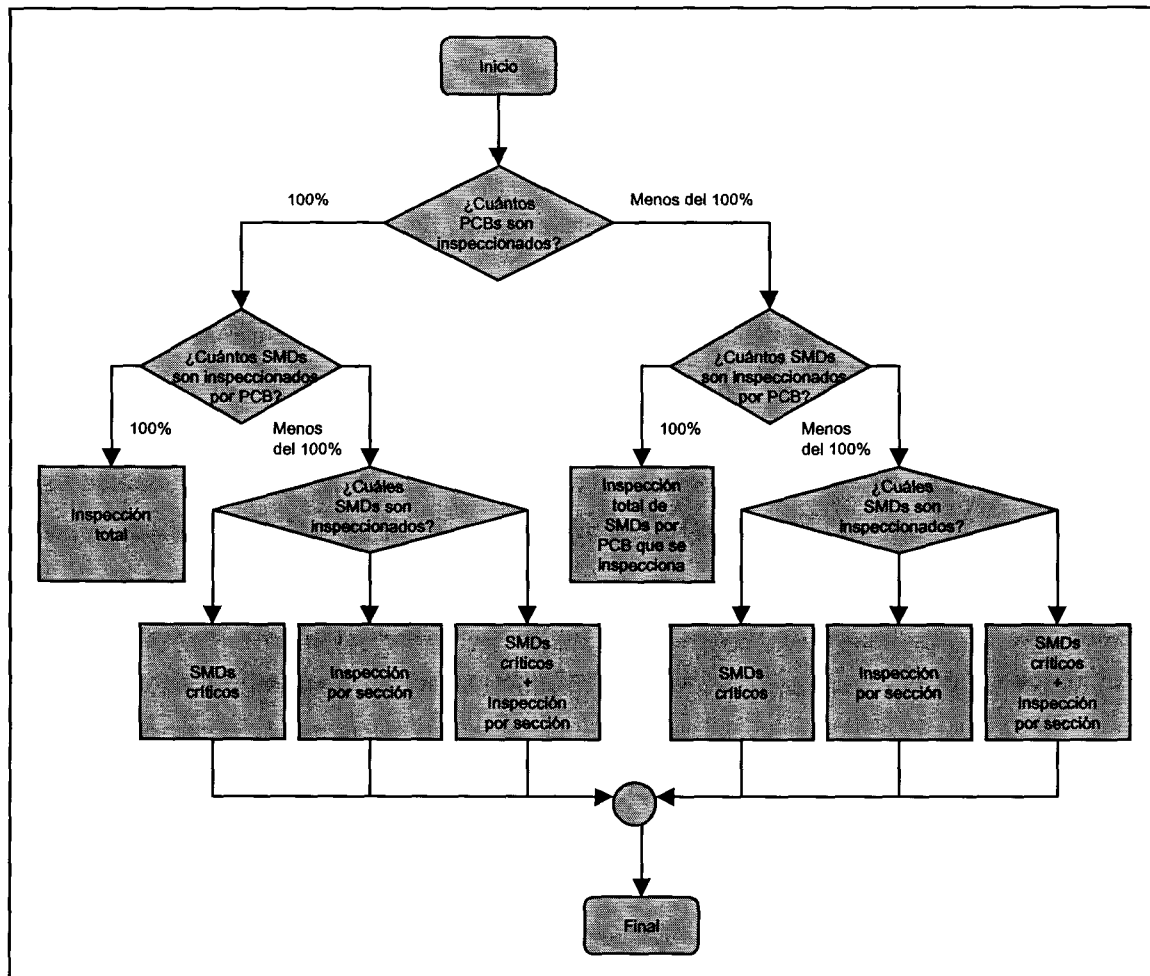


Figura 3.2. Formas de realizar la inspección según el tipo de muestreo.



# 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo da a conocer la situación actual de una muestra de empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas mediante SMT, desde el punto de vista de cómo resuelven los problemas de calidad de sus productos. Tomando en consideración las áreas de oportunidad que se presentan, se propone un sistema para el control y mejora de la calidad de los productos manufacturados mediante SMT basado en la metodología seis sigma. Se presentan los resultados de aplicar el sistema a la operación de impresión de pasta de una línea en una planta de ensamble de tarjetas electrónicas que utiliza SMT y el programa de computadora desarrollado para el control y análisis de la impresión de pasta.

### **4.1 SITUACIÓN ACTUAL DE UNA MUESTRA DE EMPRESAS MEXICANAS DE ENSAMBLE DE TARJETAS ELECTRÓNICAS**

Con el propósito de lograr un mayor acercamiento al estado actual de las empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas en relación con la forma en que resuelven los problemas de calidad de sus productos, se aplicó una encuesta a 5 empresas (4 en Monterrey y 1 en Ciudad Juárez) y a 28 empleados y obreros dentro de las mismas. La encuesta aplicada se muestra en el anexo B. Los resultados así como un análisis de los mismos se presentan en los párrafos de esta sección 4.1.

Los entrevistados eran personas cuya función dentro de sus empresas estaba directamente relacionada con el proceso SMT e incluía: ingenieros de manufactura, ingenieros de calidad, ingenieros de proceso, supervisores de línea, y operarios (ver tabla 4.1).



# 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo da a conocer la situación actual de una muestra de empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas mediante SMT, desde el punto de vista de cómo resuelven los problemas de calidad de sus productos. Tomando en consideración las áreas de oportunidad que se presentan, se propone un sistema para el control y mejora de la calidad de los productos manufacturados mediante SMT basado en la metodología seis sigma. Se presentan los resultados de aplicar el sistema a la operación de impresión de pasta de una línea en una planta de ensamble de tarjetas electrónicas que utiliza SMT y el programa de computadora desarrollado para el control y análisis de la impresión de pasta.

### **4.1 SITUACIÓN ACTUAL DE UNA MUESTRA DE EMPRESAS MEXICANAS DE ENSAMBLE DE TARJETAS ELECTRÓNICAS**

Con el propósito de lograr un mayor acercamiento al estado actual de las empresas mexicanas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas en relación con la forma en que resuelven los problemas de calidad de sus productos, se aplicó una encuesta a 5 empresas (4 en Monterrey y 1 en Ciudad Juárez) y a 28 empleados y obreros dentro de las mismas. La encuesta aplicada se muestra en el anexo B. Los resultados así como un análisis de los mismos se presentan en los párrafos de esta sección 4.1.

Los entrevistados eran personas cuya función dentro de sus empresas estaba directamente relacionada con el proceso SMT e incluía: ingenieros de manufactura, ingenieros de calidad, ingenieros de proceso, supervisores de línea, y operarios (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1. Empresas SMT y empleados encuestados.

Función de encuestados	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Ingenieros de manufactura	1	1	2			4	14.29%
Ingenieros de calidad	1	2	1	1	1	6	21.43%
Ingenieros de proceso	2	3		2		7	25.00%
Supervisores de línea	1	1			1	3	10.71%
Operarios de línea	3	3	2			8	28.57%
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>28</b>	<b>100.00%</b>

Las preguntas de la encuesta fueron desarrolladas a fin de conocer la situación actual en relación con los siguientes temas:

1. Herramientas estadísticas utilizadas para la solución de los problemas de calidad.
2. Metodología seguida en la solución de los problemas de calidad.
3. Indicadores de calidad empleados.
4. Niveles de calidad obtenidos en producción.
5. Conocimiento del producto y del proceso.
6. Formas de realizar la inspección de calidad.

#### 4.1.1 Herramientas estadísticas utilizadas para la solución de los problemas de calidad

Tabla 4.2. Herramientas básicas de calidad empleadas (pregunta 2, sección A).

Herramientas básicas de calidad	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Diagramas de flujo de proceso	*	*			*	3	60.00%
Hojas de verificación	*	*	*	*	*	5	100.00%
Paretos	*	*	*	*	*	5	100.00%
Histogramas						0	0.00%
Gráficos de control		*	*	*	*	4	80.00%
Diagramas de causa-efecto		*				1	20.00%
Diagramas de dispersión						0	0.00%
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>		

Tabla 4.3. Tipos de gráficos de control utilizados (pregunta 3, sección A).

Tipo de gráfico de control	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
n						0	0.00%
np			*		*	2	40.00%
u				*		1	20.00%
X-R		*	*	*		3	60.00%
X-S						0	0.00%
CUSUM						0	0.00%
EWMA						0	0.00%
Para mediciones individuales						0	0.00%
Total	0	1	2	2	1		

Tabla 4.4. Reglas de sensibilidad en el análisis de los gráficos de control (pregunta 5, sección A).

Reglas de sensibilidad del gráfico de control	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
1 o más puntos fuera de los límites de control		*	*	*	*	4	80.00%
2 o 3 puntos consecutivos entre $2\sigma$ y $3\sigma$						0	0.00%
4 o 5 puntos consecutivos más allá de $1\sigma$						0	0.00%
8 puntos consecutivos a un mismo lado de CL		*				1	20.00%
6 puntos consecutivos ascendiendo o descendiendo		*				1	20.00%
No aleatorio comportamiento de los datos						0	0.00%
Otras						0	0.00%
Total	0	3	1	1	1		

Tabla 4.5. Forma de elaborar los gráficos de control (pregunta 4, sección A).

Elaboración de gráficos de control	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Elaboración manual en línea			*	*	*	3	60.00%
Elaboración fuera de la línea		*	*	*		3	60.00%
Sistema computacional en línea				*		1	20.00%

Tabla 4.6 Responsable en la interpretación de los gráficos de control (pregunta 6, sección A).

Toma de decisión en gráfico de control	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Operario en turno			*			1	20.00%
Supervisor					*	1	20.00%
Ingeniero de proceso		*		*		2	40.00%
Ingeniero de calidad						1	20.00%

**Tabla 4.7.** Período de almacenamiento de la información proveniente de los gráficos de control (pregunta 7, sección A).

Tiempo de almacenamiento de información de los gráficos de control	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
No se almacena						0	0.00%
Se almacena menos de 1 día						0	0.00%
Se almacena entre 1 día y 1 semana						0	0.00%
Se almacena por no más de 1 mes			*	*		2	40.00%
Siempre se conserva		*			*	2	40.00%

**Tabla 4.8.** Herramientas estadísticas usadas para la mejora de la calidad (pregunta 11, sección A)

Herramientas usadas para la mejora de la calidad	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
R&R del sistema de medición		*				1	20.00%
FMEA		*				1	20.00%
DOE						0	0.00%
Superficies de respuesta						0	0.00%
Total	0	2	0	0	0		

De la tabla 4.2 se observa que 3 de las 5 empresas encuestadas utilizan no más de 3 de las 7 herramientas básicas de calidad. Las herramientas más utilizadas son hojas de verificación y gráficos de Pareto para defectos; ello indica que en la solución de problemas de calidad, el enfoque es hacia la captura de información para identificar defectos y productos no conformes. Sólo una de las empresas usa habitualmente diagramas de causa-efecto como ayuda para encontrar la causa raíz de los problemas.

Los gráficos de control que más comúnmente se utilizan son los gráficos  $\bar{x}$ -R: si bien, 3 de los 4 encuestados que hacen uso de estos gráficos emplean gráficos de atributos según lo indica la tabla 4.3. La forma de aplicar las reglas de sensibilidad en la identificación del estado fuera de control del proceso también se realiza de la manera tradicional mediante la aplicación de la regla estándar de que 1 punto fuera de los límites de control se interpreta como un estado fuera de control estadístico (ver tabla 4.4). Según se aprecia en la tabla 4.5, la gran mayoría de las empresas que utilizan gráficos de control los elaboran fuera de la línea para análisis posterior del proceso o bien manualmente en la línea, esto impide que puedan tomarse acciones correctivas lo más inmediatamente posible a la ocurrencia de causas asignables de variación.

La tabla 4.6 indica que solo en una de las empresas se delega la interpretación de los gráficos de control al operario. La mitad de las empresas no conserva por un período mayor a un mes la información proveniente de los gráficos de control (ver tabla 4.7); con lo cual puede perderse información valiosa relativa al comportamiento del proceso y a las soluciones derivadas de los problemas de calidad en el pasado.

Finalmente, se observa que sólo una de las empresas encuestadas verifica sus sistemas de medición en términos de su repetibilidad y reproducibilidad y hace uso del análisis de modos y efectos de falla (FMEA); ninguna empresa aplica como parte de los programas de mejora de la calidad herramientas estadísticas como diseño de experimentos (DOE) o metodología de superficies de respuesta (ver tabla 4.8); se halla entonces, que el objetivo para estas empresas consiste entonces en lograr que el producto no salga de las especificaciones establecidas, sin buscar optimización.

#### 4.1.2 Metodología seguida en la solución de los problemas de calidad

**Tabla 4.9.** Metodología usada para solucionar problemas de calidad en el producto (pregunta 7, sección B).

Metodología aplicada en solución de problema de calidad del producto por presencia de defecto	
Empresa	1 Se investigan causas probables en impresión de pasta y perfil del horno. Acciones tomadas por ingeniería
	2 Se investigan causas probables en impresión de pasta, colocación de componentes y perfil del horno. Apoyo en diagramas de causa.efecto y de Pareto. Acciones tomadas por ingeniería
	3 Se investigan causas probables en impresión de pasta, colocación de componentes y perfil del horno. Acciones tomadas por ingeniería
	4 Se investigan causas probables en impresión de pasta, colocación de componentes y perfil del horno. Acciones tomadas por ingeniería
	5 Se investigan causas probables en impresión de pasta. Acciones tomadas por ingeniería

**Tabla 4.10.** Formación profesional del personal involucrado directamente con el proceso SMT (pregunta 6, sección B).

Formación profesional de personal SMT	Empresa					Porcentaje
	1	2	3	4	5	
Ingenieros mecánicos	20.0%	10.0%	15.0%	20.0%	10.0%	15.00%
Ingenieros electrónicos	60.0%	50.0%	50.0%	55.0%	70.0%	57.00%
Ingenieros eléctricos			10.0%	10.0%		10.00%
Ingenieros industriales	20.0%	30.0%	10.0%	5.0%		16.25%
Ingenieros en sistemas computacionales			5.0%	5.0%		5.00%
Ingenieros químicos						0.00%
Otros		10.0%	10.0%	5.0%	30.0%	13.75%



**Tabla 4.11.** Destino de la información generada al solucionar un problema de calidad (pregunta 8, sección A).

Destino de la información de calidad	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Disponible al ingeniero de proceso		*	*	*	*	4	80.00%
Disponible para análisis posterior	*	*	*		*	4	80.00%
No se almacena						0	0.00%
Disponible en línea para el operario						0	0.00%

**Tabla 4.12.** Empresas certificadas por ISO-9000 (pregunta 1, sección A).

	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
¿Se cuenta con certificación ISO-9000?	*	*		*	*	4	80.00%

Las respuestas dadas al caso planteado en la pregunta 7 de la sección B de la encuesta (ver tabla 4.9. para condensado de respuestas) revelan lo siguiente en la solución de problemas de calidad:

1. En cada empresa se encuentran bien definidas las responsabilidades que los empleados y obreros realizarán cuando se presenta una contingencia por la presencia de un defecto o un problema de calidad súbito y repetitivo. Las acciones son llevadas a cabo por ingeniería, el operario sólo cumple con la función de advertir la presencia del problema.
2. Se procura dar solución al problema verificando el funcionamiento correcto de aquellas operaciones, máquinas y materiales que son causa común del problema.
3. Si bien cada empresa cuenta con una metodología definida para la solución de los problemas de calidad, no existe evidencia del empleo de herramientas estadísticas y de calidad para solucionar el problema (con excepción de una de las empresas encuestadas).

Una de las posibles razones por las cuales estas empresas no utilizan de manera consistente herramientas estadísticas y de calidad se debe a la formación profesional del personal involucrado directamente en el proceso SMT, según lo demuestra la tabla 4.10; puede verse que la mayor parte del personal (83.75%) son ingenieros cuyos planes de estudio de profesional generalmente no incluyen el uso de las técnicas de control estadístico de procesos o de diseño de experimentos; solo el 16.25% son ingenieros industriales, en

cuyos planes de estudio es distintiva una formación en el uso de diversas técnicas para resolver problemas de calidad.

El 80% de las empresas contestó que la información que se obtiene luego de solucionar un problema de calidad está a disposición del ingeniero de proceso y se almacena para que los ingenieros de calidad la utilicen en problemas futuros (ver tabla 4.11). Ninguna empresa contestó que la información se almacena para que esté disponible en línea para el operador; esto representa un área de oportunidad para que al contar con un sistema en línea que opere en tiempo real se puedan tomar decisiones en un mínimo de tiempo.

A excepción de una de las empresas, todas afirmaron contar con certificación ISO-9000. El objetivo y campo de aplicación de la norma ISO consiste en especificar los requisitos del sistema de calidad, que deben utilizarse cuando se necesite demostrar la capacidad de un proveedor para diseñar y suministrar productos conformes [20]. Sin embargo, la norma no especifica que el sistema de calidad de la empresa haga uso de ciertas herramientas estadísticas de calidad en particular; esta flexibilidad de la norma, por ejemplo, exige a las empresas del compromiso de usar gráficos de control en línea u otras herramientas enfocadas a la reducción de la variabilidad y a la mejora del proceso.

#### 4.1.3 Indicadores de calidad empleados

Tabla 4.13. Indicadores de calidad utilizados (pregunta 18, sección A).

Indicadores de calidad usados	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
DPU						0	0.00%
% defectuosos					*	1	20.00%
ppm	*	*	*	*		4	80.00%
Yield compuesto	*	*	*	*		4	80.00%

Tabla 4.14. Forma de cálculo de ppm (pregunta 19, sección A).

Denominador de ppm	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Componentes X Unidades	*		*			2	40.00%
(Componentes + Uniones) X Unidades						0	0.00%
Uniones X Unidades				*		1	20.00%
Unidades		*				1	20.00%

La tabla 4.13 indica que el 80% de las empresas utiliza como indicadores de calidad el rendimiento compuesto, y ppm. El amplio uso que se le da al rendimiento se debe a que es un indicador utilizado muy frecuentemente por la administración.

Ninguna de las empresas sigue la recomendación dada por el estándar MIL-STD-2000 para el conteo de defectos (ver tabla 4.14) cuando utilizan DPMO. Se observa también que no existe uniformidad en cuanto a la forma de calcular los ppm.

#### 4.1.4 Niveles de calidad obtenidos en producción

Tabla 4.15. Niveles de capacidad del proceso (pregunta 12, sección A).

Capacidad de proceso	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Cpk menor a 0.5						0	0.00%
Cpk entre 0.5 y 1	*		*			2	40.00%
Cpk entre 1 y 1.5		*				1	20.00%
Cpk superior a 2						0	0.00%

Tabla 4.16. Nivel de ppm (pregunta 1, sección B).

	Empresa				
	1	2	3	4	5
Nivel de ppm	50	1450	250	13	

Tabla 4.17. Porcentaje de retrabajo (pregunta 2, sección B).

	Empresa					Promedio
	1	2	3	4	5	
% Retrabajo	5.00%	3.00%	6.50%	3.00%	4.37%	4.37%



Tabla 4.18. Operaciones en las cuales se realiza retrabajo (pregunta 13, sección A).

Retrabajo en operaciones SMT	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Impresión de pasta						0	0.00%
Colocación de componentes						0	0.00%
Soldadura	*				*	2	40.00%
ICT y FT	*	*	*	*	*	5	100.00%

Tabla 4.19. Porcentaje de desperdicio (pregunta 3, sección B).

	Empresa					Promedio
	1	2	3	4	5	
% Desperdicio	0.35%	0.20%	0.35%	0.25%		0.29%

Tabla 4.20. Costo de retrabajo (pregunta 4, sección B).

	Empresa					Promedio
	1	2	3	4	5	
Costo por PCB retrabajado (dls)	10					10

Tabla 4.21. Costo de paro de línea (pregunta 5, sección B).

	Empresa					Promedio
	1	2	3	4	5	
Costo de 1 min de paro (dls)	700		66	400		388.666667

Tabla 4.22. Tiempo típico para hallar la causa de un defecto de producto (pregunta 9, sección A).

Tiempo para encontrar la causa de defecto	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Entre 1 y 5 minutos						0	0.00%
Entre 5 minutos y 30 minutos	*	*	*	*	*	5	100.00%
Entre 30 minutos y 3 horas						0	0.00%
Entre 3 y 24 horas						0	0.00%

Según la tabla 4.15, 2 de los encuestados no hacen uso del índice de capacidad de proceso; el nivel de  $Cp_k$  predominante para las empresas que lo utilizan se encuentra entre 0.5 y 1; esto representa oportunidades notables de mejora. Los niveles de ppm reportados en la

tabla 4.16 varían entre sí debido principalmente a la diferente forma en que se calculan (revisar tabla 4.14).

La mayor parte de las empresas realizan el retrabajo en las etapas finales del proceso según la tabla 4.18. El promedio de retrabajo reportado fue del 4.37% y el nivel de desperdicio fue del 0.29% según las tablas 4.17 y 4.19 respectivamente. Para ilustrar el impacto en costos de estos dos aspectos derivados de la mala calidad del producto, supongamos que en una de las 12 líneas SMT de cierta empresa a la que llamaremos empresa SMT X se producen 640,000 PCBs anualmente, se tendrán por lo tanto, 27,968 y 1,856 PCBs retrabajados y desperdiciados respectivamente considerando los niveles de las tablas 4.17 y 4.19. Si se toma, de acuerdo con la tabla 4.20 que el costo por PCB retrabajado es de 10 dls., para el caso hipotético anterior se incurre en un costo anual por retrabajo de 279,680 dls. Supongamos además, que el PCB en consideración tenga un valor al final del proceso de 150 dls., entonces las pérdidas anuales por concepto de desperdicio serán de 278,400 dls.

Para el caso anterior expuesto se puede establecer que en términos económicos pequeñas fracciones porcentuales de retrabajo o desperdicio generarán un costo, según se presenta en la tabla 4.23. Por lo tanto, las acciones que se emprendan para mejorar la calidad del producto y que en consecuencia disminuyan el retrabajo y el desperdicio influirán de manera inmediata y positiva en la reducción de costos.

**Tabla 4.23.** Costos anuales de fracciones porcentuales de retrabajo y desperdicio para una línea de producción de la empresa SMT X.

Costo anual de 0.1% de retrabajo	Costo anual de 0.01% de desperdicio
6,385 dls.	9,600 dls.

Como un efecto adicional indeseable del retrabajo debe considerarse también que cuando un PCB ha sido retrabajado, el calor agregado aumenta la probabilidad de falla en campo de la unión de soldadura [2] y por lo tanto los costos de calidad se ven incrementados.

El rango de tiempo para resolver un problema de calidad fue entre 5 y 30 minutos (ver tabla 4.22). La pérdida promedio ocurrida en producción por permanecer un minuto sin operar la línea es de 388.67 dls. (ver tabla 4.21). Por lo tanto, si se aplica de manera oportuna la prevención de defectos, se contribuye también a un ahorro por reducción del tiempo de paro de línea cuando se presente un problema de calidad en el producto.

#### 4.1.5 Conocimiento del producto y del proceso

**Tabla 4.24.** Conocimiento de las causas que originan problemas en el producto (preguntas 14-17, sección A).

Preguntas de producto y proceso % de respuestas correctas de ingenieros	Empresa					Porcentaje
	1	2	3	4	5	
Pregunta 14A	25.0%	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%	11.67%
Pregunta 15A	100.0%	66.7%	100.0%	66.7%	0.0%	66.67%
Pregunta 16A	25.0%	50.0%	66.7%	0.0%	100.0%	48.33%
Pregunta 17A	50.0%	33.3%	33.3%	0.0%	100.0%	43.33%
Promedio	50.0%	45.8%	50.0%	16.7%	50.0%	42.50%

Las preguntas realizadas a los ingenieros involucrados en SMT con relación a este tema tenían como propósito averiguar el conocimiento del producto y del proceso con que se cuenta para identificar las causas raíces cuando se presentan ciertos defectos característicos del proceso. El porcentaje promedio obtenido de respuestas correctas fue del 42.5%; esto significa que se requiere un mayor conocimiento de las causas raíces de los problemas de calidad que afectan el producto, a fin de dar una solución efectiva a los mismos.

#### 4.1.6 Formas de realizar la inspección de calidad

**Tabla 4.25.** Recursos utilizados en la inspección de la impresión de pasta (pregunta 20, sección A).

Medio de inspección en impresión de pasta	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Equipo 2D en línea		*				1	20.00%
Equipo 2D fuera de línea			*			1	20.00%
Equipo 3D en línea con muestreo						0	0.00%
Equipo 3D en línea						0	0.00%
Equipo para altura	*		*		*	3	60.00%
Inspección visual humana	*	*	*	*		4	80.00%
Otros						0	0.00%

**Tabla 4.26.** Recursos utilizados en la inspección de la colocación de componentes (pregunta 21, sección A).

Medio de inspección en colocación de componentes	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Visual automático en línea	*			*	*	3	60.00%
Visual automático fuera de línea			*			1	20.00%
Rayos X	*		*			2	40.00%
Inspección visual humana	*	*	*	*	*	5	100.00%
Microscopio		*	*			2	40.00%
Plantilla de inspección	*	*	*			3	60.00%
Otros						0	0.00%

**Tabla 4.27.** Recursos utilizados en la inspección de la soldadura (pregunta 22, sección A).

Medio de inspección en soldadura	Empresa					Total	Porcentaje
	1	2	3	4	5		
Visual automático en línea						0	0.00%
Visual automático fuera de línea						0	0.00%
Rayos X	*		*	*		3	60.00%
Equipo para ICT	*		*	*	*	4	80.00%
Equipo para FT	*	*	*	*		4	80.00%
Inspección visual humana	*	*		*	*	4	80.00%
Microscopio	*	*		*		3	60.00%
Plantilla de inspección	*	*	*	*		4	80.00%
Otros						0	0.00%

El análisis de las tablas 4.25, 4.26 y 4.27, muestra que en estas manufactureras mexicanas existe diversidad en los equipos utilizados para inspección de la calidad de la soldadura. Sin embargo, el porcentaje de equipo visual automático utilizado tanto en impresión de pasta como en la soldadura es bajo y en general se sigue dependiendo de la inspección visual humana a lo largo de todo el proceso, con todas las limitaciones que ello representa según lo comentado en la sección 3.5.1.

Al comparar la cantidad de recursos de inspección utilizados en cada una de las 3 operaciones SMT se puede inferir que las empresas de manufactura electrónica en México han enfocado sus esfuerzos para inspeccionar la calidad al final del proceso.

#### 4.1.7 Diagnóstico general

A partir del trabajo de campo realizado es posible establecer los siguientes aspectos generales relacionados con el control y mejora de la calidad de los productos en las empresas encuestadas:

1. Enfoque hacia la identificación de defectos y productos no conformes, con poco énfasis desplegado en atender la causa raíz del problema.
2. Se carece de la cultura de uso intensivo de las herramientas básicas de calidad para solucionar los problemas del producto.
3. Poco conocimiento de las causas raíces que originan los problemas de calidad en los productos.
4. Gráficos de control elaborados fuera de la línea para análisis o manualmente en línea, lo cual impide que puedan tomarse acciones correctivas lo más inmediatamente posible a la ocurrencia de causas asignables de variación.
5. Falta de uso de técnicas estadísticas como diseño de experimentos o superficies de respuesta que contribuyan a la búsqueda de la mejora de la calidad del producto.
6. Uso de indicadores de calidad orientados a la administración y diversidad en la forma de obtener los ppm.
7. Las capacidades de los procesos son bajas, y la cantidad de retrabajo y desperdicio altas.

#### 4.2 SISTEMA PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD EN SMT

El estudio realizado sobre la operación del proceso SMT en el grupo de empresas encuestado refuerza la premisa sobre la necesidad del desarrollo y la aplicación de una metodología que integre el uso de herramientas estadísticas y de calidad para la mejora continua del proceso SMT y que a su vez permita la reducción de los costos derivados de la mala calidad del producto. Los problemas de calidad en el producto que ocurren en el proceso SMT se ubican dentro de la categoría de problemas de conformancia. Un problema de conformancia es aquel que se presenta cuando las salidas de un sistema estructurado

#### 4.1.7 Diagnóstico general

A partir del trabajo de campo realizado es posible establecer los siguientes aspectos generales relacionados con el control y mejora de la calidad de los productos en las empresas encuestadas:

1. Enfoque hacia la identificación de defectos y productos no conformes, con poco énfasis desplegado en atender la causa raíz del problema.
2. Se carece de la cultura de uso intensivo de las herramientas básicas de calidad para solucionar los problemas del producto.
3. Poco conocimiento de las causas raíces que originan los problemas de calidad en los productos.
4. Gráficos de control elaborados fuera de la línea para análisis o manualmente en línea, lo cual impide que puedan tomarse acciones correctivas lo más inmediatamente posible a la ocurrencia de causas asignables de variación.
5. Falta de uso de técnicas estadísticas como diseño de experimentos o superficies de respuesta que contribuyan a la búsqueda de la mejora de la calidad del producto.
6. Uso de indicadores de calidad orientados a la administración y diversidad en la forma de obtener los ppm.
7. Las capacidades de los procesos son bajas, y la cantidad de retrabajo y desperdicio altas.

#### 4.2 SISTEMA PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD EN SMT

El estudio realizado sobre la operación del proceso SMT en el grupo de empresas encuestado refuerza la premisa sobre la necesidad del desarrollo y la aplicación de una metodología que integre el uso de herramientas estadísticas y de calidad para la mejora continua del proceso SMT y que a su vez permita la reducción de los costos derivados de la mala calidad del producto. Los problemas de calidad en el producto que ocurren en el proceso SMT se ubican dentro de la categoría de problemas de conformancia. Un problema de conformancia es aquel que se presenta cuando las salidas de un sistema estructurado

con entradas, procesos y salidas estandarizadas no satisfacen las necesidades de los clientes [21].

Existen diversas metodologías ya establecidas para la solución de problemas de calidad. Una de las filosofías que más ha cobrado auge desde su aplicación inicial en Motorola en la década de los 80's es el programa seis sigma, definido como un programa que procura la eliminación de defectos, de cada producto, proceso y transacción.

La mejora pretendida por seis sigma implica la selección de procesos con potencial para mejorar su desempeño, identificando y entrenando al personal para obtener resultados en los negocios. Los proyectos a someterse al programa siguen un disciplinado proceso de 4 etapas: Medir, analizar, mejorar y controlar. Los elementos principales en la implantación de seis sigma son: *Fuerte liderazgo, enfoque inicial sobre las operaciones, medición clara del desempeño, selección agresiva del proyecto, selección y entrenamiento de las personas correctas* [22].

El modelo para el control y mejora de calidad utilizado como parte del sistema desarrollado en esta tesis, considera varias de las herramientas estadísticas de las cuales se hace uso en un programa seis sigma. La tabla 4.28 da a conocer las acciones recomendadas y la figura 4.1 presenta el diagrama de flujo del sistema propuesto.

La mayoría de las etapas del sistema implican, de manera rutinaria para su evaluación y análisis, la adquisición de datos provenientes de la inspección de la calidad del producto; sin embargo, ciertas actividades, que en el presente trabajo se designan como etapas de conocimiento del proceso (ver etapas señaladas en la figura 4.1), necesitan ser definidas solamente al inicio de la aplicación del sistema, aunque su uso puede ser también rutinario como en el caso de los diagramas de pescado que pueden ser requeridos cuando un estado fuera de control estadístico existe.

Como su nombre lo indica, las etapas de conocimiento del proceso utilizan la base de conocimiento técnico de SMT. Estas etapas de conocimiento del proceso requieren que se definan técnicamente el proceso SMT, los productos fabricados, así como las relaciones entre las distintas características críticas de calidad del producto, sus defectos y las

variables críticas de entrada al proceso que faciliten el reconocimiento de las causas raíces que provocan los defectos.

La realidad de la industria de ensamble de tarjetas electrónicas, en acorde con el nivel del 42.5% de respuestas contestadas correctamente (tabla 4.24), muestra que, en muchas ocasiones, no se cuenta con los suficientes fundamentos técnicos que conlleven a la solución efectiva de las causas raíces que provocan los defectos. Se requiere agregar también, que dado el elevado crecimiento en la demanda de los productos fabricados por esta tecnología, el interés de producción en planta se centra muchas veces en cumplir con las demandas del mercado y se dispone de poco tiempo para un análisis profundo de los problemas de calidad.

En el resto de esta sección 4.2 se presentan los resultados del desarrollo de la base de conocimiento técnico de SMT que se requiere en las etapas de conocimiento del proceso. Estas etapas se encuentran señaladas en el diagrama de la figura 4.1 y son:

1. Crear diagrama de flujo del proceso
2. Identificar tipos de defectos
3. Identificar CTQs
4. Establecer relación entre CTQs y defectos
5. Elaborar diagramas de pescado de defectos
6. Elaborar matriz de causa-efecto que relacione KPIVs con CTQs
7. Preparar FMEA

La descripción y el procedimiento de aplicación de todas las herramientas estadísticas y de calidad que en conjunto conforman el sistema se presentan en el anexo A.

En resumen, el desarrollo del sistema para el control y mejora de la calidad parte de un planteamiento del modelo, lo cual fue una adecuación de la metodología seis sigma y se enfoca en la generación de la base de conocimiento técnico del proceso SMT requerida en las etapas de conocimiento del proceso que forman parte del sistema para el control y mejora de la calidad.



Tabla 4.28. Pasos y actividades del sistema para el control y mejora de la calidad en SMT [23].

Actividad	Participantes	Fuente de Información
<p>Crear un diagrama de flujo del proceso.</p> <p>Identificar tipos de defectos del producto.</p> <p>Identificar características críticas de calidad (CTQs).</p> <p>Establecer relación entre las características críticas de calidad y los defectos.</p> <p>Elaborar diagramas de pescado para identificar las variables que pueden generar los defectos.</p>	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Conocimiento del producto y del proceso
Aplicar gráficos de control a las CTQs y/o defectos críticos	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Recolección de datos
Realizar un análisis del sistema de medición.	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Recolección de datos
<p>Determinar nivel de DPMO y/o capacidad del proceso.</p> <p>Realizar gráficos de Pareto de defectos.</p>	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Recolección de datos
Preparar un FMEA.	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Conocimiento del producto y del proceso
Elaborar una matriz de causa-efecto que relacione las variables críticas de entrada (KPIVs) con los defectos.	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Conocimiento del producto y del proceso
<p>Realizar diseño de experimentos.</p> <p>Considerar aplicación de métodos de superficies de respuesta.</p>	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Experimentación
Determinar niveles óptimos y tolerancias operativas para KPIVs a partir de DOE y superficies de respuesta.	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Análisis de datos
<p>Revisar y aplicar nuevo plan de control:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar gráficos de control para KPIVs significativas.</li> <li>• Continuar aplicando gráficos de control a las CTQs.</li> </ul>	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Análisis de datos, conocimiento del producto y proceso
Obtener nueva capacidad del proceso.	Equipo de involucrados en el proceso SMT	Análisis de datos

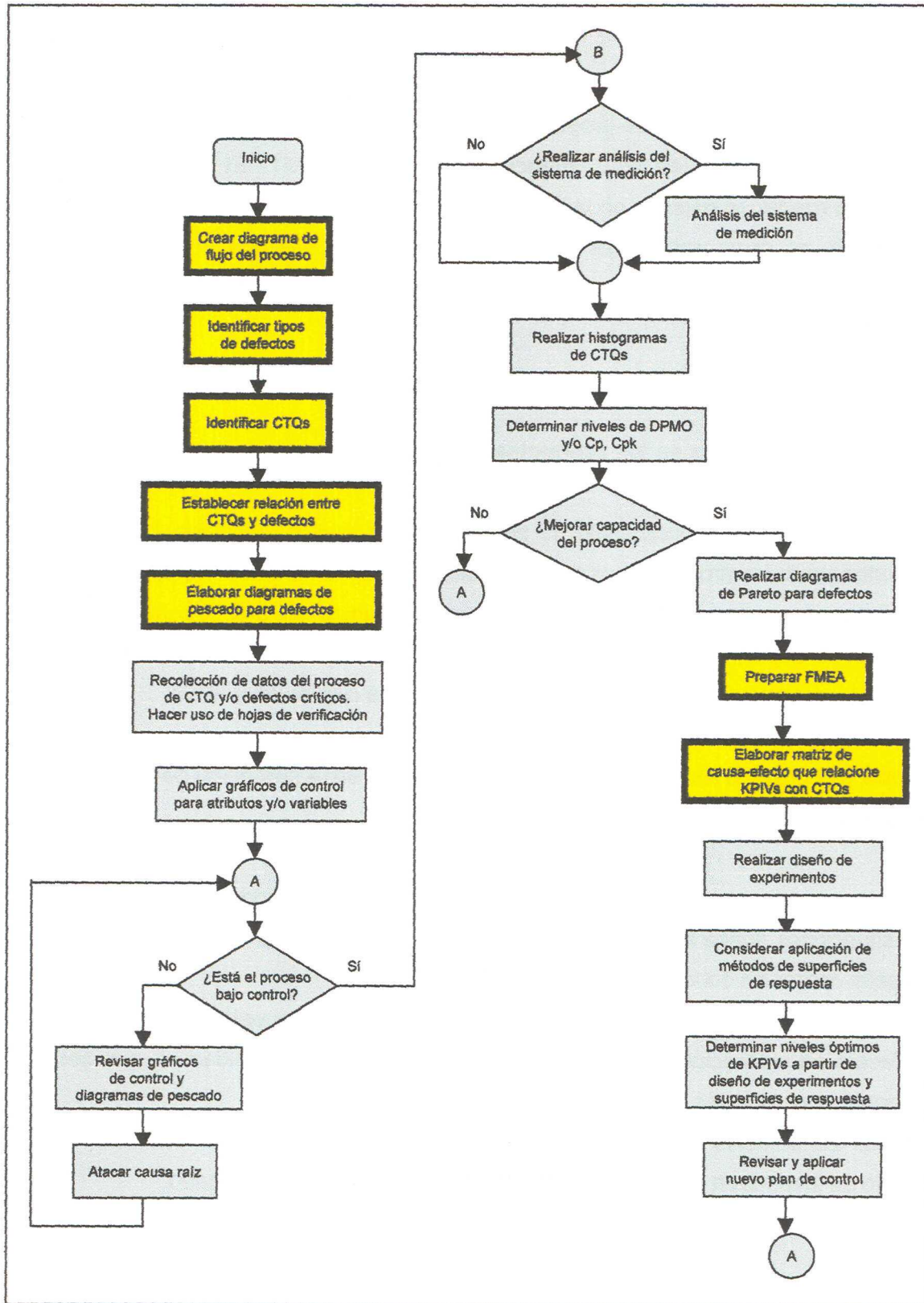


Figura 4.1. Diagrama de flujo del sistema para el control y mejora de la calidad en SMT [23].

#### 4.2.1 Diagrama de flujo del proceso

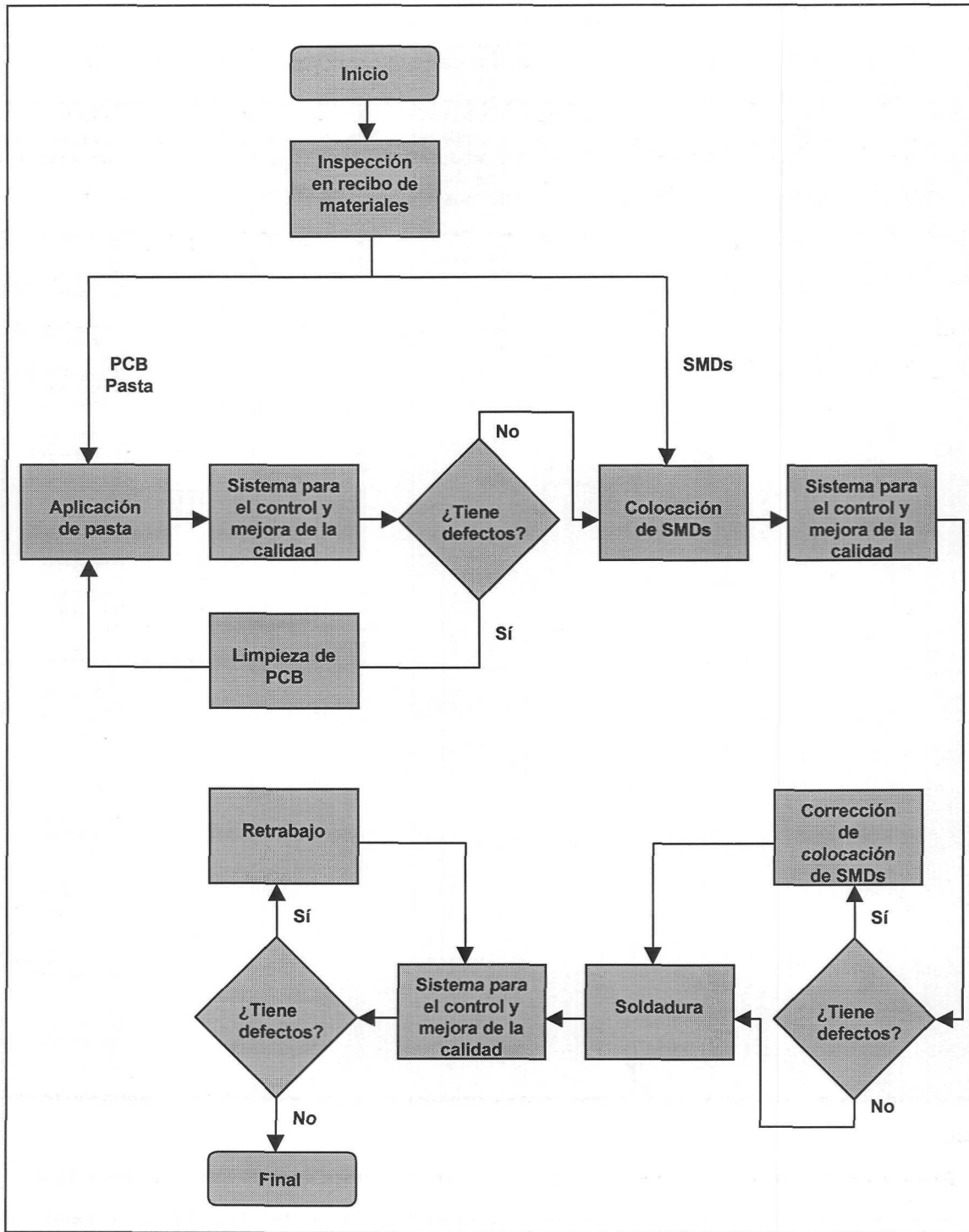
Como se discutió en el marco teórico es muy importante controlar y mejorar la calidad del proceso SMT desde su inicio, se propone la aplicación del sistema para el control y mejora de la calidad en cada una de las 3 operaciones del proceso SMT. El diagrama de flujo de proceso que resulta se muestra en la figura 4.2. La información originada por la inspección de los PCBs en cada una de las operaciones SMT será utilizada por el sistema para controlar la calidad y proponer en su momento mejoras en el proceso que incrementen la calidad del producto final.

#### 4.2.2 Tipos de defectos en los productos SMT

En cada operación del proceso SMT se originan ciertos tipos de defectos, los cuales a su vez pueden producir otros defectos en las siguientes etapas. En la tabla 4.29 se presenta esta información; debe notarse también que en la columna de defectos que pueden ser detectados se especifica el medio de inspección utilizado ya sea visual o eléctrico. En el anexo D se presenta una breve definición de los defectos citados en la tabla.

Esta tabla es de ayuda en la toma de decisiones iniciales en la aplicación del modelo por las siguientes razones:

1. Agrupa los defectos dependiendo de la operación del proceso donde se originan, lo cual en situaciones donde la soldadura presente mala calidad ayuda a enfocar la atención en aquella operación donde el defecto se origina.
2. Establece una relación causa-efecto entre los defectos, puesto que existen ciertos defectos en colocación de componentes y en el proceso de soldadura que tienen su origen en operaciones previas.
3. Señala los defectos que pueden ser detectados en cada operación SMT, así como el medio de inspección genérico (visual o eléctrico) que puede ser utilizado.



**Figura 4.2.** Diagrama de flujo del proceso SMT con la integración del sistema para el control y mejora de la calidad.

Tabla 4.29. Defectos en productos manufacturados por SMT.

Impresión de pasta			Colocación de componentes			Soldadura	
Defectos originados	Defectos que pueden producir en los siguientes procesos	Defectos que pueden ser detectados	Defectos originados	Defectos que pueden producir en el siguiente proceso	Defectos que pueden ser detectados	Defectos originados	Defectos que pueden ser detectados
Puente	- Puente (soldadura)	Puente (V)	Componente movido	- Puente (soldadura)	Componente movido (V)	Puente	Puente (V) (E-corto circuito)
						No humidificación	No humidificación (V) (E-circuito abierto)
Exceso	- Componente levantado (soldadura) - Puente (soldadura)	Exceso (V)	Faltante de componente		Faltante de componente (V)	Porosidad	Porosidad (V) (E-circuito abierto)
						Componente levantado	Componente levantado (V) (E-circuito abierto)
Insuficiencia	- Componente levantado (soldadura) - Componente movido (colocación de componentes) - Unión fracturada (soldadura)	Insuficiencia (V)	Polaridad invertida de componente		Polaridad invertida de componente (V)	Unión fracturada	Unión fracturada (V) (E-circuito abierto)
						Retracción de soldadura	Retracción de soldadura (V) (E-circuito abierto)
						Bolas de soldadura	Bolas de soldadura (V) (E-corto circuito)
Desalineamiento	- Componente movido (colocación de componentes)	Desalineamiento (V)	Componente equivocado		Componente equivocado (V)	Unión opaca	Unión opaca (V)
						Unión granulosa	Unión granulosa (V)
Pico	- Puente (soldadura)	Pico (V)				Soldadura fría	Soldadura fría (V) (E-circuito abierto)
							Exceso (V) (E-corto circuito)
							Insuficiencia (V) (E-circuito abierto)
							Componente movido (V) (E-corto circuito)
							Faltante de componente (V) (E)
							Polaridad invertida de componente (V) (E)
							Componente equivocado (V) (E)

## Notas:

1. En las columnas de defectos que pueden producir en los siguientes procesos, se anota entre paréntesis el lugar del proceso donde puede ser producido.
2. En las columnas de defectos que pueden ser detectados se escribe entre paréntesis la letra inicial del método de inspección a utilizar, V indica un método visual y E indica un método de prueba eléctrica. En algunos casos se indica E\* lo cual significa que no siempre el defecto produce una falla eléctrica. En relación con la prueba eléctrica, para varios de los defectos se anota el tipo de falla producida (corto circuito o circuito abierto).

### 4.2.3 CTQs y defectos

Uno de los primeros puntos a considerar según el modelo propuesto es la identificación de las características críticas de calidad (CTQs) del producto. En cada una de las operaciones del proceso de manufactura SMT, las CTQs están relacionadas con uno o más tipos de defectos. La tabla 4.30 es una lista de los CTQs y los defectos que ocurren cuando no se cumplen las especificaciones establecidas para cada uno de ellas. En esta tabla también se establece la diferencia entre los CTQs dependiendo de su naturaleza, es decir, si son variables o atributos.

Esta tabla puede ser usada con uno más de los siguientes fines:

1. Conocer las CTQs que deben ser controladas y mejoradas en cada operación del proceso SMT.
2. Seleccionar el tipo de gráfico de control a utilizar ya sea de atributos o variables en conjunción con la guía del anexo A, presentada en la figura A.1.
3. Señalar dependiendo del tipo de defecto de mayor RPN en el análisis de modos y efectos, cuáles CTQs deben recibir atención cuando se desee una mejora en el proceso.

### 4.2.4 Diagramas de pescado de defectos

Cuando se identifican los defectos en cada proceso SMT se deben analizar las causas potenciales de este efecto indeseable. El diagrama de causa y efecto, también llamado gráfico de pescado, es una herramienta formal, frecuentemente usada en la búsqueda de causas potenciales. En la figura 4.3 se muestra el diagrama de pescado de un tipo de defecto; de manera completa, en el anexo E se muestran los diagramas de causa-efecto de todos los defectos citados en la tabla 4.29. En cada uno de estos diagramas se establecen como causas mayores las 6Ms: Materiales, máquinas, mano de obra, métodos, medición y medio ambiente.



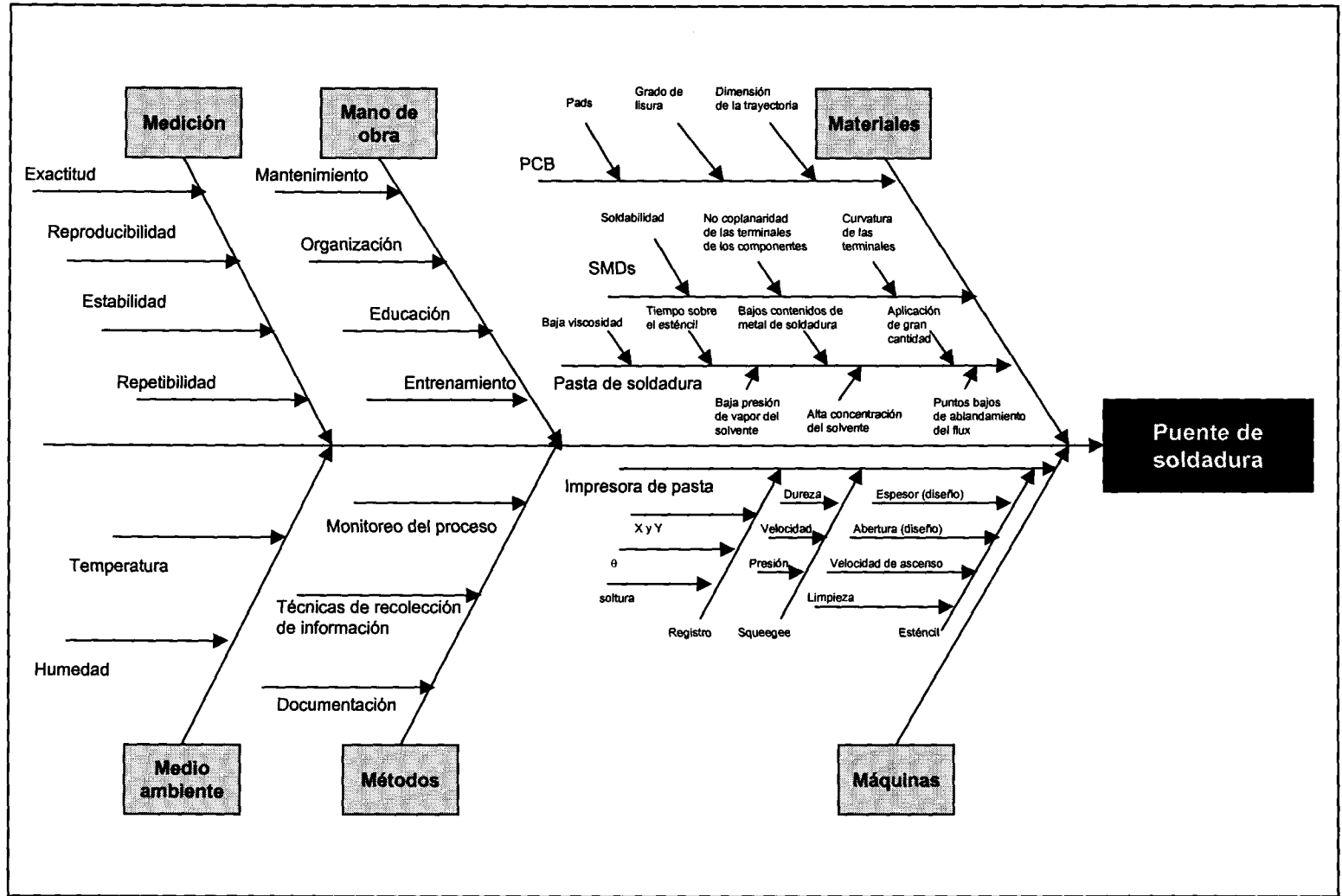
Tabla 4.30. CTQs y defectos relacionados.

Impresión de pasta			Colocación de componentes			Soldadura		
CTQ	Naturaleza de CTQ	Defecto relacionado	CTQ	Naturaleza de CTQ	Defecto relacionado	CTQ	Naturaleza de CTQ	Defecto relacionado
Altura de la pasta	Variable	- Puente - Exceso - Insuficiencia - Pico	% de desalineamiento respecto al largo o el ancho del pad	Variable	- Componente movido	Ángulo de contacto	Variable	- No humidificación
Área de la pasta	Variable	- Puente - Exceso - Insuficiencia	Colocación del componente en los pads apropiados	Atributo	- Faltante de componente - Componente equivocado	Ausencia o presencia de puente	Atributo	- Puente
Volumen de la pasta	Variable	- Puente - Exceso - Insuficiencia	Polaridad del componente	Atributo	- Polaridad invertida de componente	Ausencia o presencia de porosidad	Atributo	- Porosidad
% de ancho de pad de separación de pads consecutivos	Variable	- Exceso - Puente				Ausencia o presencia de componente levantado	Atributo	- Componente levantado
% del área del pad cubierta por pasta	Variable	- Insuficiencia				Ausencia o presencia de unión fracturada	Atributo	- Unión fracturada
% de desalineamiento respecto al largo o ancho del pad	Variable	- Desalineamiento				Ausencia o presencia de soldadura retraída	Atributo	- Retracción de soldadura
						Ausencia o presencia de bolas de soldadura	Atributo	- Bolas de soldadura
						Ausencia o presencia de unión opaca	Atributo	- Unión opaca
						Ausencia o presencia de unión granulosa	Atributo	- Unión granulosa
						Ausencia o presencia de soldadura fría	Atributo	- Soldadura fría
						Parámetro eléctrico (voltaje, resistencia o corriente)	Atributo	- Puente - No humidificación - Componente levantado - Unión fracturada

La importancia de estos diagramas causa-efecto radica en lo siguiente:

1. Se realizó un diagrama para cada defecto (de acuerdo con la tabla 4.29) que puede presentarse en SMT, por lo tanto se trata de un conjunto completo de diagramas de causa-efecto.
2. Fueron desarrollados mediante consulta bibliográfica e intercambio de ideas con los ingenieros de proceso de la planta en la que se realizó el caso de aplicación.
3. Debido a que las causas posibles identificadas son de carácter todavía general, pueden ser utilizados como guías en la identificación de causas potenciales de falla en cualquier proceso SMT.

Figura 4.3. Diagrama de causa-efecto para el defecto de puente de soldadura.





#### 4.2.5 FMEA de proceso

El análisis de modos y efectos de falla del proceso permitirá de una manera sistemática establecer prioridades en el orden de importancia de los defectos. Las acciones de mejora estarán enfocadas en primer lugar a aquellos defectos de mayor RPN y a las CTQs que estén relacionadas con ellos. En el anexo F se muestran los FMEAs para las tres operaciones del proceso SMT. La información de este anexo si bien puede ser aplicada de manera general a cualquier industria que utilice el proceso SMT, debe ser particularizada al proceso y producto de cada negocio. En los FMEAs que se dan a conocer está incluido parte del conocimiento de los ingenieros de SMT, así como las condiciones de operación de la planta en la que se llevó al cabo el caso de aplicación.

#### 4.2.6 Matriz de causa-efecto

La matriz de causa-efecto es una herramienta que ayuda a priorizar la importancia de las variables críticas de entrada al proceso (KPIVs). Al establecer prioridades en equipo, se puede conocer si existe una relación potencial causa-efecto entre las KPIVs y las características críticas de calidad del producto (CTQs). Las KPIVs son tomadas de entre las causas identificadas en los diagramas de causa-efecto previamente diseñados. Las matrices de causa-efecto se presentan en la figura 4.4, 4.5 y 4.6.

De manera particular las matrices de causa-efecto presentadas son de interés por lo siguiente:

1. Los pesos asignados a las CTQs de la tabla 4.28 establecen un orden típico de jerarquía entre ellas, según la importancia que se da generalmente a cada CTQ en este proceso. En la práctica deberán tener un mayor peso aquellas CTQs que estén relacionadas con los defectos de mayor valor RPN según el resultado del FMEA.
2. Establecen la relación entre las KPIVs tomadas de los diagramas de causa-efecto del anexo E y las CTQs.
3. Son una guía para concentrar esfuerzos en las KPIVs de mayor prioridad.
4. Los KPIVs de mayor prioridad deberán ser considerados como los primeros factores a involucrar en las etapas posteriores de diseño de experimentos.

5. Fueron desarrolladas mediante consulta bibliográfica e intercambio de ideas con los ingenieros de proceso de la planta del caso de aplicación.

		CTQ						Resultados	Porcentaje
		A	B	C	D	E	F		
		8	7	10	5	4	4		
Viscosidad de la pasta	1	8	8	2	7	7	4	219	6.80%
Dureza del squeegee	2	6	5	2	6	6		157	4.88%
Velocidad de descenso de la mesa	3	7	5	6	7	5		206	6.40%
Tiempo de espera para bajar la mesa	4	4	3	3	3	3		110	3.42%
Distancia del squeegee al estencil	5	4	3	3	3	3		110	3.42%
Limpieza del estencil	6	6	6	6	6	3		192	5.96%
Velocidad del squeegee	7	10	8	10	9	8		313	9.72%
Presión del squeegee	8	10	8	10	9	8		313	9.72%
Fuerza de sujeción del PCB	9	6	5	3	3	3		140	4.35%
KPIV Distancia de barrido del squeegee	10	5	4	5	3	3		145	4.50%
Distancia de descenso de la mesa	11	5	4	5	3	3		145	4.50%
Distancia del PCB al estencil	12	4	4	5	3	3		137	4.25%
Temperatura	13	7	6	7	6	6	2	230	7.14%
Humedad	14	8	7	8	7	7	1	260	8.07%
X	15						10	40	1.24%
Y	16						10	40	1.24%
$\theta$	17						8	32	0.99%
Espesor del estencil	18	10		8				160	4.97%
Aberturas del estencil	19		10	8	9	9	10	271	8.42%

**Clave CTQ**

A Altura de la pasta  
 B Área de la pasta  
 C Volumen de la pasta  
 D % de ancho de pad de separación de pads consecutivos  
 E % del área del pad cubierta por pasta  
 F % de desalineamiento respecto al largo o ancho del pad

Figura 4.4. Matriz de causa-efecto para impresión de pasta.

		CTQ			Resultados	Porcentaje
		A	B	C		
		7	10	8		
KPIV	Boquillas tapadas	1	5		35	6.26%
	Alimentador desalineado	2	9		63	11.27%
	Malos datos en librería	3	8	9	128	22.90%
	Secuencia de levantado	4	7		49	8.77%
	Mala programación de alimentador	5		9	90	16.10%
	Coordenadas equivocadas	6		8	64	11.45%
	Confusión de componente	7		4	40	7.16%
	Falla humana	8		9	90	16.10%

**Clave CTQ**

A % de desalineamiento respecto al largo o el ancho del pad  
 B Colocación de componentes en los pads que le corresponden  
 C Polaridad

Figura 4.5. Matriz de causa-efecto para colocación de componentes.

		CTQ											Resultados	Porcentaje
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
		8	8	7	8	8	4	4	2	2	1	10		
KPIV	Soldabilidad de terminales y pads	1	10				9					9	206	22.39%
	Tiempo y temperatura de precalentamiento	2	8				7	6		4	5		170	18.48%
	Cantidad de flux	3		8								2	76	8.26%
	Cantidad de evaporación del solvente	4		7								2	69	7.50%
	Perfil de reflujo	5			6		5	8	7		7	6	181	19.67%
	Composición química de la soldadura	6							9			2	38	4.13%
	Tiempo de enfriamiento	7							5	5		4	60	6.52%
	Disturbios de la soldadura en reflujo y enfriamiento	8								3		2	26	2.83%
	Movimiento de las terminales del SMD	9					8					3	94	10.22%

**Clave CTQ**

A Ángulo de contacto  
 B Presencia o ausencia de puente  
 C Presencia o ausencia de porosidad  
 D Presencia o ausencia de componente levantado  
 E Presencia o ausencia de unión fracturada  
 F Presencia o ausencia de soldadura retraída  
 G Presencia o ausencia de bolas de soldadura  
 H Presencia o ausencia de unión opaca  
 I Presencia o ausencia de unión granulosa  
 J Presencia o ausencia de soldadura fría  
 K Parámetro eléctrico (Voltaje, corriente o resistencia)

Figura 4.6. Matriz de causa-efecto para soldadura.

### **4.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD A LA IMPRESIÓN DE PASTA**

Con el propósito de ilustrar el uso de la metodología para la solución de problemas del sistema para el control y mejora de la calidad, se presentan en esta sección los resultados obtenidos al aplicar el sistema propuesto a la operación de impresión de pasta en una planta de ensamble de tarjetas electrónicas. Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa. Los resultados numéricos obtenidos deben tomarse con reserva, como se verá a detalle en esta sección, por las siguientes razones: la alta variabilidad del sistema de medición, el uso de un número pequeño de muestras (10 en total) en la determinación del estado de control del proceso y del nivel de capacidad del mismo. Conviene enfatizar entonces, que el objetivo principal de este caso de aplicación consistió en mostrar los beneficios de aplicar las etapas del sistema desarrollado al control y mejora de la calidad en la operación de impresión de pasta en SMT.

#### **4.3.1 Antecedentes**

La planta donde se aplicó la metodología, manufactura varios de sus productos utilizando la tecnología de montaje superficial (SMT) en varias de sus líneas de producción. Como ya se mencionó en el capítulo 3, se estima que entre el 60 y 80% de la cantidad de defectos totales que se presentan en la soldadura mediante SMT se deben a alguna causa originada en el proceso de impresión de pasta, este es el motivo principal por el cual se decidió aplicar el modelo a esta fase del proceso SMT.

Para aplicar el modelo se seleccionó la línea 6 de SMT de esta planta. Esta línea está encargada de producir una cierta familia de productos que incluye teléfonos residenciales o industriales cuya característica común es que involucran el ensamble de SMDs cuyo espaciamiento entre terminales es menor a 0.020 in; estos componentes reciben el nombre de finamente espaciados (fine pitch components). El contar con componentes del tipo fine pitch exige que la precisión del proceso sea mayor para asegurar soldaduras de calidad.

### 4.3.2 Diagrama de flujo del proceso

La figura 4.7 muestra el diagrama de flujo que corresponde a la línea 6 de SMT en la planta de este caso de aplicación. De manera rutinaria la inspección de la pasta impresa consiste en la verificación de la ausencia de puentes mediante visión humana con ayuda de una lupa de 5 aumentos. Además, se cuenta con un equipo de medición cyberoptics que opera fuera de la línea para determinar la altura de la pasta sobre los pads de 3 componentes críticos en los PCBs cada hora.

Para este caso de aplicación, en lugar de realizar la inspección de la pasta impresa como cotidianamente se lleva a cabo en la planta, se utilizó el sistema para el control y mejora de la calidad propuesto en la operación de impresión de pasta.

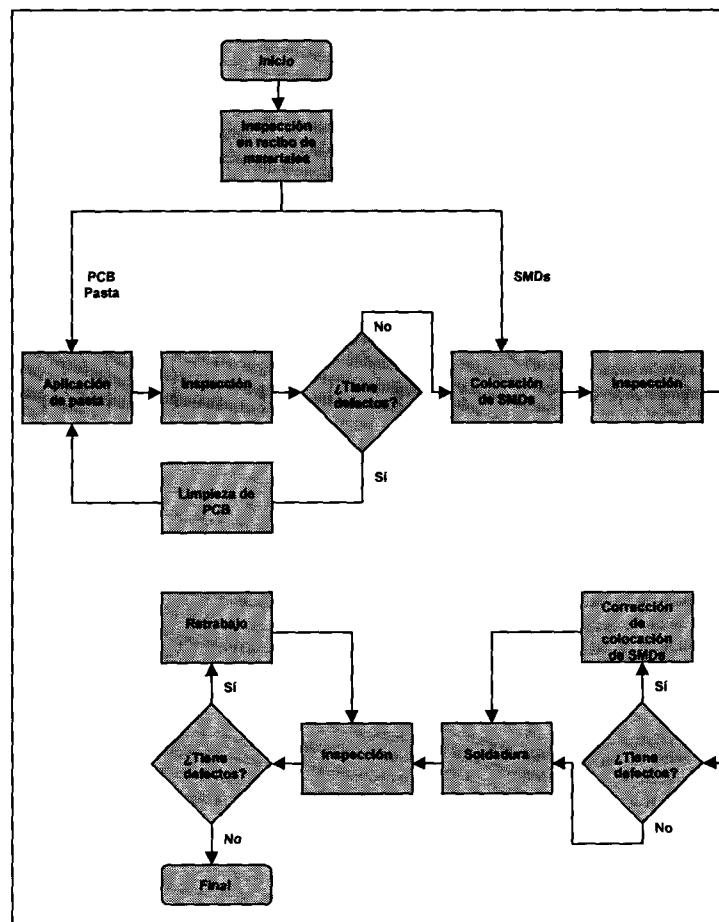


Figura 4.7. Diagrama de flujo de la línea 6 de SMT de la planta del caso de aplicación.

### 4.3.3 CTQ y defectos

En este caso, fue la altura de la pasta la característica crítica de calidad (CTQ) seleccionada para ser controlada y mejorada; debe advertirse de la tabla 4.30 que el pobre desempeño de la altura de la pasta es la CTQ que está relacionada con un mayor número de defectos en la impresión de pasta, en forma concreta una inadecuada altura de pasta puede provocar: puentes, excesos, insuficiencias o picos.

El estudio se enfoca en la altura de pasta sobre los pads que corresponden al QFP (por tratarse de un SMD del tipo fine pitch) de la familia de productos de la línea 6 de SMT. Las especificaciones para la altura de la pasta en esta familia de productos se citan a continuación:

Límite superior de especificación = 6.8 mils

Valor nominal = 6.4 mils

Límite inferior de especificación = 6.0 mils

### 4.3.4 Aplicación de gráficos de control

La altura de pasta es una CTQ del tipo variable. El tamaño de muestra seleccionado fue de 1, es decir se tomó la medición de la altura de la pasta sobre uno de los pads correspondientes al QFP de los modelos de la familia de la línea 6. En un primer acercamiento al problema, el interés se centró en detectar cambios grandes en el proceso, por lo tanto, de acuerdo con la figura A.1 del anexo A, se decidió utilizar el gráfico de control para mediciones individuales (x-MR). La frecuencia de muestreo seleccionada fue de 1 PCB cada 15 minutos.

Si bien se recomienda tomar más de 30 muestras a fin de determinar los límites de control del gráfico, por restricciones impuestas en la planta sólo fue posible tomar 10 muestras y a partir de ellas se determinaron los parámetros del gráfico de control. Los valores tomados se muestran en la tabla 4.31 y los resultados de los parámetros del gráfico de control de acuerdo con las ecuaciones A.16, A.17 y A.18 son reportados en la tabla 4.32.

Tabla 4.31. Muestras tomadas de la altura de la pasta impresa.

Muestra	Altura de pasta (mils)
1	6.815
2	7.035
3	6.79
4	6.4975
5	6.9875
6	5.9575
7	6.7875
8	6.8875
9	6.715
10	6.57

Tabla 4.32. Parámetros de los gráficos de control  $\bar{x}$  y MR de la altura de la pasta (mils).

$\bar{x}_{promedio}$	MR promedio
6.70425	0.39166667
<b>Gráfico de control de mediciones individuales (<math>\bar{x}</math>)</b>	
UCL	7.7459
CL	6.7043
LCL	5.6626
<b>Gráfico de control de movimiento en el rango (MR)</b>	
UCL	1.2796
CL	0.3917
LCL	0.0000

Los gráficos  $\bar{x}$  y MR que resultan se muestran en la figura 4.8. En dichos gráficos no se advierte la presencia de puntos fuera de control o de tendencias, por lo tanto se admitió que los parámetros de control obtenidos eran los adecuados para iniciar el seguimiento del control de la altura de la pasta.

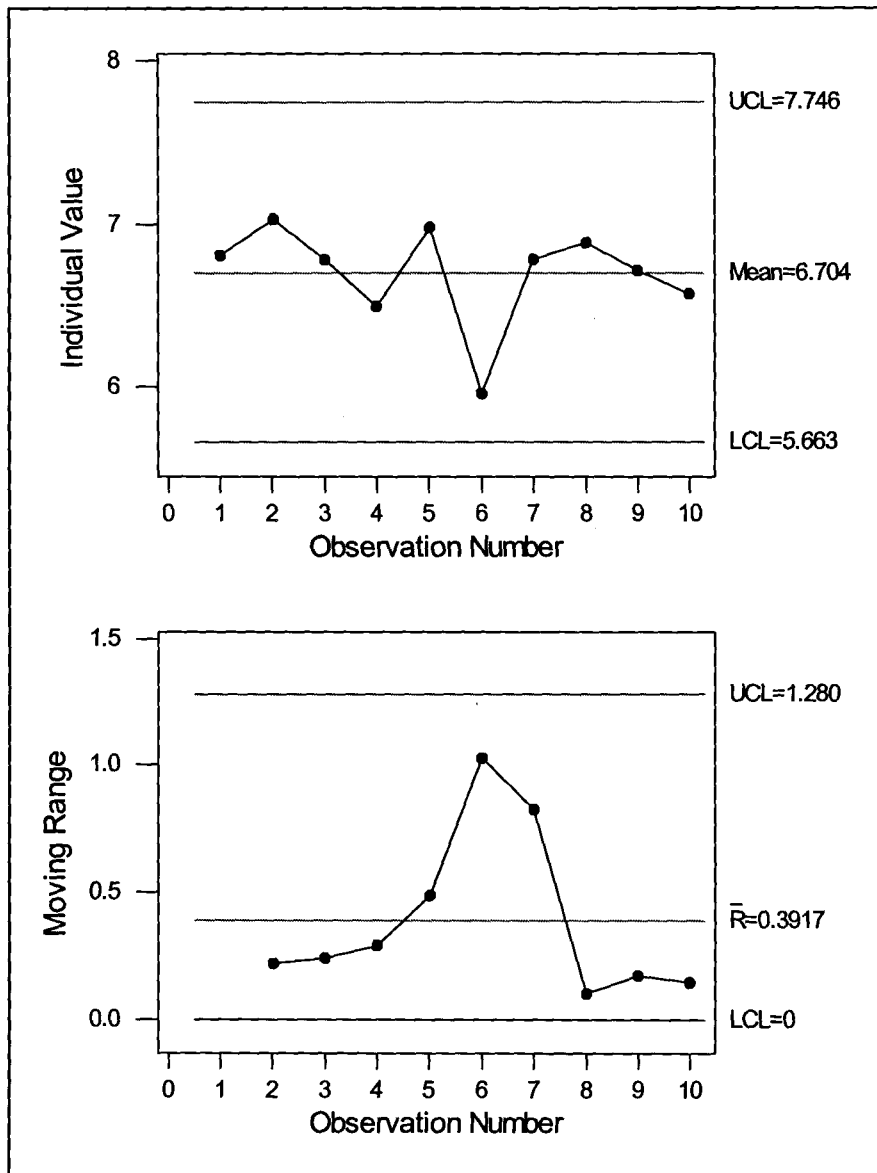


Figura 4.8. Gráficos de control x-MR para la altura de la pasta (mils).

#### 4.3.5 Análisis del sistema de medición

Con el propósito de conocer la efectividad del sistema de medición de altura de pasta utilizado en la planta, se llevó al cabo un estudio R&R por el método largo de acuerdo con lo expuesto en la tabla A.1 del anexo A. Este estudio fue llevado al cabo tomando en cuenta las siguientes consideraciones:



1. Las muestras tomadas consistieron en la determinación de la altura de la pasta correspondiente al QFP del PCB de la familia Taurus bajo las condiciones actuales de operación.
2. Estuvieron involucrados 2 operadores.
3. El número de muestras tomadas por cada operador fue de 10.

La tabla 4.33 muestra los resultados obtenidos para este estudio de acuerdo con lo expuesto en la tabla A.1 y en las ecuaciones A.50 y A.54. Debido a que el porcentaje de tolerancia fue de 256.63% y por consiguiente mucho mayor que 25% el sistema de medición no era aceptable en sus niveles de repetibilidad y reproducibilidad. La alta variabilidad del sistema de medición debió tenerse en mente en la aplicación de las siguientes etapas del modelo, por la incertidumbre de la medición y por consiguiente, de los resultados numéricos obtenidos. En este sentido, es necesario recordar que el objetivo principal del presente caso era mostrar el beneficio de aplicar las distintas etapas del sistema propuesto.

**Tabla 4.33.** Resultados del análisis del sistema de medición para la altura de la pasta (mils).

Muestra	Operador 1			Operador 2		
	Intento 1	Intento 2	Rango	Intento 1	Intento 2	Rango
1	6.77	6.96	0.19	6.12	6.42	0.3
2	6.96	6.28	0.68	6.52	6.61	0.09
3	6.47	7.06	0.59	6.52	6.52	0
4	7.06	6.28	0.78	6.22	6.22	0
5	6.86	5.98	0.88	6.61	6.61	0
6	7.55	6.77	0.78	6.61	6.81	0.2
7	7.75	6.86	0.89	6.81	6.61	0.2
8	7.06	6.08	0.98	6.71	6.61	0.1
9	6.28	7.16	0.88	6.71	6.91	0.2
10	7.45	7.35	0.1	6.61	6.91	0.3
	$R_{\text{operador 1}}$		0.675	$R_{\text{operador 2}}$		0.139
	$X_{\text{operador 1}}$		6.8495	$X_{\text{operador 2}}$		6.5835
	$R_{\text{promedio}}$		0.407			
	$X_{\text{diferencia}}$		0.266			
	Repetibilidad		1.85592			
	Reproducibilidad		0.87773849			
	R&R		2.053013372			
	%Tolerancia		256.63%			

### 4.3.6 Capacidad del proceso

Para el caso de la capacidad del proceso se consideraron los datos de la tabla 4.31. En la tabla 4.34 se dan a conocer los valores  $C_p$  y  $C_{pk}$ . Puesto que los valores  $C_p$  y  $C_{pk}$  fueron en ambos casos mucho menores a 1.33 se precisaba mejorar la calidad de la altura de la pasta impresa.

**Tabla 4.34.** Índices de capacidad de proceso.

Altura de pasta (mils)	Media	Desv. Estándar	$C_p$	$C_{pk}$
	6.70425	0.310604362	0.429271	0.102757
6.815				
7.035				
6.79				
6.4975				
6.9875				
5.9575				
6.7875				
6.8875				
6.715				
6.57				

### 4.3.7 Revisión de la matriz de causa-efecto

La matriz de causa-efecto de la impresión de pasta de la figura 4.4 indica que las variables de entrada al proceso y que influyen en la altura de la pasta son las citadas en la tabla 4.35. En dicha tabla para algunos de estos factores también se menciona su nivel de operación actual.

Tabla 4.35. KPIVs que influyen en la altura de la pasta.

KPIV (factor)	Tipo de factor (según Taguchi)	Condición actual de operación
Velocidad del squeegee (pulg/seg)	Factor señal	1
Presión del squeegee (lbs)	Factor señal	23
Espesor del estencil (pulg)	Factor control	0.6
Viscosidad de la pasta	Factor control	Pasta tipo Alpha
Humedad (%)	Factor ruido	Variable
Temperatura (°C)	Factor ruido	Variable
Velocidad de descenso de la mesa (pulg/seg)	Factor señal	0.05
Limpieza del estencil	Factor señal	1 cada 3 PCBs
Dureza del squeegee	Factor control	Squeegee metálico
Fuerza de sujeción del PCB	Factor señal	10
Distancia de barrido del squeegee (pulg)	Factor señal	± 6.5
Distancia de descenso de la mesa (pulg)	Factor señal	0.1
Tiempo de espera para bajar la mesa (seg)	Factor señal	0
Distancia del squeegee al estencil (pulg)	Factor señal	0.231
Distancia del PCB al estencil (pulg)	Factor señal	-0.05

#### 4.3.8 Diseño de experimentos factorial completo

Con el propósito de identificar las causas de variación significativas y las relaciones entre los 3 parámetros de operación de la impresora de pasta considerados como de mayor importancia por los ingenieros de la planta, se realizó un diseño de experimentos factorial completo de  $2^3$ . Los tres factores considerados se seleccionaron de entre las KPIVs del tipo factor señal de mayor peso de acuerdo con la matriz de causa-efecto de la figura 4.4. La tabla 4.36 muestra los niveles que se utilizaron para los factores. Estos niveles fueron los niveles máximo y mínimo de operación propuestos por el proveedor de la pasta utilizada.

Tabla 4.36. Factores y niveles para el diseño de experimentos factorial completo.

Variable	Identificación De la variable	Nivel bajo	Nivel alto
Velocidad del squeegee (pulg/seg)	$x_1$	1	4
Presión del squeegee (lbs)	$x_2$	18	23
Velocidad de descenso de la mesa (pulg/seg)	$x_3$	0.05	0.1

La matriz de diseño así como los resultados obtenidos en las mediciones se muestran en la tabla 4.37. Se tomaron 2 mediciones para cada condición experimental. En el anexo A, secciones A.9.1 y A.9.2 se explica el procedimiento general y se dan las ecuaciones necesarias para el análisis de un diseño de experimentos factorial completo.

**Tabla 4.37.** Matriz del diseño factorial completo y resultados de mediciones.

No. Exp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Altura de pasta original (mils)	
				Corrida 1 ( $y_{11}$ )	Corrida 2 ( $y_{12}$ )
1	-	-	-	6.82	7.025
2	+	-	-	6.92	7.53
3	-	+	-	6.11	6.92
4	+	+	-	6.115	6.875
5	-	-	+	6.365	7.175
6	+	-	+	8.08	6.52
7	-	+	+	6.97	6.525
8	+	+	+	7.07	6.215

La meta era lograr que la altura cumpliera con el valor nominal de 6.4 mils, por lo cual se modificó la variable de salida original medida mediante un cambio de variable que exprese la intención de minimizar la diferencia entre el valor medido y el valor nominal; dicha expresión está dada por la ecuación 4.1. Las nuevas mediciones de la altura de la pasta de acuerdo con esta transformación se muestran en la tabla 4.38.

$$y = |y_{\text{original}} - 6.4| \tag{4.1}$$

**Tabla 4.38.** Altura de pasta modificada para el diseño factorial completo.

No. Exp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Altura de pasta modificada (mils)		Media ( $y$ )	$S^2_1$
				Corrida 1 ( $y_{11}$ )	Corrida 2 ( $y_{12}$ )		
1	-	-	-	0.42	0.625	0.5225	0.0210125
2	+	-	-	0.52	1.13	0.825	0.18605
3	-	+	-	0.29	0.52	0.405	0.02645
4	+	+	-	0.285	0.475	0.38	0.01805
5	-	-	+	0.035	0.775	0.405	0.2738
6	+	-	+	1.68	0.12	0.9	1.2168
7	-	+	+	0.57	0.125	0.3475	0.0990125
8	+	+	+	0.67	0.185	0.4275	0.1176125

Los resultados de este diseño de experimentos factorial completo se dan a conocer en la tabla 4.39.

**Tabla 4.39.** Matriz de cálculo para el diseño factorial completo y resultados de efectos. Unidades de la altura de pasta en mils.

No. Exp.	I	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.5225
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.825
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0.405
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0.38
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.405
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0.9
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0.3475
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0.4275
	Media	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>12</sub>	E <sub>13</sub>	E <sub>23</sub>	E <sub>123</sub>	
	0.5266	0.2131	-0.273	-0.013	-0.186	0.0744	0.0081	-0.022	

La tabla 4.40 presenta los resultados obtenidos en el cálculo de la varianza ponderada y la varianza de los efectos. También se muestra el valor de t utilizado para cumplir con un intervalo de confianza del 95% con 8 grados de libertad.

**Tabla 4.40.** Resultados de  $Sp^2$ ,  $S^2$  efectos y valor de t para el diseño factorial completo. Unidades de la altura de pasta en mils.

$Sp^2$	$S^2$ efectos	S efectos	IC	$t_{1-\alpha/2, 8}$	$t_{1-\alpha/2, 8} S$ efectos
0.354161	0.0885402	0.297557	95%	2.306	0.686166698

La tabla 4.41 presenta la desviación típica obtenida para la media y para cada efecto así como los intervalos de confianza correspondientes. Se observa que para el intervalo de confianza seleccionado ningún efecto resulta significativo. Los efectos de mayor importancia son la presión del squeegee y su velocidad.

**Tabla 4.41.** Desviaciones típicas e intervalos de confianza de la media y efectos para el diseño factorial completo. Unidades de la altura de pasta en mils.

Efectos	Estimación	Desviación típica	Intervalo de confianza	
			Límite inferior	Límite superior
Media	0.5265625	±0.1488	0.183479151	0.869645849
E <sub>1</sub>	0.213125	±0.2976	-0.473041698	0.899291698
E <sub>2</sub>	-0.273125	±0.2976	-0.959291698	0.413041698
E <sub>3</sub>	-0.013125	±0.2976	-0.699291698	0.673041698
E <sub>12</sub>	-0.185625	±0.2976	-0.871791698	0.500541698
E <sub>13</sub>	0.074375	±0.2976	-0.611791698	0.760541698
E <sub>23</sub>	0.008125	±0.2976	-0.678041698	0.694291698
E <sub>123</sub>	-0.021875	±0.2976	-0.708041698	0.664291698

El desarrollo de este experimento factorial completo, permitió establecer las siguientes consideraciones respecto a la altura de la pasta sobre los pads que corresponden a la familia de PCBs de la línea 6 de SMT:

1. Para un intervalo de confianza del 95% no existen efectos significativos.
2. Los factores que mayor efecto tienen en la altura de la pasta son la presión ejercida por el squeegee, la velocidad del mismo y la interacción entre ambos. Por lo tanto, en el diseño de experimentos factorial fraccionado a realizar en la siguiente etapa se incluyeron la presión ejercida por el squeegee y su velocidad; no se consideró la velocidad de descenso de la mesa.

#### 4.3.9 Diseño de experimentos factorial fraccionado

Con el propósito de conocer el efecto de un mayor número de variables se planteó un diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ . Los 5 factores considerados se seleccionaron de entre los factores señal de la tabla 4.35 y que a juicio de los ingenieros de proceso podían tener influencia también sobre la altura de la pasta. La tabla 4.42 muestra los niveles que se utilizaron para los factores. Los niveles seleccionados para cada factor son los niveles máximo y mínimo utilizados de manera típica en el proceso.

**Tabla 4.42.** Factores y niveles para el diseño de experimentos factorial fraccionado.

Variable	Identificación de la variable	Nivel bajo	Nivel alto
Presión del squeegee (lbs)	$x_1$	18	25
Velocidad del squeegee (pulg/seg)	$x_2$	1	4
Distancia del squeegee al estencil (pulg)	$x_3$	0.249	0.075
Distancia de barrido del squeegee (pulg)	$x_4$	5.75	6.5
Distancia del PCB al estencil (pulg)	$x_5$	-0.05	0.1

La matriz de diseño así como los resultados obtenidos en las mediciones se muestran en las tablas 4.43 y 4.44. Fueron tomadas 2 mediciones para cada condición experimental.

**Tabla 4.43.** Mediciones de altura de pasta para el diseño de experimentos factorial fraccionado.

No. Exp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Altura de pasta original (mls)	
						Corrida 1 ( $y_{1j}$ )	Corrida 2 ( $y_{2j}$ )
1	-	-	-	-	+	5.83	5.975
2	+	-	-	-	-	5.98	6.12
3	-	+	-	-	-	6.37	6.42
4	+	+	-	-	+	6.47	6.42
5	-	-	+	-	-	6.52	6.52
6	+	-	+	-	+	6.61	6.66
7	-	+	+	-	+	7.84	9.26
8	+	+	+	-	-	6.71	7.005
9	-	-	-	+	-	6.86	6.86
10	+	-	-	+	+	6.465	6.615
11	-	+	-	+	+	6.86	6.86
12	+	+	-	+	-	6.86	6.81
13	-	-	+	+	+	7.15	7.055
14	+	-	+	+	-	6.075	6.22
15	-	+	+	+	-	8.475	8.83
16	+	+	+	+	+	6.515	6.955

**Tabla 4.44.** Altura de pasta modificada para el diseño de experimentos factorial fraccionado.

No. Exp.	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	Altura de pasta modificada (mils)		Media (y)	S <sup>2</sup> <sub>i</sub>
						Corrida 1 (y <sub>11</sub> )	Corrida 2 (y <sub>12</sub> )		
1	-	-	-	-	+	0.57	0.425	0.4975	0.010513
2	+	-	-	-	-	0.42	0.28	0.35	0.0098
3	-	+	-	-	-	0.03	0.02	0.025	5E-05
4	+	+	-	-	+	0.07	0.02	0.045	0.00125
5	-	-	+	-	-	0.12	0.12	0.12	0
6	+	-	+	-	+	0.21	0.26	0.235	0.00125
7	-	+	+	-	+	1.44	2.86	2.15	1.0082
8	+	+	+	-	-	0.31	0.605	0.4575	0.043513
9	-	-	-	+	-	0.46	0.46	0.46	0
10	+	-	-	+	+	0.065	0.215	0.14	0.01125
11	-	+	-	+	+	0.46	0.46	0.46	0
12	+	+	-	+	-	0.46	0.41	0.435	0.00125
13	-	-	+	+	+	0.75	0.655	0.7025	0.004512
14	+	-	+	+	-	0.325	0.18	0.2525	0.010513
15	-	+	+	+	-	2.075	2.43	2.2525	0.063012
16	+	+	+	+	+	0.115	0.555	0.335	0.0968

En las secciones A.9.3 y A.9.2 del anexo A puede consultarse el procedimiento general que se sigue en el análisis de un diseño de experimento factorial fraccionado. Los resultados de este diseño de experimentos factorial fraccionado se dan a conocer en la tabla 4.45. La variable 5 fue introducida en la matriz de cálculo mediante el uso de la columna correspondiente a la interacción 1234, con lo cual la resolución de este diseño fue igual a V.

**Tabla 4.45.** Matriz de cálculo para el diseño factorial fraccionado y resultados de efectos confundidos. Unidades de la altura de pasta en mils.

No. Exp.	I	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> x <sub>4</sub>	y
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.4975
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.35
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0.025
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0.045
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0.12
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0.235
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	2.15
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0.4575
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.46
10	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0.14
11	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0.46
12	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0.435
13	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0.7025
14	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0.2525
15	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	2.2525
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.335
	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>12</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>14</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>24</sub>	I <sub>34</sub>	I <sub>123</sub>	I <sub>124</sub>	I <sub>134</sub>	I <sub>234</sub>	I <sub>1234</sub>	
	0.5573	-0.552	0.425	0.51	0.145	-0.352	-0.43	-0.126	0.546	0.057	3E-04	-0.467	0.05844	-0.0716	-0.2116	0.026563	



El conjunto completo de combinaciones lineales de efectos confundidos está dado por:

$$l_0 = \text{Media} + \frac{1}{2}(E_{12345})$$

$$l_1 = E_1 + E_{2345}$$

$$l_2 = E_2 + E_{1345}$$

$$l_3 = E_3 + E_{1245}$$

$$l_4 = E_4 + E_{1235}$$

$$l_{12} = E_{12} + E_{345}$$

$$l_{13} = E_{13} + E_{245}$$

$$l_{14} = E_{14} + E_{235}$$

$$l_{23} = E_{23} + E_{145}$$

$$l_{24} = E_{24} + E_{135}$$

$$l_{34} = E_{34} + E_{125}$$

$$l_{123} = E_{123} + E_{45}$$

$$l_{124} = E_{124} + E_{35}$$

$$l_{134} = E_{134} + E_{25}$$

$$l_{234} = E_{234} + E_{15}$$

$$l_{1234} = E_{1234} + E_5$$

Asumiendo que las interacciones de tercer orden o mayores no son significativas se tiene que todos los efectos de primer y segundo orden quedan desconfundidos. Para determinar cuáles de estos efectos eran significativos se obtuvo el intervalo de confianza para cada uno de los efectos desconfundidos. La tabla 4.46 presenta los resultados obtenidos en el cálculo de la varianza ponderada y la varianza de los efectos. También se muestra el valor de  $t$  utilizado para cumplir con un intervalo de confianza del 98% con 16 grados de libertad.

**Tabla 4.46.** Resultados de  $Sp^2$ ,  $S_{\text{efecto}}$  y valor de  $t$  para el diseño factorial fraccionado.

$Sp^2$	$S^2$ efectos	S efectos	IC	$t_{\alpha/2, 16}$	$t_{\alpha/2, 16}$ S efectos
0.07887	0.00985869	0.0992909	98.00%	2.583	0.256468506

La tabla 4.47 da a conocer los intervalos de confianza calculados así como los efectos significativos. De la tabla 4.47 se concluye que son significativos  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  y sus interacciones de segundo orden, así como  $E_{45}$ .

Tabla 4.47. Desviaciones típicas e intervalos de confianza de la media y efectos para el diseño factorial fraccionado. Unidades de la altura de pasta en mils.

Efectos confundidos	Efectos estimados	Valor del efecto	Desviación típica	Intervalo de confianza	
				Límite inferior	Límite superior
$I_0$	Media	0.55734375	±0.0497	0.429109497	0.685578003
$I_1$	$E_1$	-0.5521875	±0.0993	-0.808656006	-0.295718994
$I_2$	$E_2$	0.4253125	±0.0993	0.168843994	0.681781006
$I_3$	$E_3$	0.5115625	±0.0993	0.255093994	0.768031006
$I_4$	$E_4$	0.1446875	±0.0993	-0.111781006	0.401156006
$I_{12}$	$E_{12}$	-0.3515625	±0.0993	-0.608031006	-0.095093994
$I_{13}$	$E_{13}$	-0.4340625	±0.0993	-0.690531006	-0.177593994
$I_{14}$	$E_{14}$	-0.1259375	±0.0993	-0.382406006	0.130531006
$I_{23}$	$E_{23}$	0.5459375	±0.0993	0.289468994	0.802406006
$I_{24}$	$E_{24}$	0.0565625	±0.0993	-0.199906006	0.313031006
$I_{34}$	$E_{34}$	0.0003125	±0.0993	-0.256156006	0.256781006
$I_{123}$	$E_{45}$	-0.4671875	±0.0993	-0.723656006	-0.210718994
$I_{124}$	$E_{35}$	0.0584375	±0.0993	-0.198031006	0.314906006
$I_{134}$	$E_{25}$	-0.0715625	±0.0993	-0.328031006	0.184906006
$I_{234}$	$E_{15}$	-0.2115625	±0.0993	-0.468031006	0.044906006
$I_{1234}$	$E_5$	0.0265625	±0.0993	-0.229906006	0.283031006

El modelo matemático que resulta de este diseño factorial fraccionado está dado por la siguiente expresión:

$$\hat{y} = 0.5573 - 0.2761x_1 + 0.2127x_2 + 0.2558x_3 - 0.1758x_{12} - 0.217x_{13} + 0.273x_{23} - 0.2336x_{45} \tag{4.2}$$

Con la finalidad de verificar que el modelo obtenido se ajuste de manera apropiada a los datos experimentales, se realizó un ANOVA según se muestra en la tabla 4.48. Puede consultarse el procedimiento que se sigue en el análisis de varianza en la sección A.9.5 del anexo A. Si se considera un valor F de tablas de 2.59 con 8 y 16 grados de libertad en el numerador y denominador respectivamente para un nivel de confianza del 95%, se halla que no existe evidencia de falta de ajuste puesto que el valor F calculado de ANOVA fue menor al valor F de tablas e igual a 1.1918.

**Tabla 4.48.** ANOVA para comprobar ajuste del modelo matemático del diseño factorial fraccionado.

Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (DOF)	Cuadrados medios (MS)	Valor F calculado
Modelo	22.54675625	8	2.818344531	
Residuo	2.01386875	24	0.083911198	
Falta de ajuste	0.75195625	8	0.093994531	1.191772409
Error puro	1.2619125	16	0.078869531	
Total	24.560625	32		

El análisis del diseño factorial fraccionado conllevó a establecer las siguientes consideraciones respecto a la altura de la pasta sobre los pads que corresponden a la familia de PCBs de la línea 6 de SMT:

1. Los factores de la operación de impresión de pasta significativos son la presión ejercida por el squeegee, la distancia del squeegee al estencil y la velocidad del squeegee, así como sus interacciones de segundo orden, también resultó ser significativa la interacción de la distancia de barrido del squeegee con la distancia del PCB al estencil.
2. Debido a que en las 2 condiciones experimentales con mejores respuestas (experimentos 3 y 4) la velocidad del squeegee, la distancia del squeegee al estencil y la distancia de barrido del mismo operaban en un nivel alto, bajo y bajo respectivamente, se propuso que estos fueran sus niveles actuales de operación. Además, el incrementar la velocidad del squeegee a su nivel alto provoca que el tiempo de ciclo en la impresión de pasta se reduzca. La presión del squeegee debe mantenerse en su nivel alto y la distancia del PCB al estencil en su nivel bajo para minimizar el valor de la altura modificada de la pasta de acuerdo con la ecuación 4.2.
3. En la aplicación de la metodología de superficies de respuesta se sugirió involucrar las 2 variables que resultaron más significativas, es decir, la presión ejercida por el squeegee y la distancia del squeegee al estencil.

#### 4.3.10 Superficies de respuesta

Con la finalidad de conocer los niveles óptimos para las variables de presión del squeegee y la distancia del squeegee al estencil que permitan minimizar la altura de la pasta modificada, de acuerdo con la ecuación 4.1, se aplicó la metodología de superficies de respuesta.

Es necesario señalar que antes de iniciar esta fase de experimentación, se presentó un problema en la operación de la máquina, por lo que fue necesario también calibrarla de nuevo. Como resultado de ello, el ingeniero a cargo de la producción decidió cambiar los niveles actuales de operación de algunos parámetros de operación del equipo, entre ellos, las variables a analizar mediante superficies de respuesta.

En un principio el diseño planteado (ver tabla 4.49) consistió en la realización de un experimento  $2^2$  utilizando nuevos niveles en el diseño factorial fraccionado. Se necesitaron además 4 experimentos adicionales en el centro de la región de diseño para calcular la varianza debida al error experimental. Los valores centrales correspondieron a las condiciones actuales de operación.

**Tabla 4.49.** Factores y niveles para el diseño de experimentos  $2^2$ .

Variable	Identificación de la variable	Nivel bajo	Nivel alto	Centro
Presión del squeegee (lbs)	$x_1$	5	19	12
Distancia del squeegee al estencil (pulg)	$x_2$	0.05	0.1	0.075

Los resultados de este diseño  $2^2$  se muestran en la tabla 4.50. Es necesario recordar que el valor de  $y_i$  modificado está dado por la ecuación 4.1. En la tabla 4.51 se dan a conocer los resultados de los efectos

**Tabla 4.50.** Resultados experimentales del diseño  $2^2$ . Unidades de la altura de pasta en mils.

No. Exp.	$x_1$	$x_2$	Original $y_i$	Modificada $y_i$
1	-1	-1	6.72	0.32
2	1	-1	7.55	1.15
3	-1	1	8.235	1.835
4	1	1	6.18	0.22
5	0	0	6.37	0.03
6	0	0	6.08	0.32
7	0	0	6.37	0.03
8	0	0	6.65	0.25

Tabla 4.51. Efectos del diseño  $2^2$ . Unidades de la altura de pasta en mils.

Efectos estimados	Valor del efecto
Media	0.519375
$E_1$	-0.3925
$E_2$	0.2925
$E_{12}$	-1.2225

Como este modelo es realizado bajo la hipótesis que el modelo es lineal entonces es necesario verificar que el coeficiente de interacción de la ecuación lineal (ver ecuación A.68 del anexo A) no sea significativamente grande además de asegurar que no exista curvatura mediante el cálculo indicado en la ecuación A.69. Para tal propósito se obtuvieron las desviaciones típicas para los efectos y para la suma de  $b_{11}$  y  $b_{22}$ . Según se presenta en la tabla 4.52, tanto la interacción como el efecto de curvatura dan evidencia de ser significativos, por lo tanto se planteó un modelo de segundo orden. A fin de obtener los 6 coeficientes del modelo de segundo orden dado por la ecuación A.70 del anexo A, fue necesario aumentar el diseño  $2^2$  con un diseño estrella cuyos niveles y resultados se presentan en la tabla 4.53.

Tabla 4.52. Coeficientes del modelo de primer orden y desviaciones típicas.

Coefficientes	Valor del coeficiente	$S_{\text{error experimental}}$	0.149972
$b_0$	0.519375	$S_{\text{media}}$	0.053023
$b_1$	-0.19625	$S_{\text{efectos}}$	0.074986
$b_2$	0.14625		
$b_{12}$	-0.61125		
$b_{11}+b_{22}=y_f-y_c$	0.72375	$S_{y_f-y_c}$	0.106046

Tabla 4.53. Diseño estrella para formar un diseño compuesto de segundo orden. Unidades de la altura de pasta en mils.

No. Exp.	$x_1$	$x_2$	Original $y_i$	Modificada $y_i$
9	-1.41421	0	5.495	0.905
10	1.414214	0	7.995	1.595
11	0	-1.41421	7.99	1.59
12	0	1.414214	7.7	1.3

Mediante el método de mínimos cuadrados se obtuvieron los coeficientes de la ecuación de segundo orden que se ajusta a los experimentos 1-12 realizados. La ecuación que resulta es la 4.3.

$$\hat{y} = 0.1575 + 0.0239x_1 + 0.0219x_2 + 0.4297x_1^2 + 0.5272x_2^2 - 0.6113x_1x_2 \quad (4.3)$$

Si se sustituyen las relaciones 4.4 y 4.5 en la ecuación 4.3 se obtiene la respuesta en función de los valores descodificados de la presión del squeegee (p) y la distancia del squeegee al estencil (d); esta ecuación resultante es la 4.6. Las curvas de nivel así como la representación tridimensional de esta ecuación se presenta en la figura 4.9 y 4.10.

$$x_1 = \frac{p - 12}{7} \quad (4.4)$$

$$x_2 = \frac{d - 0.075}{0.025} \quad (4.5)$$

$$\hat{y} = 2.9126 + 0.5516p - 83.7069d + 0.0087p^2 + 843.2d^2 - 3.4914pd \quad (4.6)$$

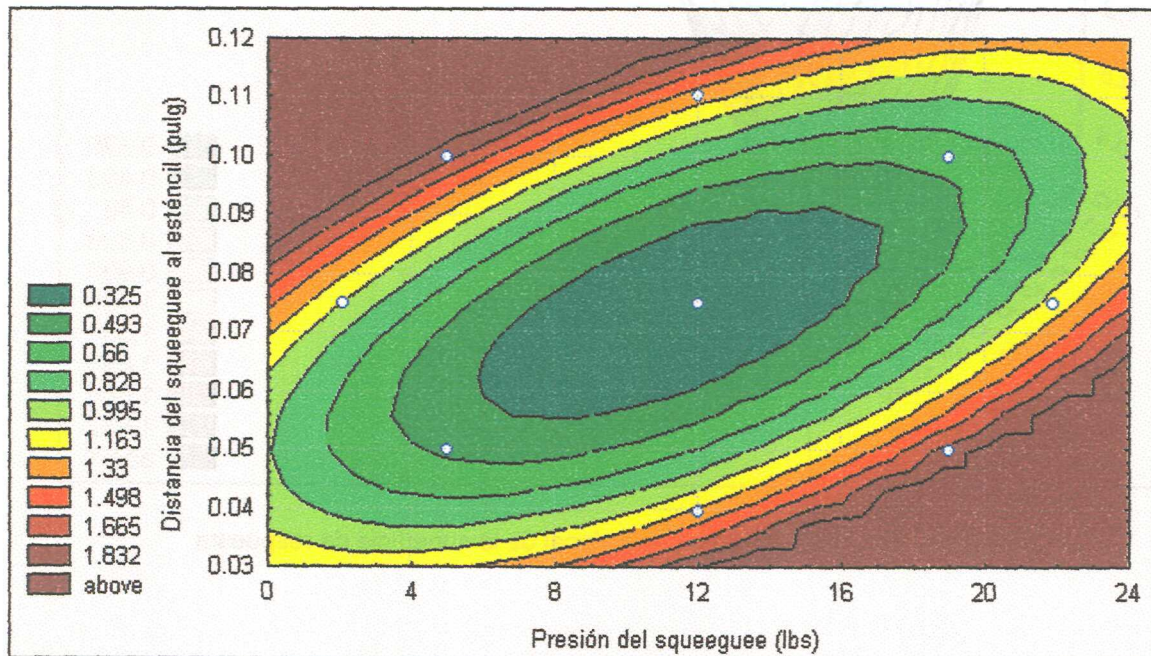


Figura 4.9. Curvas de nivel de la ecuación de segundo grado ajustada.



#### 4.3.11 Niveles óptimos de KPIVs

En la figura 4.9 se observa que los niveles óptimos para la presión del squeegee y la distancia del squeegee al estencil estaban muy cercanos a los niveles de operación utilizados en ese momento. A partir de la ecuación 4.6 es posible conocer los niveles óptimos para cada uno de los factores derivando parcialmente  $\hat{y}$  con respecto a  $d$  y  $p$  e igualando a cero y entre sí las ecuaciones que resulten para luego resolver por sustitución el sistema de 2 ecuaciones y obtener finalmente los valores de la presión del squeegee y la distancia del squeegee al estencil. Estos valores óptimos recomendados para operar la máquina impresora de pasta se dan a conocer en la tabla 4.54.

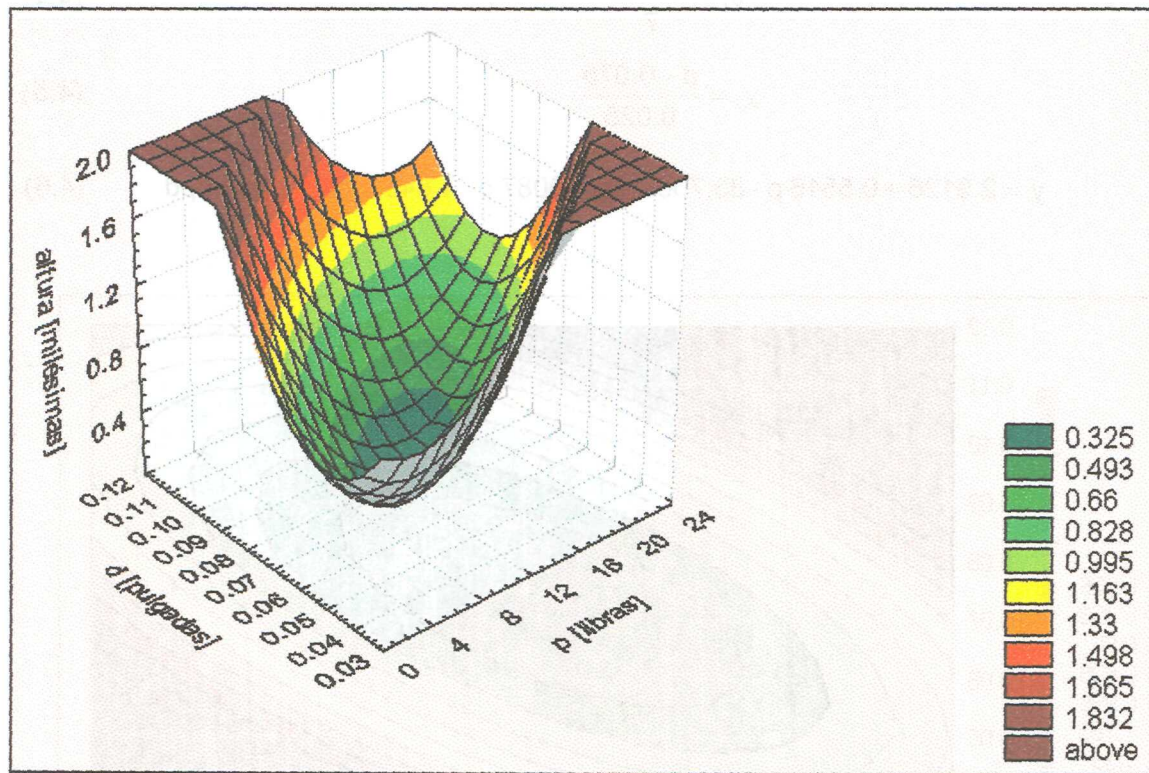


Figura 4.10. Representación tridimensional de la superficie de respuesta.

Tabla 4.54. Niveles óptimos de KPIVs.

Niveles óptimos de KPIVs codificados		Niveles óptimos de KPIVs a aplicar (KPIVs descodificados)	
X <sub>1</sub>	-0.0744	Presión del squeegee (lbs)	11.48
X <sub>2</sub>	-0.0639	Distancia del squeegee al estencil (pulg)	0.073

#### 4.3.12 Conclusiones del caso de aplicación

1. El sistema de medición actual de altura de pasta contribuye con una alta variabilidad, por lo cual se recomienda la adquisición de otro equipo con más alta repetibilidad, o bien el considerar el entrenamiento de los operadores en el procedimiento que debe seguirse en la utilización del equipo a fin de aumentar el nivel de reproducibilidad.
2. Las KPIVs más significativas que se pudieron hallar a partir de los diseños de experimentos fueron en orden de importancia: la presión del squeegee, la distancia del squeegee al estencil y la velocidad del squeegee.
3. La calibración de la impresora de pasta, así como los nuevos niveles que ingeniería eligió para la presión ejercida por el squeegee y la distancia del squeegee al estencil, son adecuados para operar y están bastante cercanos a los niveles óptimos encontrados por el método de superficies de respuesta.

#### 4.4 PROGRAMA COMPUTACIONAL (PRIMERA FASE) PARA EL CONTROL DE LA IMPRESIÓN DE PASTA

##### 4.4.1 ¿Por qué un programa de computadora para el control de calidad?

Una de las áreas de oportunidad comunes a todas las empresas encuestadas consistió en que sólo una de las empresas utiliza un sistema computacional en línea para llevar al cabo



Tabla 4.54. Niveles óptimos de KPIVs.

Niveles óptimos de KPIVs codificados		Niveles óptimos de KPIVs a aplicar (KPIVs descodificados)	
X <sub>1</sub>	-0.0744	Presión del squeegee (lbs)	11.48
X <sub>2</sub>	-0.0639	Distancia del squeegee al estencil (pulg)	0.073

#### 4.3.12 Conclusiones del caso de aplicación

1. El sistema de medición actual de altura de pasta contribuye con una alta variabilidad, por lo cual se recomienda la adquisición de otro equipo con más alta repetibilidad, o bien el considerar el entrenamiento de los operadores en el procedimiento que debe seguirse en la utilización del equipo a fin de aumentar el nivel de reproducibilidad.
2. Las KPIVs más significativas que se pudieron hallar a partir de los diseños de experimentos fueron en orden de importancia: la presión del squeegee, la distancia del squeegee al estencil y la velocidad del squeegee.
3. La calibración de la impresora de pasta, así como los nuevos niveles que ingeniería eligió para la presión ejercida por el squeegee y la distancia del squeegee al estencil, son adecuados para operar y están bastante cercanos a los niveles óptimos encontrados por el método de superficies de respuesta.

#### 4.4 PROGRAMA COMPUTACIONAL (PRIMERA FASE) PARA EL CONTROL DE LA IMPRESIÓN DE PASTA

##### 4.4.1 ¿Por qué un programa de computadora para el control de calidad?

Una de las áreas de oportunidad comunes a todas las empresas encuestadas consistió en que sólo una de las empresas utiliza un sistema computacional en línea para llevar al cabo

el control del proceso. La mayor ventaja de utilizar un programa de computadora para el control del proceso radica en la posibilidad de detectar cambios en el proceso en tiempo real y advertir casi de manera inmediata la existencia de un problema en la calidad del producto. Otras razones por las cuales es recomendable utilizar un programa de computadora son las siguientes:

1. Es factible almacenar una gran cantidad de datos e información de la calidad del producto.
2. Se pueden integrar herramientas estadísticas.

Es deseable además que el programa de computadora posea las siguientes dos características esenciales:

1. Debe ser amigable, a fin de que el operador pueda fácilmente hacer correcciones y consultar las ayudas del paquete.
2. Se debe tener la capacidad de almacenar la historia del comportamiento del proceso.

Si bien es cierto que en el mercado existen sistemas computacionales para el control estadístico del proceso, muchos de ellos son tan genéricos que los usuarios se ven confundidos por la gran cantidad de información que se genera, además de ser los precios generalmente elevados y por lo tanto poco atractivos.

#### **4.4.2 Características generales del programa**

Como ya se ha mencionado en la operación de impresión de pasta es donde se originan la mayor cantidad de defectos, por lo tanto, el programa de computadora que se realizó está enfocado exclusivamente a esta operación. La utilización de este programa permitirá el monitoreo de la operación de impresión de pasta en tiempo real, y por lo tanto, el tiempo en detectar un problema de calidad del producto se reduce notablemente en comparación con la utilización de un sistema de control de calidad en línea pero no automatizado.

Se buscó además que el programa cumpliera con las siguientes dos características esenciales:

1. Integrar de manera adecuada varias de las herramientas estadísticas y de calidad del modelo propuesto para el control de calidad de la operación de impresión de pasta.
2. Presentar como herramientas de ayuda las etapas de conocimiento del proceso que contienen la base de conocimiento técnico de SMT desarrollada en el presente trabajo. El tiempo de análisis y diagnóstico al presentarse un problema de calidad puede minimizarse al contar con esta información en la línea.
3. Ser amigable para el empleado que lo utilice.

Se seleccionó LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) como medio para desarrollar el programa, por ser un software de instrumentación que permite la adquisición de datos del equipo de inspección que esté en uso y por estar basado en la programación gráfica. Además, LabVIEW contiene librerías para la recolección, análisis, presentación y almacenaje de datos. Los datos del equipo de inspección corresponderán a las CTQs medidas y a las cantidades de los tipos de defectos encontrados.

Todos los programas en LabVIEW tienen diagramas de bloques y paneles frontales. Los diagramas de bloques contienen el código fuente del programa y permiten la ejecución del mismo. Los paneles frontales son la interfase gráfica con el usuario, y por lo tanto, sirven para la introducción de datos y el despliegue de salidas del programa.

La figura 4.11 muestra el diagrama de flujo del programa. En el anexo G se presentan un listado de los siete paneles frontales diseñados y sólo como ejemplo en la página 199, el diagrama de bloques de la programación del panel 5. La programación fue realizada por el Ing. Juan Carlos Cárdenas Guajardo. Existe una copia del programa en el Laboratorio de Manufactura Electrónica del ITESM Campus Monterrey.

Si bien en LabVIEW es posible la adquisición de datos directamente del equipo de inspección, en esta primera fase de desarrollo del programa se utilizaron los datos de las mediciones de la altura de la pasta del caso de aplicación, guardados en un archivo en excel y llamados por el programa en LabVIEW conforme eran requeridos. Además, en fases posteriores de desarrollo del software será necesario programar la llamada de un panel desde otro conforme se indica en el diagrama de flujo.

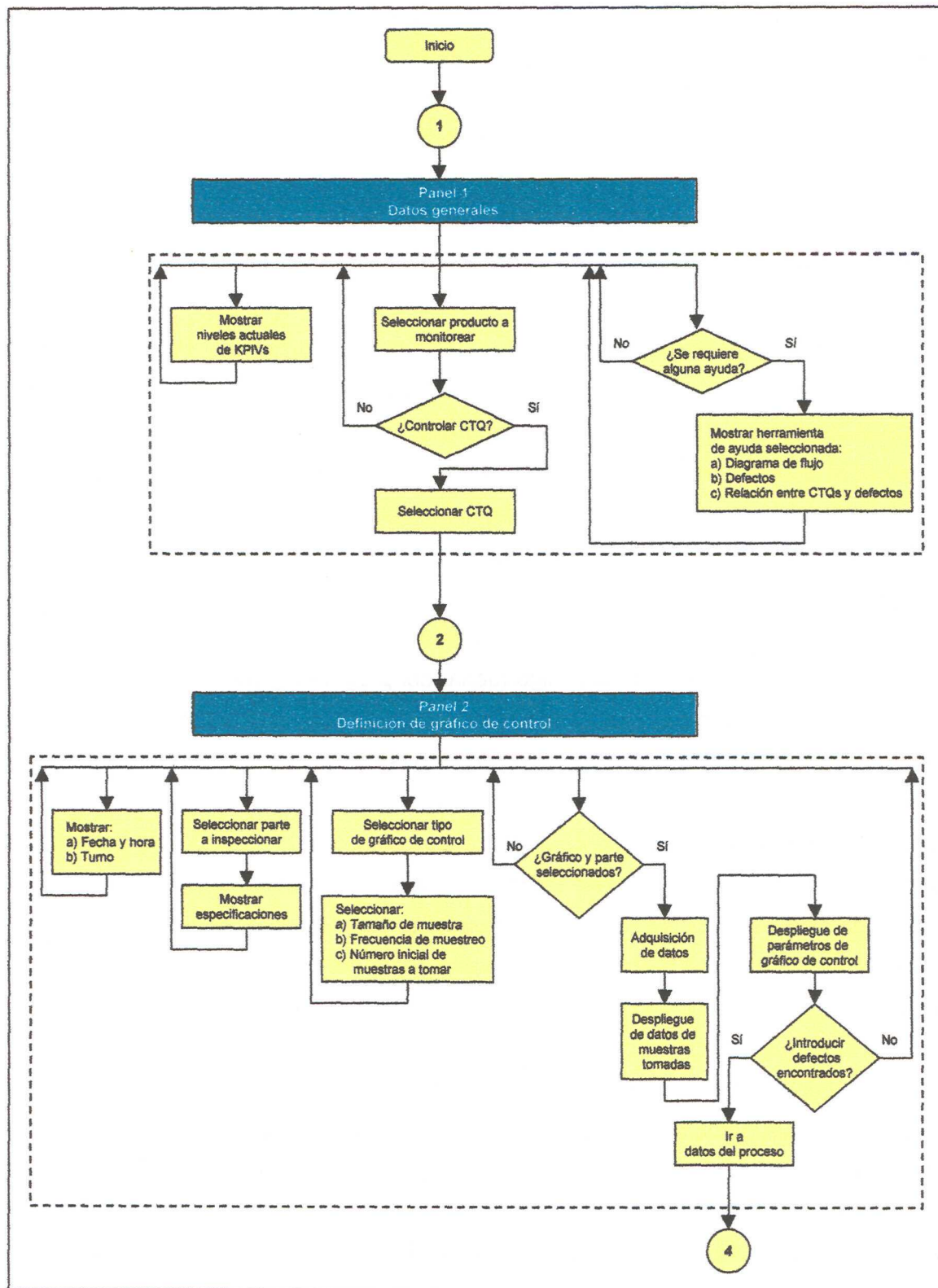


Figura 4.11. Diagrama de flujo del programa computacional para el control de calidad en impresión de pasta (continúa).

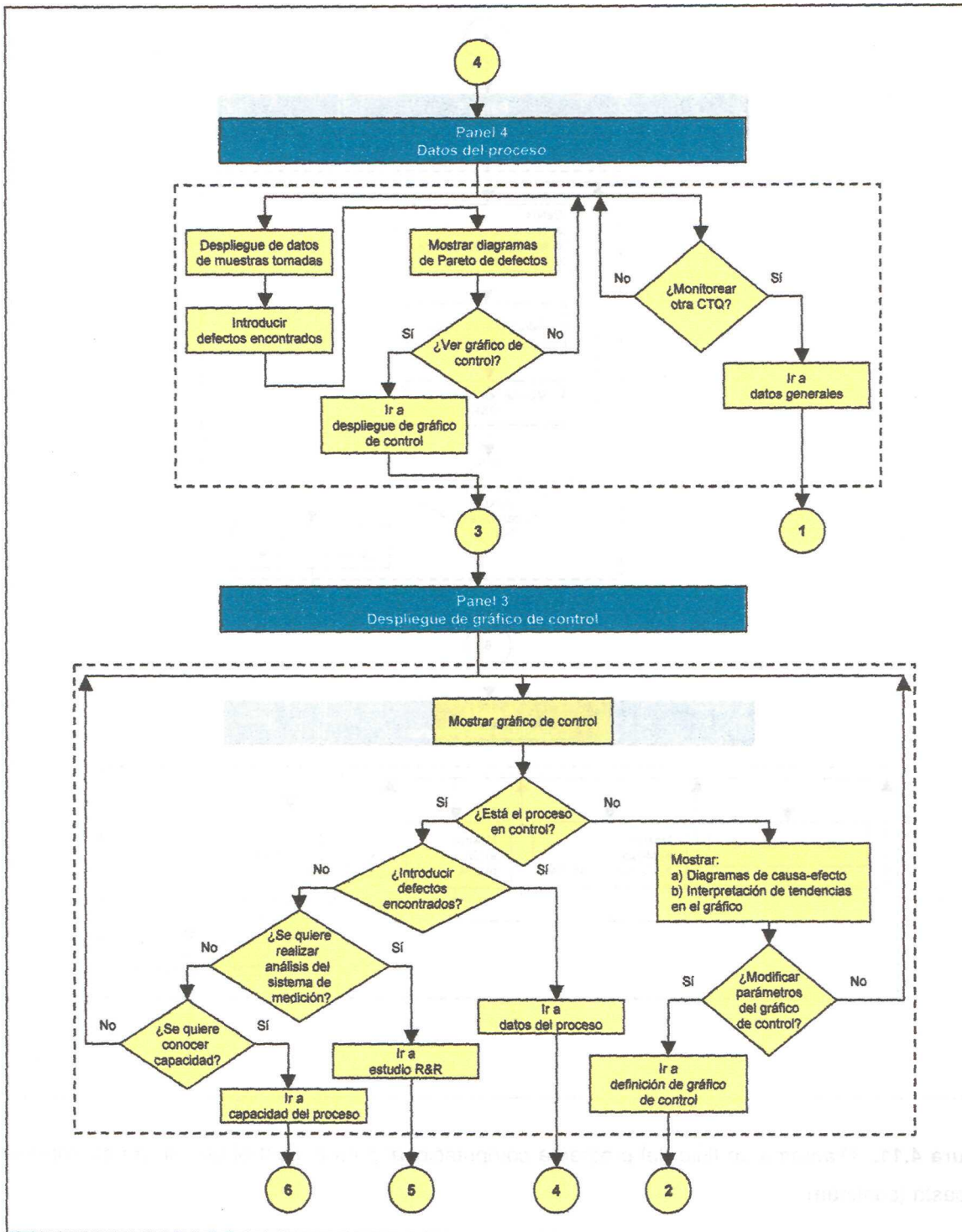


Figura 4.11. Diagrama de flujo del programa computacional para el control de calidad en impresión de pasta (continúa).



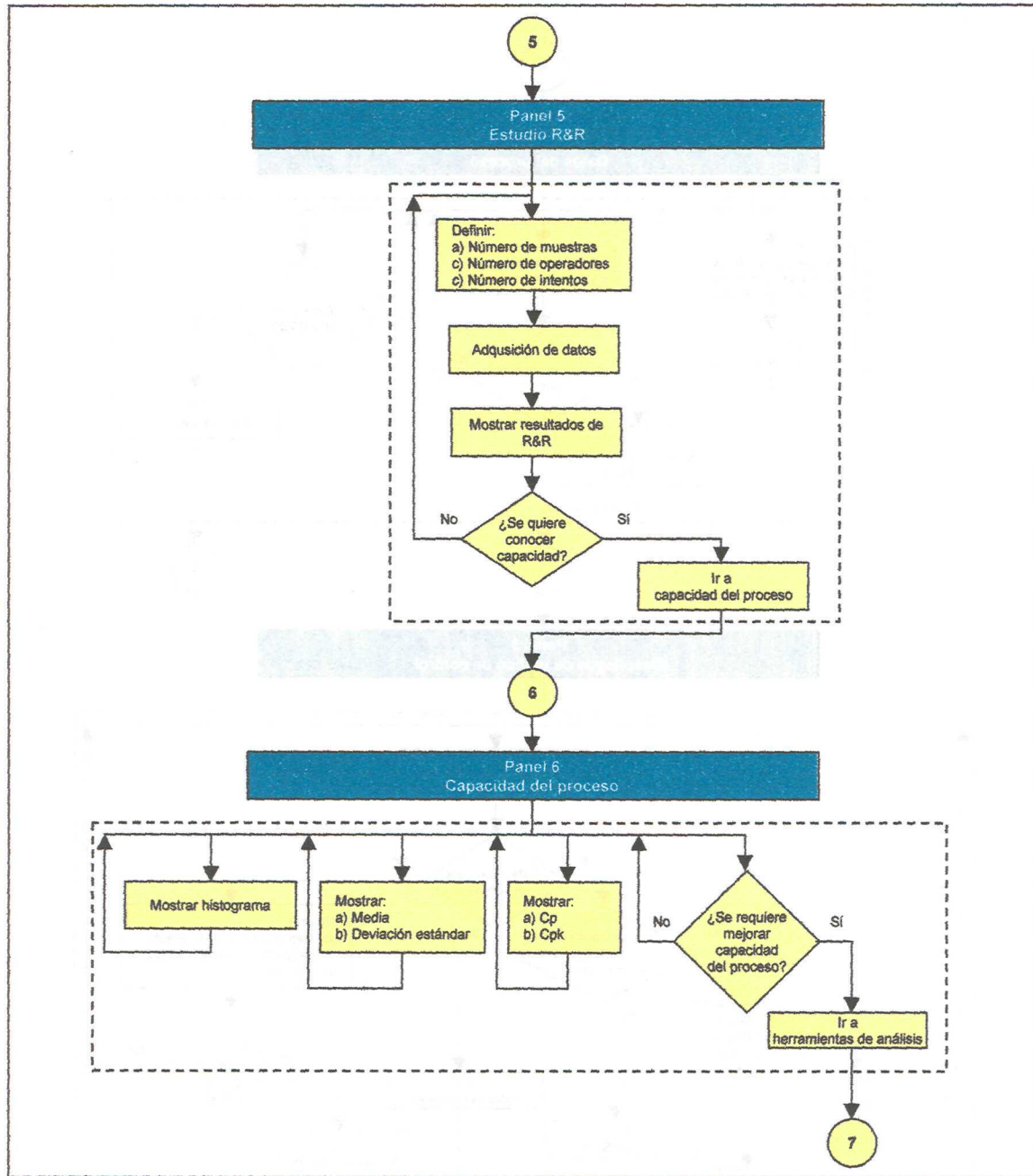


Figura 4.11. Diagrama de flujo del programa computacional para el control de calidad en impresión de pasta (continúa).

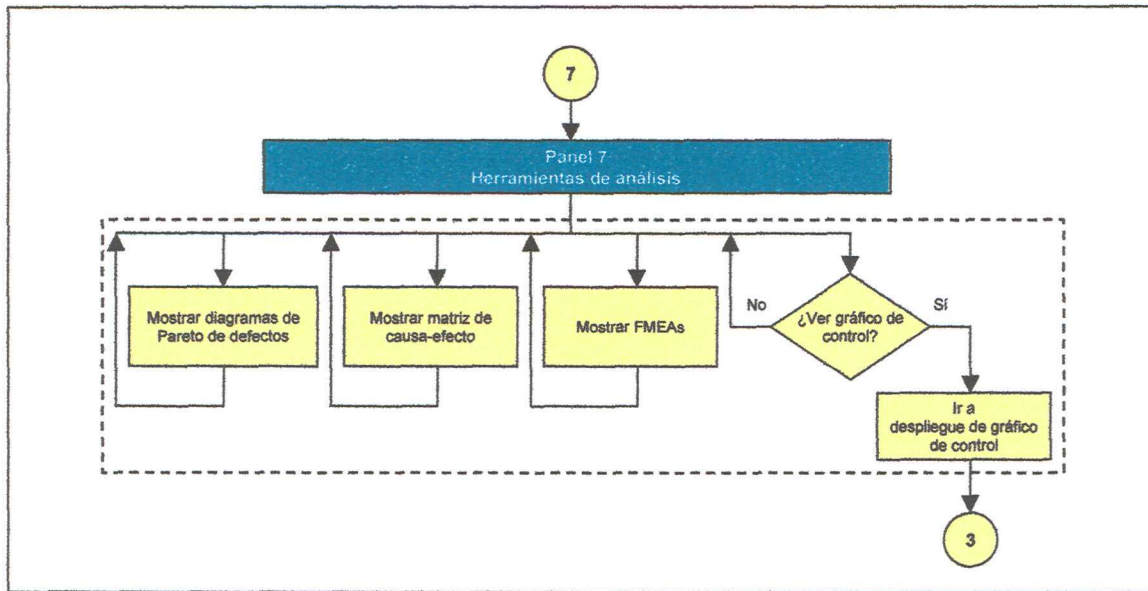


Figura 4.11. Diagrama de flujo del programa computacional para el control de calidad en impresión de pasta.





# 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se dan a conocer las conclusiones del trabajo derivadas de los resultados obtenidos; así como una serie de recomendaciones que incluyen, sugerencias en relación con la aplicación posterior de algunos de los resultados de esta tesis y trabajos futuros que pueden realizarse.

### 5.1 CONCLUSIONES

Los esfuerzos desplegados en atender el control y mejora de la calidad de los productos en las empresas encuestadas dedicadas al ensamble de tarjetas electrónicas por SMT son menores a los requeridos, especialmente en las primeras operaciones SMT, lo cual según los resultados de la encuesta se manifiesta por bajas capacidades de proceso ( $C_{pk}$  predominante entre 0.5 y 1) y altas cantidades de retrabajo (4.37%) y desperdicio (0.29%).

La encuesta realizada a 5 empresas, revela que el enfoque de estas empresas es hacia la identificación de defectos y productos no conformes, con poco énfasis en atender la causa raíz del problema. El objetivo de calidad es lograr que el producto no salga de las especificaciones establecidas sin buscar optimización mediante el uso de herramientas estadísticas como diseño de experimentos o superficies de respuesta.

Un nivel del 42.5% de respuestas contestadas correctamente en la encuesta en relación con las causas raíces de los problemas de calidad en un proceso SMT muestra la necesidad de un mayor conocimiento del proceso que permita dar una solución efectiva a los problemas de calidad.

Se propuso un sistema particular para el control y mejora de la calidad en SMT basado en la metodología seis sigma. El modelo integra diversas herramientas de calidad, estadísticas y

experimentales como DOE y superficies de respuestas y constituye un planeado acercamiento para tratar con los problemas de calidad de la industria mexicana de ensamble de tarjetas electrónicas mediante SMT.

Se desarrolló la base de conocimientos técnicos del proceso SMT requeridos en las etapas de conocimiento del proceso del sistema. Se elaboraron las etapas de conocimiento del proceso las cuales son: la tabla de tipos de defectos, la tabla de relación entre CTQs y defectos, los diagramas de pescado de defectos, las matrices de causa-efecto y los FMEAs. Todas estas son herramientas de ayuda y guías importantes que pueden ser utilizadas en la solución de problemas de calidad en este tipo de industria.

Se desarrolló el programa de computadora para el control de la operación de impresión de pasta a fin de realizar el control del proceso en tiempo real que minimice el tiempo y el dinero perdidos debido por ejemplo, a la atención de los problemas hasta el final del turno de trabajo.

El caso de aplicación desarrollado brindó la oportunidad de mostrar la utilidad de contar con una guía para proponer una solución a una situación problemática particular relacionada con la mejora del proceso de impresión de pasta de soldadura. Fue posible constatar la necesidad de considerar todos los detalles del modelo, como el análisis estadístico del sistema de medición.

Aunque varias de las manufactureras encuestadas utilizan el control estadístico del proceso, la mejora efectiva del proceso puede ser hallada cuando se utilizan herramientas estadísticas experimentales como diseño de experimentos y superficies de respuesta. Esta forma de intervención activa en el proceso permite hallar las condiciones óptimas de operación, además de ser más económica que los acercamientos tradicionales de experimentar con una variable a la vez.

## 5.2 RECOMENDACIONES

La encuesta llevada a cabo en la presente tesis permitió un acercamiento a las formas actuales de resolver los problemas de calidad de la industria de ensamble de tarjetas electrónicas por SMT en México. No obstante, a fin de contar con una muestra representativa que permita inferir con mayor certeza la situación actual de las empresas SMT mexicanas, se requiere aplicar la encuesta a un mayor número de empresas y especialmente en otras zonas del país donde también existe este tipo de industria.

En la fase de aplicación de encuestas quedó claro que muchas veces no se conocen los costos de retrabajo; sin embargo, dada la magnitud de los niveles del mismo cada empresa debería poseer un modelo que lo estime. La reducción de costos por conceptos de retrabajo y desperdicio se convertirán en criterios importantes para que las empresas mexicanas puedan mantener su posición en el mercado.

La base de conocimiento técnico del proceso SMT desarrollada puede ser detallada, profundizada y enriquecida en mayor grado y debe ser revisada y particularizada a cada empresa donde decida aplicarse el sistema planteado en el presente trabajo.

Con respecto al programa computacional, se requiere el continuar con su desarrollo para lograr que opere de manera efectiva mediante la utilización de la interfase electrónica propia para la adquisición directa de los datos de impresión de pasta a partir de los sistemas de medición con los cuales se decida operar. Un trabajo futuro a considerar consiste en ampliar el programa de tal forma que se atiendan las restantes operaciones SMT.

En el capítulo 3 se comentaron los elementos que constituyen una estrategia de inspección en SMT. Una línea de investigación que surge al respecto es la creación de un modelo para seleccionar las estrategias de inspección más adecuadas para una empresa, considerando las variables involucradas como son las operaciones SMT a inspeccionar, el equipo de inspección, la forma de muestreo, los tiempos de ciclo y cualquier otra variable que se considere importante en el desempeño de la calidad y la productividad en SMT.

Resultados importantes que influirán de manera positiva en la reducción de los costos derivados de la mala calidad se obtendrán cuando el énfasis y por lo tanto una mayor inversión sea hecha para controlar y mejorar la calidad del proceso, capacitar al personal en el conocimiento de las complejidades propias de SMT y entrenar a los involucrados en el uso de herramientas estadísticas para la mejora de la calidad del producto.

## ANEXO A. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD

Este anexo presenta definiciones así como pasos que deben seguirse en la aplicación de las siete herramientas básicas de calidad. El tema de los gráficos de control es expuesto de manera amplia considerando los distintos gráficos de atributos y variables que pueden ser utilizados. Se trata el tema del análisis del sistema de medición. Se explica el procedimiento a seguir para analizar la capacidad del proceso y también se describen la matriz de causa-efecto y el análisis de modos y efectos de falla del proceso. De forma somera son expuestas las metodologías de diseño de experimentos y de superficies de respuesta como medios de optimización.

### A.1 LAS SIETE HERRAMIENTAS BÁSICAS DE LA CALIDAD

El control estadístico de procesos (SPC) es un poderoso conjunto de herramientas para la solución de problemas, utilizadas para alcanzar la estabilidad del proceso y mejorar la capacidad mediante la reducción de la variabilidad. Las siete herramientas básicas del SPC son:

1. Diagramas de flujo
2. Histogramas
3. Hojas de verificación
4. Gráficos de Pareto
5. Diagramas de causa y efecto
6. Diagramas de dispersión
7. Gráficos de control

Estas siete herramientas principales deben ser ampliamente entendidas por la organización y usadas de manera rutinaria para identificar oportunidades de mejora y para asistir en la

reducción de la variabilidad y del desperdicio. Estas herramientas son una parte importante del SPC, pero ellas comprenden solamente los aspectos técnicos. Para el éxito en la aplicación de SPC, debe ser el deseo de todos los individuos en una organización el mejoramiento continuo de la calidad y la productividad.

De las siete herramientas citadas, el gráfico de control es la más sofisticada desde el punto de vista técnico. Fue desarrollada por Walter A. Shewhart en la década de los 20. El material presentado en los subtemas de este anexo A.1 es expuesto con amplio nivel de detalle en las referencias [24] y [25].

### **A.1.1 Diagramas de flujo**

Este tipo de diagrama es un método gráfico para desplegar la operación y la secuencia de un sistema. Permite un mejor entendimiento del proceso, define la extensión del proceso que será estudiado y facilita encontrar los factores que influyen en el proceso. Un diagrama de flujo de proceso puede especificar los siguientes aspectos:

1. De dónde vienen los materiales y las partes.
2. La secuencia en la cual los materiales y las partes son usados.
3. Las operaciones y secuencias que realiza el proceso.
4. Las pruebas e inspecciones realizadas.
5. El destino final de los materiales.
6. Cómo son manejados el desperdicio y el retrabajo.
7. Posibles puntos de acumulación por flujo.

### **A.1.2 Histogramas**

Una distribución de frecuencias es un arreglo de los datos observados por magnitud. Un histograma es un gráfico de las frecuencias observadas contra las magnitudes o los rangos de magnitud medidos en la característica de calidad de interés. El histograma presenta un despliegue visual de los datos en el cual se pueden ver de manera fácil tres propiedades:

1. Forma
2. Tendencia central
3. Dispersión

Cuando los datos son numerosos y se encuentran agrupados en rangos es muy útil considerar lo siguiente en la construcción del histograma:

1. Usar entre 4 y 20 rangos. Se obtiene información clara del histograma cuando se elige el número de rangos aproximadamente igual a la raíz cuadrada del número total de datos.
2. Hacer los rangos de un ancho uniforme.
3. Marcar el límite inferior para el primer rango justo por debajo del valor más pequeño de los datos.

### **A.1.3 Hojas de verificación**

En las etapas iniciales de la aplicación del SPC, llegará a ser necesario coleccionar datos históricos o actuales acerca del proceso a ser investigado. Una hoja de verificación es una manera fácil de recolectar datos, analizarlos de manera rápida y presentar los resultados. Una hoja típica podría indicar el número de defectos correspondientes a cada tipo de defecto con respecto a ciertos períodos de tiempo. Las hojas de verificación orientadas al tiempo son particularmente valiosas para advertir tendencias u otros patrones importantes.

Cuando se diseña una hoja de verificación, es importante clarificar específicamente el tipo de datos a ser coleccionados, la parte o el número de operación, la fecha, el analista y cualquier otra información útil en diagnosticar la causa de un pobre desempeño.

Un tipo especial de hoja de verificación es la hoja de verificación de sitio, también llamada diagrama de concentración de defectos y consiste en una fotografía o dibujo a detalle de la unidad producida, que muestra todas las vistas relevantes. Los tipos de defectos que se presentan son dibujados sobre la fotografía y es analizada para determinar la localización de los defectos sobre la unidad y proporcionar de esta manera información útil acerca de las causas potenciales de los defectos.

#### **A.1.4 Gráficos de Pareto**

Un diagrama de Pareto organiza los datos y permite enfocar acciones sobre los problemas más importantes. Un gráfico de Pareto es simplemente un histograma de datos de tipo atributos ordenados por categorías. Típicamente se grafican el porcentaje de defectos contra los tipos de defectos, sin embargo, bajo este esquema cuando se producen mejoras en el proceso y luego de construir el Pareto no es posible advertir en primera instancia el efecto de dicha mejora; por lo cual se recomienda graficar el número total de defectos más bien que el porcentaje de defectos o bien es preferible el porcentaje del número original de defectos.

Para el caso de un gráfico de Pareto de defectos, no se identifican en él directamente los defectos más importantes, sino aquellos más frecuentes. Cuando la lista de defectos contiene una mezcla de aquellos que podrían traer consecuencias extremadamente serias y otros de menor importancia, uno de los dos métodos siguientes pueden ser utilizados:

1. Usar un esquema de ponderación para modificar el conteo de frecuencias.
2. Acompañar el análisis del gráfico de Pareto de frecuencias con un gráfico de Pareto de costos.

Una vez identificados los defectos más frecuentes o bien los más costosos, deberán éstos ser primeramente atacados.

#### **A.1.5 Diagramas de causa y efecto**

Cuando un defecto, o error, o problema ha sido identificado y aislado, se debe iniciar el análisis de las causas potenciales de este efecto indeseable. En situaciones donde las causas no son obvias, el diagrama de causa y efecto, también llamado gráfico de pescado, es una herramienta formal, frecuentemente usada en la búsqueda de causas potenciales. Los pasos a seguir en la construcción de un diagrama de causa y efecto son los siguientes:

1. Definir el problema o efecto a ser analizado. De preferencia cuantificar el efecto a fin de apreciar la mejora después de la toma de acciones.



2. Formar el equipo de trabajo para desarrollar el análisis.
3. Dibujar la caja del efecto y la línea central.
4. Especificar las categorías potenciales de causas mayores y unir las como cajas conectadas a la línea central. Estas causas mayores pueden ser las 6Ms: Materiales, máquinas, mano de obra, métodos, medición y medio ambiente.
5. Identificar las posibles causas y clasificarlas dentro de las categorías especificadas en 4. Crear nuevas categorías si es necesario. Asignar valores numéricos tanto como sea posible.
6. Jerarquizar las causas para identificar aquellas que parecen ser las que más afectan en el problema. En este punto se puede hacer uso de un diagrama de Pareto, o bien someter la jerarquización de las causas a juicio del equipo de trabajo mediante votación.

#### **A.1.6 Diagramas de dispersión**

El diagrama de dispersión es una gráfica útil para identificar una relación potencial entre dos variables. Los datos son recolectados en pares sobre dos variables ( $x$ ,  $y$ ) para  $i = 1, 2, \dots, n$  datos. Entonces  $y_i$  es graficado contra la correspondiente  $x_i$ . La forma de la dispersión a menudo indica que tipo de relación puede existir entre las dos variables. No es correcto concluir causalidad directamente de la observación de un patrón definido en un diagrama de dispersión; el diagrama es de utilidad para identificar una relación potencial, debe ser usado un diseño de experimentos para verificar causalidad.

## **A.2 GENERALIDADES DE UN GRÁFICO DE CONTROL**

Gran parte de los temas tratados en esta sección A.2, en las A.3 y A.4 fueron abordados tomando información expuesta por el Dr. Douglas C. Montgomery en su libro *Introduction to Statistical Quality Control* [26]. Una guía rápida para decidir qué gráfico de control utilizar se presenta en la figura A.1.

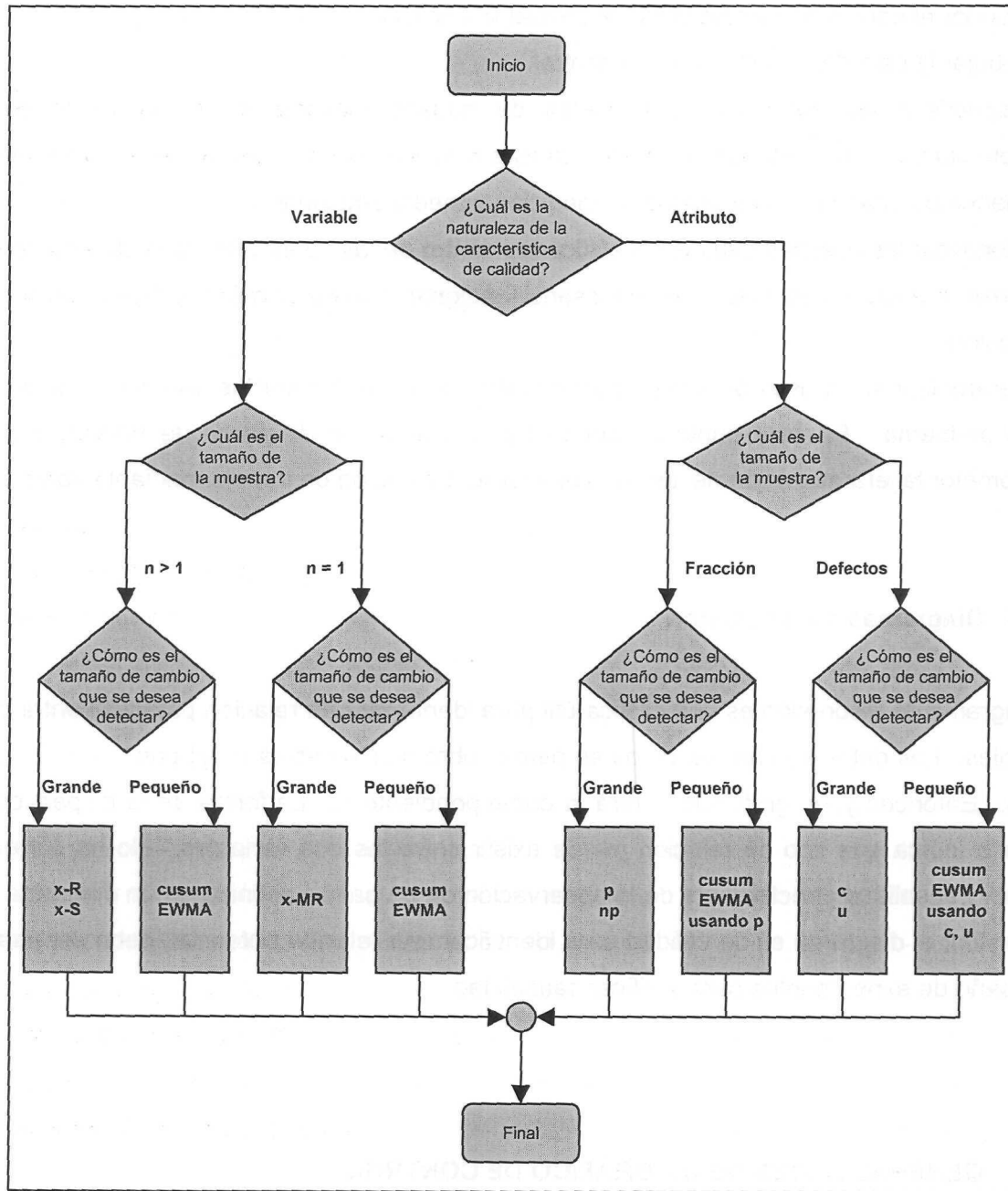


Figura A.1. Guía para la selección de un gráfico de control.

### A.2.1 Causas comunes y asignables de variación de la calidad

En un proceso de producción, siempre existirá una cierta cantidad inherente de variabilidad natural. Esta variabilidad natural es el efecto acumulado de muchas, pequeñas e inevitables causas llamadas causas comunes. Otra clase de variabilidad que puede presentarse por causas bien definidas como el inadecuado ajuste de las máquinas, errores de los operadores o materia prima defectuosa; estas causas bien definidas son llamadas asignables y un proceso que opera bajo estas causas se dice que está fuera de control.

El propósito fundamental de un gráfico de control es precisamente establecer la diferencia entre causas comunes y asignables. Cuando el proceso se halla sujeto sólo a causas comunes se dice que está en control estadístico, por otro lado, cuando se presentan causas asignables el gráfico de control mostrará un comportamiento característico que según el criterio básico se reflejará por la presencia de uno o más puntos fuera de los límites de control del gráfico, en estas circunstancias se afirma que el proceso está fuera de control estadístico.

### A.2.2 Errores tipo I y II

Como parte importante del desempeño de un gráfico de control es de utilidad considerar la probabilidad de los errores tipo I y tipo II. La probabilidad de error tipo I (error tipo  $\alpha$ ) de un gráfico de control consiste en concluir que el proceso está fuera de control cuando realmente está en control; es también llamado una falsa alarma y su valor es el valor de  $Z_{\alpha/2}$  que corresponde a la amplitud elegida para los límites de control si se considera que los datos se distribuyen normalmente. La probabilidad del error tipo II (error tipo  $\beta$ ) de un gráfico de control consiste en concluir que el proceso está en control cuando está realmente fuera de control. Para obtener este tipo de error es útil la construcción de la curva característica de operación (curva OC). Esta curva indica la habilidad del gráfico de control en detectar cambios de diferentes magnitudes en el proceso.

### A.2.3 Tamaño de la muestra y frecuencia de muestreo

En el diseño de los gráficos de control se deben especificar el tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo. En general tamaños de muestras más grandes harán más fácil detectar pequeños cambios en el proceso. La situación más deseable para detectar cambios en el proceso es tomar muestras grandes muy frecuentemente, sin embargo, esto no es económicamente factible. Se debe decidir entonces, entre tomar pequeñas muestras en intervalos cortos de tiempo o tomar muestras más grandes en más grandes intervalos.

Otra manera de evaluar las decisiones relativas al tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo es por medio del largo de corrida promedio (ARL). El ARL es el número promedio de puntos que serán graficados antes de que un punto indique una condición fuera de control. Para cualquier gráfico de control de Shewhart el ARL puede ser obtenido de la siguiente manera:

$$ARL = \frac{1}{\rho} \quad (A.1)$$

Donde:

$\rho$  = Probabilidad de que algún punto exceda los límites de control

En ocasiones es conveniente expresar el desempeño del gráfico de control en términos del tiempo promedio de señal (ATS). Si las muestras son tomadas en intervalos de tiempo expresadas en horas  $h$ , entonces:

$$ATS = ARLh \quad (A.2)$$

### A.2.4 Grupos subracionales

Un concepto fundamental en el uso de los gráficos de control es la recolección de las muestras de acuerdo a lo que Shewhart llamó el grupo subracional. El concepto de grupos

subracionales significa que los subgrupos de muestras deben ser seleccionados de tal manera que si las causas asignables están presentes, la oportunidad de diferencias entre los subgrupos sea maximizada, mientras la oportunidad de diferencias debido a estas causas asignables dentro de un subgrupo sea minimizada.

### **A.2.5 Reglas de sensibilidad para los gráficos de control**

Varios criterios pueden ser aplicados simultáneamente a un gráfico de control para determinar si el proceso está fuera de control. El criterio básico es que uno o más puntos se encuentren fuera de los límites de control. Los criterios suplementarios son algunas veces usados para incrementar la sensibilidad de los gráficos de control a pequeños cambios en el proceso y de esta manera responder en forma rápida a la presencia de causas asignables. Algunas de las reglas de sensibilidad que son ampliamente usadas en la práctica son las siguientes:

1. La presencia de uno o más puntos fuera de los límites de control.
2. Dos de tres puntos consecutivos caen fuera de los límites  $2\sigma$  de advertencia, pero dentro de los límites de control.
3. Cuatro de cinco puntos consecutivos se grafican más allá del límite de  $1\sigma$ .
4. Una corrida de ocho puntos consecutivos se grafican a un mismo lado de la línea central.
5. Se presenta un inusual o no aleatorio comportamiento en los datos graficados.

Algunos patrones característicos de un proceso que se encuentra afectado por causas asignables son los siguientes:

1. Ciclos: Este comportamiento resulta de cambios sistemáticos en el ambiente, tales como, temperatura, fatiga del operador, rotación regular de operadores y/o máquinas o fluctuaciones en alguna variable en la maquinaria y equipo de producción.
2. Mezclas: Se caracterizan por la presencia de puntos muy cercanos a los límites de control con pocos puntos cercanos a la línea central. Pueden resultar de ajustes frecuentes al proceso como respuesta a variaciones aleatorias más bien que a causas asignables; o cuando el producto proviene de varias fuentes.

3. Cambios en el nivel del proceso: Pueden resultar de la introducción de nuevos trabajadores, métodos, materiales, máquinas, cambios en los métodos de inspección, cambios en las habilidades o motivación de los operadores.
4. Tendencia: Se debe generalmente a un uso gradual o deterioración de una herramienta o algunos otros componentes críticos del proceso. También puede deberse a factores humanos como la fatiga del operador o la presencia de supervisión.
5. Estratificación: Se manifiesta por la tendencia de los puntos a agruparse artificialmente alrededor de la línea central. Son causas posibles, una incorrecta determinación de los límites de control, o cuando el muestreo utilizado colecciona una o más unidades de distribuciones diferentes en cada subgrupo racional.

### A.3 GRÁFICOS DE CONTROL PARA VARIABLES

Una característica de calidad que es medida sobre una escala numérica es llamada una variable. En el proceso de manufactura electrónica algunas características de calidad del producto o del proceso pueden ser expresadas en términos de una medición numérica. Por ejemplo, la altura de la pasta aplicada en el proceso de inspección o la temperatura máxima alcanzada en el reflujo de la soldadura.

Cuando la característica de interés es una variable, es necesario monitorear el valor medio de la característica de calidad y su variabilidad. El control de la media del nivel de calidad se efectúa generalmente con el gráfico de control para medias, también llamado el gráfico  $\bar{x}$ . Típicamente, la variabilidad del proceso puede ser monitoreada mediante un gráfico de control para el rango, llamado el gráfico R, o un gráfico de control para la desviación estándar, llamado el gráfico S.

#### A.3.1 Gráficos de control para $\bar{x}$ y S

Es preferible obtener la desviación estándar directamente en lugar de estimarla mediante el uso del rango que es como tradicionalmente se hace en la construcción de los gráficos de

control para variables. Es por eso que si bien se requiere un poco más de cálculo se prefiere el uso de los gráficos  $\bar{x}$  y S, además son de mayor utilidad en comparación con los gráficos  $\bar{x}$  y R bajo las siguientes condiciones:

1. El tamaño de la muestra  $n$  es moderadamente grande, es decir cuando  $n > 10$ .
2. El tamaño de la muestra  $n$  es variable.

Supongamos que una característica de calidad está normalmente distribuida con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ , donde  $\mu$  y  $\sigma$  son conocidas. Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  es una muestra de tamaño  $n$ , entonces el promedio de esta muestra es:

$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (\text{A.3})$$

y sabemos que  $\bar{x}$  está normalmente distribuida con media  $m$  y desviación estándar  $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$ . El intervalo de confianza  $1-\alpha$  para la media de la muestra está dado por la siguiente expresión:

$$\mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.4})$$

Por consiguiente si  $m$  y  $s$  son conocidas. La ecuación anterior puede ser usada para obtener los límites superior e inferior de los gráficos de control para medias muestrales. Si se usa el criterio de  $3\sigma$  para establecer los límites de control se puede reemplazar  $Z_{\alpha/2}$  por 3. Las expresiones establecidas hasta aquí son bajo el supuesto de que la distribución de la característica de calidad es normal. Sin embargo, estos resultados son aproximados pero todavía válidos si la distribución no es normal. Varios autores han investigado el efecto de asumir normalidad en el uso de los gráficos de control. Burr afirmó que los límites de control establecidos bajo el supuesto de normalidad son muy robustos y pueden ser empleados a menos que la población se desvíe extremadamente de un comportamiento normal [27].

En la práctica, nosotros usualmente no conocemos  $\mu$  y  $\sigma$ . Por consiguiente estos parámetros deben ser estimados a partir de muestras preliminares o subgrupos tomados

cuando el proceso está en control. Estos estimados deben estar basados sobre al menos 20 o 25 muestras. Supongamos que  $m$  muestras están disponibles, cada una con  $n$  observaciones de la característica de calidad. Típicamente,  $n$  será pequeño, a menudo 4, 5 o 6 por los altos costos generados por concepto de muestreo e inspección. Denotemos que  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$  sean el promedio de cada muestra. Entonces, el mejor estimador de  $\mu$ , que a su vez será usado como la línea central sobre el gráfico  $\bar{x}$  está dado por:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (\text{A.5})$$

Para construir los límites de control de este gráfico, se requiere un estimador de la desviación estándar  $\sigma$ , obtenido a partir del análisis de datos. Supóngase que  $m$  muestras preliminares están disponibles, cada una de tamaño  $n$ , y denótese  $S_i$ , la desviación estándar de la muestra  $i$ . El promedio de la desviación estándar es:

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \quad (\text{A.6})$$

El estadístico  $\bar{S}/c_4$  es un estimador insesgado de  $s$ . Por consiguiente los límites de control para el correspondiente gráfico  $\bar{x}$  son:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{\bar{x}} + \frac{3\bar{S}}{c_4\sqrt{n}} \\ \text{Línea central} &= \bar{\bar{x}} \\ \text{LCL} &= \bar{\bar{x}} - \frac{3\bar{S}}{c_4\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Los parámetros para el gráfico S son los siguientes:



$$\begin{aligned}
 UCL &= \bar{S} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2} \\
 \text{Línea central} &= \bar{S} \\
 LCL &= \bar{S} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}
 \end{aligned}
 \tag{A.8}$$

El valor de  $c_4$  está dado a su vez por la expresión:

$$c_4 = \left( \frac{2}{n-1} \right)^{1/2} \frac{\Gamma(n/2)}{\Gamma[(n-1)/2]}
 \tag{A.9}$$

### A.3.2 Gráficos de control $\bar{x}$ y $\bar{S}$ con tamaños de muestra variable

En este caso se deben utilizar promedios ponderados para calcular  $\bar{\bar{x}}$  y  $\bar{\bar{S}}$ . Si  $n_i$  es el número de observaciones en la muestra  $i$ , entonces se usan las ecuaciones (A.10) y (A.11) para obtener  $\bar{\bar{x}}$  y  $\bar{\bar{S}}$  respectivamente.

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^m n_i}
 \tag{A.10}$$

$$\bar{\bar{S}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) S_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m} \right]^{1/2}
 \tag{A.11}$$

### A.3.3 Gráficos de control para $\bar{x}$ y R

Los gráficos para identificar el estado de control de un proceso tradicionalmente usados son los gráficos  $\bar{x}$  y R. Para el caso del gráfico  $\bar{x}$ , el mejor estimador de  $\mu$  estará dado por la ecuación (A.5). El rango para cada muestra tomada será igual a la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, como lo muestra la ecuación (A.12). El promedio del rango para las m muestras tomadas será obtenido por la ecuación (A.13).

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (\text{A.12})$$

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (\text{A.13})$$

Los límites de control para el gráfico  $\bar{x}$  son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{x} + \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} \\ \text{Línea central} &= \bar{x} \\ \text{LCL} &= \bar{x} - \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Los límites de control para el gráfico R se obtienen según la ecuación (A.15), mostrada a continuación:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \\ \text{Línea central} &= \bar{R} \\ \text{LCL} &= \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Las constantes  $d_2$  y  $d_3$  de las ecuaciones (A.14) y (A.15) dependen del tamaño de la muestra seleccionada. Los valores de estas constantes para distintos tamaños de muestra se dan en el anexo C.2.

### A.3.4 Gráfico de control para mediciones individuales

Cuando el tamaño de la muestra de la característica de calidad es 1, en el gráfico de control para la media de la característica de calidad de interés se registrarán de manera directa los resultados de las mediciones de las unidades inspeccionadas. El gráfico de control para las mediciones individuales estará caracterizado por los parámetros dados en la ecuación (A.16), para el valor  $d_2$  que corresponda a 2 observaciones.

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \\ \text{Línea central} &= \bar{x} \\ \text{LCL} &= \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

El movimiento en el rango, o el rango entre dos observaciones sucesivas es definido como:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (\text{A.17})$$

Para controlar la variabilidad de esta característica de calidad se requiere utilizar el gráfico del movimiento en el rango; en dicho gráfico como su nombre lo indica se registran los rangos entre dos observaciones sucesivas. Los límites de control y la línea central de un gráfico de movimiento en el rango están dados por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= D_4 \overline{MR} = (3.267) \overline{MR} \\ \text{Línea central} &= \overline{MR} = \sum_{i=1}^m MR_i \\ \text{LCL} &= D_3 \overline{MR} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Los valores de  $D_3$  y  $D_4$  dependen del número de observaciones que para este caso es igual a 2.

### A.3.5 Gráfico de control de suma acumulada

Los gráficos de control de  $\bar{x}$  (gráficos de Shewart) son muy efectivos para detectar los cambios en las medias si estas son mayores a  $1.5 \sigma$ , pero no si son cambios pequeños. En este caso, el gráfico de control de suma acumulada (cusum) es una buena alternativa.

El gráfico cusum incorpora directamente toda la información en la secuencia de los valores de las muestras mediante la obtención de una gráfica de las sumas acumuladas de las desviaciones de los valores de las muestras de un valor meta. Sean las muestras de tamaño  $n \geq 1$ ,  $\bar{x}_j$  es el promedio de la muestra  $j$ . Si  $\mu_0$  es la meta para la media del proceso, el gráfico cusum se construye graficando la cantidad  $C_i$  contra la muestra  $i$ . La suma acumulada  $C_i$  se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (\text{A.19})$$

Para monitorear la media de un proceso es recomendable utilizar el cusum tabular. Este método opera acumulando derivaciones de  $\mu_0$  que están sobre la meta con un estadístico  $C^+$  y acumulando derivaciones de  $\mu_0$  que están bajo la meta con otro estadístico  $C^-$ . Los estadísticos  $C^+$  y  $C^-$  son llamados cusums unilaterales superior e inferior respectivamente. Si consideramos el caso cuando  $n = 1$  que es muy frecuente en la utilización de los gráficos cusum, los estadísticos se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} C_i^+ &= \max\left[0, x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+\right] \\ C_i^- &= \max\left[0, (\mu_0 - K) - x_i + C_{i-1}^-\right] \\ C_0^+ &= C_0^- = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

$K$  es usualmente llamado el valor de referencia, y es a menudo elegido como la media de la media meta  $\mu_0$  y el valor de la media fuera de control  $\mu_1$  que se está interesado en detectar de manera pronta, es decir:

$$K = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} \quad (\text{A.21})$$

Si  $C_i^+$  o  $C_i^-$  exceden el intervalo de decisión  $H$ , se considera que el proceso está fuera de control. Un razonable valor para  $H$  es 5 veces la desviación estándar del proceso. En las tablas construidas bajo este método, las cantidades  $N^+$  y  $N^-$  indican el número de períodos consecutivos que los cusums  $C_i^+$  o  $C_i^-$  han tomado valores diferentes a cero. La muestra que corresponda a la diferencia entre el cusum que exceda el intervalo y la cantidad  $N^+$  o  $N^-$  según corresponda indicará el número de muestra en la que el cambio en la media ocurrió.

En situaciones donde un ajuste a alguna variable manipulable es requerida con el fin de traer el proceso al valor meta  $\mu_0$ , es de utilidad tener un estimado de la nueva media del proceso como consecuencia del cambio. Esto puede ser obtenido de la forma mostrada en la ecuación (A.22).

$$\hat{\mu} = \begin{cases} \mu_0 + K + \frac{C_i^+}{N^+}, & \text{si } C_i^+ > H \\ \mu_0 - K - \frac{C_i^-}{N^-}, & \text{si } C_i^- > H \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

El cusum tabular es diseñado para elegir el valor de referencia  $K$  y el intervalo de decisión  $H$ . Se recomienda que estos parámetros sean seleccionados para proveer un adecuado ARL, lo que se busca es maximizar  $ARL_0$  y minimizar  $ARL_1$ . Para ello se recomienda definir  $H = h\sigma$  y  $K = k\sigma$ . Si se usa un valor de  $h = 4$  o  $h = 5$  y  $k = 1/2$ , generalmente se obtendrá un cusum con un comportamiento adecuado del ARL cuando el cambio en la media del proceso sea de  $1\sigma$ .

Dado que los cusums son generalmente utilizados para observaciones individuales, el procedimiento debido a Hawkins es de gran utilidad [28]. Se asume que  $x_i$  está normalmente distribuida, con media  $\mu_0$  y desviación estándar  $\sigma$ . El estandarizado valor de  $x_i$  es  $y_i = (x_i - \mu_0)/\sigma$ . Hawkins sugiere crear una nueva cantidad estandarizada dada por (A.23). Como la distribución en estado de control de  $v_i$  es aproximadamente una normal estándar, dos desviaciones estandarizadas cusum pueden ser establecidas según lo muestra la expresión (A.24)

$$v_i = \frac{\sqrt{|y_i|} - 0.822}{0.349} \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \max\left[0, v_i - k + S_{i-1}^+\right] \\ S_i^- &= \max\left[0, -k - v_i + S_{i-1}^-\right] \\ S_0^+ &= S_0^- = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

### A.3.6 Gráfico de control de promedio en movimiento exponencialmente ponderado

El gráfico de control de promedio en movimiento exponencialmente ponderado (EWMA), es otra alternativa para detectar cambios pequeños en la media del proceso. El promedio en movimiento exponencialmente pesado es definido por:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (\text{A.25})$$

El valor de  $\lambda$  es una constante entre 0 y 1 y el valor inicial es la media que se quiere en el proceso, de esta manera  $z_0 = \mu_0$ . Dado que el EWMA puede ser visto como un promedio ponderado de todas las pasadas y presentes observaciones, es muy insensible al supuesto de normalidad. Además es un gráfico de control ideal para utilizarse con observaciones individuales.

El EWMA es construido graficando  $z_i$  contra el número de muestra  $i$ . La línea central y los límites de control para cada muestra  $i$  se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} \left[1 - (1-\lambda)^{2i}\right]} \\ \text{CL} &= \mu_0 \\ \text{LCL} &= \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} \left[1 - (1-\lambda)^{2i}\right]} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

Se requieren elegir los parámetros  $\lambda$  y  $L$  de manera que se obtenga un valor adecuado para  $ARL_0$  y  $ARL_1$ . En general, valores de  $\lambda$  entre 0.05 y 0.25 trabajan bien en la práctica, una buena regla es usar pequeños valores de  $\lambda$  para detectar cambios pequeños en la media. Por otro lado  $L = 3$  es un adecuado valor para valores altos de  $\lambda$ , aunque para valores menores, es decir menores de 0.1 lo más recomendable es utilizar valores de  $L$  entre 2.6 y 2.8.

Si consideramos al igual que en los casos anteriores que  $x_i$  se distribuye normalmente con media  $m$  y desviación estándar  $s$ , el promedio exponencialmente ponderado del error medio cuadrado (EWMS) está definido por:

$$S_i^2 = \lambda(x_i - z_i)^2 + (1 - \lambda)S_{i-1}^2 \quad (\text{A.27})$$

Si se representa el valor meta de la desviación estándar en estado de control, es posible graficar  $\sqrt{S_i^2}$  sobre una raíz exponencialmente ponderada del error medio cuadrado o gráfico de control EWRMS con límites dados por:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi^2_{v, \alpha/2}}{v}} \\ \text{LCL} &= \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi^2_{v, 1-\alpha/2}}{v}} \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

### A.3.7 Límites de control de prueba

Cuando se utilizan muestras para construir los gráficos de control, es común tratar los límites como límites de control de prueba; con el propósito de determinar que el proceso estaba en control cuando las  $m$  muestras iniciales fueron seleccionadas. Para probar la hipótesis del estado de control en el pasado, se deben graficar los valores de cada muestra sobre los gráficos correspondientes y analizar los resultados desplegados. Si todos los puntos se ubican dentro de los límites de control y ningún comportamiento sistemático es evidente, entonces se concluye que el proceso estaba en control en el pasado, y que los límites de control de prueba son adecuados para controlar la producción presente y futura.

Supóngase que uno o más de los valores de alguno de los gráficos para la media y la variación se encuentran ubicados fuera de los límites de control cuando se comparan con los límites de control de prueba. En este caso la hipótesis de control en el pasado es rechazada y es necesario revisar estos límites. Esto se realiza mediante el análisis de los puntos ubicados fuera de los límites de control para relacionarlos con una causa asignable. Si una causa asignable es hallada, el punto es descartado, y los límites de control son recalculados, usando solamente los puntos restantes. Luego estos puntos restantes son examinados para verificar el estado de control. Este procedimiento se aplica hasta que todos los puntos graficados están en control.

En algunas ocasiones, cuando las muestras iniciales son graficadas contra los límites de control de prueba, muchos puntos estarán fuera de control de proceso. Cuando esto ocurre lo mejor es concentrarse en la tendencia formada por los puntos. Generalmente, las causas asignables asociadas con estas tendencias son fáciles de identificar. Si se elimina la causa asignable así identificada, es posible obtener un proceso en estado de control o más cercano a este estado.

En la interpretación de las tendencias en el gráfico  $\bar{x}$  debemos determinar primeramente si el gráfico S o R está en estado de control. Si los dos gráficos, el de la media y la variación del proceso, exhiben un comportamiento no aleatorio, la mejor estrategia es eliminar primero las causas asignables que afectan el gráfico S o R. Nunca se debe buscar una interpretación en las tendencias del gráfico  $\bar{x}$  cuando el gráfico S o R indica una condición fuera de control.

### **A.3.8 La función característica de operación**

La habilidad de los gráficos de control para detectar cambios en la calidad de los procesos es descrita por sus curvas características de operación (curvas OC). Si consideramos la curva OC para un gráfico  $\bar{x}$  con la desviación estándar  $\sigma$  conocida y constante. Si la media cambia de un valor  $\mu_0$ , a otro valor  $\mu_1 = \mu_0 + k\sigma$ , la probabilidad de no detectar este cambio en la primer muestra (riesgo  $\beta$ ) está dado por:



$$\beta = P\{LCL \leq \bar{x} \leq UCL \mid \mu = \mu_1 = \mu_0 + k\sigma\} \quad (A.29)$$

Luego de desarrollar queda como:

$$\beta = \phi(L - k\sqrt{n}) - \phi(-L - k\sqrt{n}) \quad (A.30)$$

Donde  $k$  es el valor de  $Z_{\alpha/2}$  seleccionado y  $\phi$  es la distribución acumulada de la función normal estándar. Utilizando la ecuación (A.30) se obtienen las curvas OC de riesgo ( $\beta$ ) contra el número de desviaciones estándar de desvío ( $k$ ) con respecto a la media en estado de control para distintos tamaños de muestra  $n$ .

### A.3.9 El tamaño de corrida promedio para el gráfico $\bar{x}$

El número esperado de muestras a tomar antes de que un cambio sea detectado es el tamaño de corrida promedio ( $ARL_1$ ), que viene dado como:

$$ARL_1 = \frac{1}{1 - \beta} \quad (A.31)$$

Por otro lado, el número esperado de muestras a tomar hasta que se presente una falsa alarma ( $ARL_0$ ), está relacionada con la probabilidad de error tipo I (error tipo  $\alpha$ ) y queda expresada como:

$$ARL_0 = \frac{1}{\alpha} \quad (A.32)$$

Dos medidas basadas en el ARL son de interés. La primera de ellas es el promedio de tiempo para detectar una señal (ATS) generada en el gráfico de control, si las muestras son tomadas en intervalos de tiempo igualmente espaciados ATS será determinada por la ecuación (A.2).

También puede ser útil expresar el ARL en términos del número esperado de individuos ( $I$ ), en lugar del número de muestras tomadas para detectar un cambio. Si el tamaño de la muestra es  $n$ , la relación entre  $I$  y ARL es:

$$I = n\text{ARL} \quad (\text{A.33})$$

## A.4 GRÁFICOS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS

Tres de los más utilizados gráficos de control para atributos son el gráfico de control para fracción no conforme que monitorea los productos defectuosos fabricados (gráfico  $p$ ), el gráfico de control para no conformidades basado en los defectos observados (gráfico  $c$ ) y el gráfico de control para no conformidades por unidad (gráfico  $u$ ).

Los gráficos para atributos no proporcionan tanta información como los gráficos para variables, sin embargo son de gran utilidad cuando las características de calidad no son fácilmente medibles en una escala numérica.

### A.4.1 Gráfico de control $p$

La fracción no conforme es definida como la razón del número de artículos no conforme en una población al número de artículos totales de esa población. Los principios estadísticos detrás del gráfico de control para fracción no conforme están basados en la distribución binomial, donde  $p$  es la probabilidad de encontrar un producto no conforme en una muestra de tamaño  $n$  y  $D$  es el número de unidades defectuosas (ecuación A.34).

$$P\{D = x\} = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad x = 0, 1, \dots, n \quad (\text{A.34})$$

Supongamos que se conoce la fracción no conforme  $p$  en cierto proceso o es un valor estándar especificado por la administración. Entonces la línea central y los límites de control para el gráfico de fracción no conforme están dados por:

$$\begin{aligned} UCL &= p + 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \\ CL &= p \\ LCL &= p - 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \end{aligned} \quad (A.35)$$

La operación del gráfico de control consistirá en tomar muestras de  $n$  unidades, obteniendo el valor del número de unidades no conformes  $D$ , para calcular finalmente la fracción no conforme de la muestra ( $\hat{p}$ ) definida por:

$$\hat{p} = \frac{D}{n} \quad (A.36)$$

Los valores de  $\hat{p}$  obtenidos para las muestras tomadas deberán registrarse sobre el gráfico de control. Si los puntos  $\hat{p}$  se encuentran dentro de los límites de control y muestran un comportamiento aleatorio, podemos concluir que el proceso está en estado de control.

Cuando la fracción no conforme del proceso  $p$  no es conocida, debe ser estimada de los datos observados. El procedimiento consiste en tomar  $m$  muestras de tamaño  $n$ . Entonces, si hay  $D_i$  unidades no conformes en la muestra  $i$ , se estima la fracción no conforme  $p$  mediante el estadístico  $\bar{p}$ , según lo muestra la ecuación A.37.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{mn} \quad (A.37)$$

El gráfico para fracción no conforme tiene tres parámetros que deben ser especificados: el tamaño de la muestra ( $n$ ), la frecuencia de muestreo y la separación de los límites de control ( $L$ ). En cuanto al valor de  $L$  usualmente se le asigna el valor de 3, por el criterio de  $3\sigma$ , dado que se ha observado que opera bien en la práctica. Varias reglas han sido sugeridas

para la elección de  $n$ ; si  $p$  es muy pequeña se debe elegir un valor de  $n$  suficientemente grande para tener una alta probabilidad de que halla al menos una unidad no conforme en la muestra tomada.

Duncan sugirió una relación para determinar el tamaño de  $n$ , dado un  $\delta$  cambio en la fracción no conforme [29]. Este criterio se basa en la elección de un tamaño de muestra  $n$  suficientemente grande para que se tenga aproximadamente un 50% de probabilidad en detectar el cambio en el proceso según lo muestra la ecuación 6.38.

$$n = \left(\frac{L}{\delta}\right)^2 p(1-p) \quad (\text{A.38})$$

Otra alternativa es elegir un tamaño  $n$  suficientemente grande para que el gráfico de control tenga un límite inferior de control positivo, la ecuación para obtener este tamaño  $n$  es la A.39. Esto asegura que se tendrá un mecanismo para investigar una o más muestras que contengan un poco usual número pequeño de productos no conformes.

$$n > \frac{(1-p)L}{p} \quad (\text{A.39})$$

#### A.4.2 Gráfico de control $np$

En ocasiones la construcción del gráfico de control se basa en el número de productos no conformes. Este gráfico de control es llamado comúnmente  $np$ . Los parámetros de este gráfico se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= np + 3\sqrt{np(1-p)} \\ \text{LC} &= np \\ \text{LCL} &= np - 3\sqrt{np(1-p)} \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

### A.4.3 Gráfico de control $p$ para tamaño de muestra variable

Una de las formas que existen para obtener un gráfico de control para muestra variable, consiste en determinar límites de control para cada muestra individual de diferente tamaño de muestra. Si la muestra  $i$  es de tamaño  $n_i$ , los parámetros de control se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= p + 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n_i}} \\ \text{CL} &= p \\ \text{LCL} &= p - 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n_i}} \end{aligned} \quad (\text{A.41})$$

### A.4.4 Gráfico de control $c$

Los gráficos de control que pueden establecerse para defectos, son para el número total de no conformidades en una unidad o el número promedio de no conformidades por unidad. Estos gráficos de control asumen que la ocurrencia de no conformidades en las muestras es modelada de manera adecuada por la distribución Poisson.

Si se considera que la ocurrencia de no conformidades en una unidad de producto inspeccionado sigue una distribución Poisson con  $x$  representando el número de no conformidades y  $c$  el valor esperado de no conformidades tenemos que

$$p(x) = \frac{e^{-c}c^x}{x!} \quad x = 0,1,2,\dots \quad (\text{A.42})$$

Por consiguiente un gráfico de control para no conformidades con límites de control  $3\sigma$  se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= c + 3\sqrt{c} \\ \text{CL} &= c \\ \text{LCL} &= c - 3\sqrt{c} \end{aligned} \quad (\text{A.43})$$

#### A.4.5 Gráfico de control $u$

En ocasiones se decide construir los gráficos de control para defectos basados en un tamaño de muestra de  $n$  unidades de inspección. Si se encuentra el número total de no conformidades  $c$  en una muestra de  $n$  unidades de inspección, entonces el número promedio de no conformidades por unidades de inspección se halla por:

$$u = \frac{c}{n} \quad (\text{A.44})$$

Los parámetros de este gráfico de control se obtienen mediante:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \\ \text{CL} &= \bar{u} \\ \text{LCL} &= \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

#### A.4.6 Gráfico de control para muestras de tamaño variable

Cuando el tamaño de muestras no es constante, se debe usar un gráfico de control para no conformidades por unidad (gráfico  $u$ ). En este gráfico de control la línea central será constante, sin embargo los límites de control variarán dependiendo del tamaño de la muestra tomada. Los parámetros de este gráfico serán los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}} \\ \text{CL} &= \bar{u} \\ \text{LCL} &= \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}} \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

#### A.4.7 Cálculo de la función de la característica de operación y del tamaño promedio de corrida

Para obtener la curva OC se requiere obtener la probabilidad de error tipo II (error tipo  $\beta$ ) cuyo cálculo está basado en la distribución binomial.

$$\beta = P\{D < nUCL \mid p\} - P\{D \leq nLCL \mid p\} \quad (A.47)$$

En la curva OC se graficarán los valores de  $\beta$  correspondientes a fracciones no conformes  $p$  entre 0 y 1.

La forma de obtener los ARL se efectúa de manera similar al caso de los gráficos de control para variables.

Las curvas características de operación (OC) para los gráficos  $c$  y  $u$  se obtienen a partir de la distribución Poisson. Para el gráfico de control  $c$ , la OC grafica la probabilidad del error tipo II ( $\beta$ ) contra la media real del número de defectos  $c$ .  $\beta$  es obtenido de la siguiente manera:

$$\beta = P\{x < UCL \mid c\} - P\{x \leq LCL \mid c\} \quad (A.48)$$

Para el gráfico  $u$ , la OC muestra la probabilidad del error tipo II para distintos valores del número promedio de unidades defectuosas por unidad de inspección  $u$ .  $\beta$  es obtenido de la siguiente manera:

$$\beta = P\{x < UCL \mid u\} - P\{x \leq LCL \mid u\} \quad (A.49)$$

## A.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Un aspecto importante a considerar en la determinación de la variación total de las mediciones realizadas, es la contribución que tiene la variación del sistema de medición utilizado. Un análisis del sistema de medición permite conocer las propiedades estadísticas de repetibilidad, reproducibilidad, exactitud y estabilidad. Las técnicas utilizadas para un análisis del sistema de medición son llamadas de manera colectiva, medición R&R. Con el propósito de dejar en claro algunos términos utilizados en el análisis de un sistema de medición se citan a continuación sus definiciones [23]:

**Precisión:** Se le conoce también con el nombre de sesgo; es la diferencia entre el promedio de mediciones y el valor de referencia.

**Repetibilidad:** Es la variación en las mediciones obtenidas con un instrumento de medición, cuando es usado varias veces por un operador mientras se mide la característica de interés sobre la misma parte.

**Reproducibilidad:** Es la variación en el promedio de las mediciones hechas por diferentes operadores cuando usan el mismo instrumento de medición en la determinación de la característica de interés sobre la misma parte.

**Por ciento de R&R:** Es el porcentaje de la variación del proceso relacionada al sistema de medición para repetibilidad y reproducibilidad.

**Estabilidad:** Es la variación total en las mediciones obtenidas con un sistema de medición sobre las mismas partes cuando se mide una característica en un largo periodo de tiempo.

**Por ciento de tolerancia:** Es el porcentaje de la tolerancia de la parte debida a la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición.



### A.5.1 Consideraciones en el análisis del sistema de medición

En un estudio R&R las siguientes características son esenciales [23]:

1. Las mediciones deben estar en control estadístico. Esto significa que la variación del sistema de medición se debe sólo a causas comunes.
2. La variabilidad del sistema de medición debe ser pequeña comparada con la variación del proceso de manufactura y los límites de especificación.
3. Los incrementos de la medición deben ser pequeños en relación con la variabilidad del proceso y los límites de especificación. Una regla común aplicada es que los incrementos no deben ser mayores que un décimo de la variación del proceso o los límites de especificación más pequeños.

Para determinar la exactitud del sistema de medición, se requiere un valor de referencia de la parte a ser medida. El procedimiento completo para obtener un estimado del sesgo es el siguiente:

1. Contar con el valor de referencia de la parte. Dicha medición puede ser hecha con un instrumento debidamente calibrado.
2. Escoger un operario para que realice la medición de la misma parte 10 veces, usando el equipo de medición a ser evaluado.
3. Determinar el sesgo del sistema de medición mediante la diferencia entre el valor de referencia y el promedio observado.
4. Expresar el por ciento de variación del proceso para el sesgo mediante el cociente del sesgo entre la variación del proceso multiplicada por 100.
5. Expresar el por ciento de tolerancia para el sesgo mediante el cociente del sesgo entre la tolerancia multiplicada por 100.

Para determinar la estabilidad del sistema de medición, se puede graficar el promedio y el rango de una misma parte conforme en un período de tiempo. De esta forma es posible apreciar la variación del sistema de medición con respecto al tiempo.

**A.5.2 Análisis R&R**

Un estudio R&R por el método largo requiere típicamente la participación de un mínimo de 2 operadores realizando cada uno al menos 2 mediciones sobre un mínimo de 10 muestras. Deben ser seleccionados aquellos operadores que típicamente utilizan el equipo de medición y la toma de las mediciones de las muestras debe hacerse en orden aleatorio. La tabla A.1 muestra los cálculos que se realizan a fin de obtener la reproducibilidad y la repetibilidad para un estudio R&R sobre 10 muestras de una misma parte.

**Tabla A.1. Estudio R&R por el método largo.**

Operador	A				B				C									
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Rango	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Rango	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Rango						
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
Totales	Suma de medición 1	Suma de medición 2	Suma de medición 3	Suma de rangos	Suma de medición 1	Suma de medición 2	Suma de medición 3	Suma de rangos	Suma de medición 1	Suma de medición 2	Suma de medición 3	Suma de rangos						
	$\bar{X}_A = \text{Suma de mediciones 1, 2, 3 dividido por } (n \times \text{número de mediciones})$			$\bar{R}_A = \text{Suma de rangos dividido por el número de muestras}$	$\bar{X}_B = \text{Suma de mediciones 1, 2, 3 dividido por } (n \times \text{número de mediciones})$			$\bar{R}_B = \text{Suma de rangos dividido por el número de muestras}$	$\bar{X}_C = \text{Suma de mediciones 1, 2, 3 dividido por } (n \times \text{número de mediciones})$			$\bar{R}_C = \text{Suma de rangos dividido por el número de muestras}$						
$\bar{R} = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{3}$																		
$X_{Diff} = X_{max} - X_{min}$																		
Repetibilidad = E.V. = $\bar{R} \times K_1$ Donde $K_1$ es función del número de mediciones efectuadas para cada muestra: <table style="margin-left: 20px;"> <tr> <td># de mediciones</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td><math>K_1</math></td> <td>4.56</td> <td>3.05</td> </tr> </table>													# de mediciones	2	3	$K_1$	4.56	3.05
# de mediciones	2	3																
$K_1$	4.56	3.05																
Reproducibilidad = A.V. = $\sqrt{(\bar{X}_{Diff} \times K_2)^2 - E.V. / (n \times \text{número de mediciones})}$ Donde $K_2$ es función del número de operadores: <table style="margin-left: 20px;"> <tr> <td># de operadores</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td><math>K_2</math></td> <td>3.65</td> <td>0.70</td> </tr> </table>													# de operadores	2	3	$K_2$	3.65	0.70
# de operadores	2	3																
$K_2$	3.65	0.70																

El por ciento de variación del proceso consumido por el sistema de medición (%R&R) es determinado una vez que el proceso está en control estadístico y es capaz de detectar la variación de parte a parte. Cuando se describe el %R&R se considera la siguiente expresión:

$$R \& R = \sqrt{E.V.^2 + A.V.^2} \quad (A.50)$$

Existe también una relación entre la desviación estándar del sistema de medición y el valor R&R; dicha relación corresponde a la ecuación A.51.

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_o^2} = \frac{R \& R}{5.15} \quad (A.51)$$

Donde:

$\sigma_m$  = Desviación estándar del sistema de medición

$\sigma_e$  = Desviación estándar debida al equipo de medición (repetibilidad)

$\sigma_o$  = Desviación estándar debida a los operarios (reproducibilidad)

El estudio del sistema de medición o bien un estudio de capacidad del proceso determina la desviación estándar de la parte que está siendo medida  $\sigma_p$ . La varianza total al efectuar las mediciones estará determinada por:

$$\sigma_T^2 = \sigma_p^2 + \sigma_m^2 \quad (A.52)$$

Donde:

$\sigma_T^2$  = Varianza total

$\sigma_p^2$  = Varianza del proceso

$\sigma_m^2$  = Varianza del sistema de medición

El porcentaje de la variación total que se encuentra cubierta por la variación del sistema de medición por repetibilidad y reproducibilidad se estima como:

$$\%R \& R = \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \times 100 \quad (A.53)$$

El porcentaje de la tolerancia relacionada a la variación del sistema de medición por repetibilidad y reproducibilidad se estima como:

$$\%Tolerancia = \frac{5.15\sigma_m}{Tolerancia} \times 100 \quad (A.54)$$

Una regla comúnmente usada indica que si un sistema de medición tiene un porcentaje de tolerancia dado por la ecuación A.54 menor de 10% es capaz, entre 10% y 25% es justo y superior a 25% es inaceptable.

Los resultados de un estudio R&R típicamente incluyen gráficos  $\bar{x}$  y R. A diferencia de los gráficos de control usados para controlar el proceso, el eje horizontal no es el tiempo, sino que está segmentado en regiones donde se indica la información relativa a los operadores involucrados en el estudio y sus mediciones. Las ecuaciones utilizadas para un gráfico  $\bar{x}$  son las mismas que para las de control del proceso, aunque su interpretación es diferente:

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{x} + \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} \\ \text{Línea central} &= \bar{x} \\ LCL &= \bar{x} - \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (A.55)$$

En estas ecuaciones,  $\bar{x}$  es el promedio global, es decir el promedio considerando las distintas mediciones realizadas por todos los operadores,  $\bar{R}$  es un estimado de la variabilidad de cada operador. Una condición de estado fuera de control en los gráficos, indicará que la variabilidad de la parte es alta comparada con la repetibilidad y reproducibilidad.

El método de construcción de un gráfico R utiliza las ecuaciones (A.56). En este caso las inconsistencias en las mediciones realizadas por los diferentes operadores aparecen como condiciones fuera de control; cuando esto ocurre, es necesario identificar las causas, corregirlas y obtener nuevamente estas mediciones a fin de volver a calcular estos límites;

no es válido analizar los datos para obtener conclusiones a partir de un R&R a menos que se presente un estado de control estadístico.

$$\begin{aligned}UCL &= \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \\ \text{Línea central} &= \bar{R} \\ LCL &= \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}\end{aligned}\tag{A.56}$$

## A.6 ANÁLISIS DE CAPACIDAD DEL PROCESO

La capacidad del proceso se refiere a la uniformidad del proceso. El análisis de la capacidad del proceso es una parte vital de un programa global de mejora de la calidad. Entre los principales usos de los datos derivados de un análisis de capacidad del proceso están los siguientes [26]:

1. Prediciendo que tan bien el proceso se apegará a las tolerancias.
2. Asistiendo a los diseñadores del producto en la selección o modificación de un proceso.
3. Asistiendo en el establecimiento de un intervalo entre el muestreo para el monitoreo del proceso.
4. Especificando requerimientos de funcionamiento para nuevos equipos.
5. En la selección entre varios vendedores.
6. Planeando la secuencia de los procesos de producción cuando hay un efecto interactivo de los procesos en las tolerancias.
7. En la reducción de la variabilidad en un proceso de manufactura.

### A.6.1 Razones de capacidad de proceso

Una manera cuantitativamente simple de expresar la capacidad del proceso es mediante el uso de la razón de capacidad del proceso ( $C_p$ ) expresada de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (A.57)$$

Esta ecuación asume que el proceso tiene un límite de especificación superior e inferior y no toma en cuenta la posible desviación de la media del proceso respecto al valor nominal de la especificación.

Para considerar la situación cuando la media no está centrada con respecto a los límites de especificación se usa el  $C_{pk}$ . Se afirma, entonces que el  $C_p$  mide la capacidad potencial en el proceso, mientras que el  $C_{pk}$  mide la capacidad real. Un valor mínimo aceptable comúnmente recomendado para este índice es de 1.33 [23]. Esta cantidad se obtiene con la siguiente expresión.

$$C_{pk} = \min(C_{pU}, C_{pL}) \quad (A.58)$$

donde:

$$C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

$$C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

### A.6.2 Capacidad y control del proceso

Las razones de capacidad del proceso resumen el desempeño del proceso, pero no muestran necesariamente la capacidad potencial del proceso porque estos índices no contemplan el aspecto de control estadístico, ni tampoco muestran patrones sistemáticos en la salida del proceso los cuales si son eliminados podrían reducir la variabilidad en la característica de calidad del proceso. En este aspecto los gráficos de control son muy efectivos y deben usarse como la técnica primaria en el análisis de capacidad del proceso.

Algunas veces la observación del comportamiento de los gráficos de control en el análisis de capacidad del proceso indica un proceso que se encuentra fuera de control. Es inseguro estimar la capacidad del proceso en tales casos. El proceso debe ser estable para producir

una estimación apropiada de la capacidad del proceso. Cuando el proceso está fuera de control en las etapas iniciales del análisis de capacidad del proceso, el primer objetivo será hallar y eliminar las causas asignables para lograr que el proceso esté en el estado de control.

Un supuesto importante considerado en la obtención de las razones de capacidad del proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$ , es que las características de calidad medidas provienen de una distribución normal. Si esta condición no se cumple, entonces los valores reales de estos índices pueden ser diferentes de los estimados.

## A.7 MATRIZ DE CAUSA-EFECTO

La matriz de causa-efecto es una herramienta que puede ayudar a priorizar la importancia de variables críticas de entrada al proceso (KPIV). Al establecer prioridades en equipo, se pueden seleccionar las KPIVs que serán monitoreadas y se puede establecer si existe una relación potencial causa-efecto entre las KPIVs y las características críticas de calidad del producto (CTQs) o bien los defectos que se presentan. Los resultados obtenidos de una matriz causa-efecto pueden ser información de utilidad en el desarrollo de un análisis de modos y efectos de falla o bien en la planeación de un diseño de experimentos.

Los pasos a seguir en la construcción de una matriz de causa-efecto son los siguientes [23]:

1. Listar horizontalmente las CTQs.
2. Asignar un número a cada CTQ que indique su prioridad, en donde números altos indiquen que son CTQs de alta prioridad. Puede usarse una escala de 1 a 10.
3. Listar verticalmente en el lado izquierdo de la matriz de causa-efecto todas las KPIVs o bien todos los defectos que pueden ocurrir en el producto y que pueden ocasionar no conformidad a una o más de las CTQs.
4. Establecer por consenso la cantidad de efecto que cada KPIV tiene sobre cada CTQ o defecto. Puede ser usada una escala de 1 a 10.

5. Determinar los resultados para cada KPIV multiplicando la prioridad de la CTQ o defecto (paso 2) por el efecto de la KPIV (paso 4) y entonces sumar estos productos.
6. Las KPIVs pueden ser entonces priorizadas a partir de los resultados del paso 5, o bien a partir del porcentaje de puntos totales de cada KPIV.

## **A.8 ANALISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA DE PROCESO**

Un análisis de modo y efecto de falla (FMEA) es una técnica de ingeniería usada para definir, identificar y eliminar fallas potenciales y/o conocidas, problemas y errores del sistema, diseño, proceso y/o servicio antes de que las fallas lleguen al cliente [30].

Cualquier FMEA conducido de manera apropiada proveerá de información útil que puede reducir el riesgo en el sistema, diseño, proceso y servicio. Un FMEA de proceso (FMEAP) es usado para analizar procesos de manufactura y ensamble. Un FMEAP se centra en los modos de falla causados por las deficiencias en el proceso o ensamble.

En esencia, un FMEAP provee un método sistemático para examinar todas las formas por las cuales una falla puede ocurrir. Para cada falla, un estimado es hecho de su efecto sobre el proceso; este efecto se mide en términos de su seriedad, su ocurrencia (frecuencia) y su detección.

El FMEAP identificará acciones correctivas requeridas para prevenir que las fallas lleguen a los clientes, asegurando por lo tanto, una más alta durabilidad, calidad e integridad posible en el producto.

El proceso para realizar un FMEAP es el siguiente:

1. Seleccionar el equipo: El equipo debe ser multidisciplinario.
2. Realizar un diagrama de flujo del proceso: El propósito es asegurar que todo el equipo conoce el problema a ser analizado.
3. Priorizar: Seleccionar el aspecto más importante del problema para aplicar FMEA.



4. Colección de datos: El equipo identifica los modos de falla.
5. Análisis: Se identifican los efectos y causas potenciales de cada modo de falla, controles existentes y se discute la estimación de la severidad, ocurrencia y detección.
6. Resultados: Se cuantifica la severidad, la ocurrencia y la detección y el número de prioridad de riesgo (RPN). Las escalas numéricas a utilizar para cuantificar la severidad, la ocurrencia y la detección se presentan en el anexo C.3. El RPN es el valor que resulta de multiplicar la severidad, la ocurrencia y la detección.
7. Confirmar/evaluar/medir: Recomendar acciones a seguir de corrección y prevención. Atender en primer termino los modos de falla identificados con un mayor RPN.
8. Iniciar nuevamente: Realizado el paso 7 se debe iniciar nuevamente en el punto 1 debido a la filosofía fundamental del FMEA que es la mejora continua.

Los beneficios de un FMEAP son los siguientes:

1. Identifica las deficiencias del proceso y ofrece un plan de acción correctivo.
2. Identifica las características críticas y/o significantes, y ayuda de esta manera al desarrollo de los planes de control.
3. Establece una prioridad de acciones correctivas.
4. Asiste en el análisis de los procesos de manufactura o ensamble.
5. Documenta y facilita cambios posteriores.

## A.9 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Mediante el uso de las técnicas de diseño de experimentos (DOE) los efectos de varios factores independientes sobre una característica de calidad pueden ser considerados simultáneamente en un experimento. De esta forma es posible seleccionar las tolerancias operativas o los niveles óptimos para las variables críticas de entrada al proceso a fin de mejorar la calidad de la respuesta de interés. En esta sección se tratarán de manera somera las técnicas DOE de diseño factorial completo  $2^k$ , diseño factorial fraccionado  $2^{k-p}$  y en la A.10, el tema de superficies de respuesta; los detalles completos de estas metodologías pueden ser consultados en las referencias [31] y [32].

Taguchi clasifica los factores que influyen en el desempeño del proceso o producto en cuatro categorías:

1. Factores señal: Estos son los factores que pueden ser ajustados por el operador a fin de lograr el nivel deseado en la característica de calidad.
2. Factores de control: Son los parámetros del diseño del producto o proceso, cuyos valores son determinados durante el diseño del proceso.
3. Factores de ruido: Estos son los factores incontrolables o cuyo control requiere considerables esfuerzos o gastos.
4. Factores de escala: Son casos especiales de factores de control. Estos son factores que pueden ser fácilmente ajustados para alcanzar una deseada relación de funcionalidad entre un factor señal y la variable de respuesta.

#### **A.9.1 Diseño factorial completo $2^k$**

En general un diseño  $2^k$  tiene las siguientes implicaciones:

1. Los experimentos analizan el efecto de  $k$  factores.
2. Se experimenta con cada factor en sus 2 niveles.
3. Se cuenta con  $2^k$  condiciones experimentales, es decir, con este número de experimentos se analiza el efecto sobre la característica de calidad de todas las posibles combinaciones de los  $k$  factores en sus 2 niveles.

Si se designa cada factor con la letra "x", y la variable de respuesta con la letra "y", entonces en la construcción de la tabla de diseño bajo el orden estándar se deben escribir las columnas de los factores de la siguiente manera:

1. Asignar para cada factor una columna. Cada columna tendrá una longitud de  $2^k$ .
2. Para  $x_1$ , escribir la columna bajo el orden -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1,.... Los signos se alternan cada vez.
3. Para  $x_2$ , escribir la columna bajo el orden -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1,.... Los signos alternan en pares.

4. Para  $x_3$ , escribir la columna bajo el orden -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1,.... Los signos se alternan en grupos de 4.
5. Se debe proceder de manera similar para  $x_4, x_5, \dots, x_k$ . Para la columna  $x_k$  escribir  $2^{k-1}$  números de -1, seguidos por  $2^{k-1}$  números de +1.

A fin de obtener los efectos de cada factor sobre la variable de respuesta  $y$ , es decir los efectos principales, así como los efectos de la interacción de los factores, se puede hacer uso de un procedimiento de cálculo que aplica para cualquier diseño  $2^k$ :

1. Se requiere primero la construcción de una matriz de cálculo que contendrá las columnas correspondientes a los factores, sus interacciones y la columna I.
2. Anotar la columna I, con valores de +1 para cada condición experimental.
3. Escribir las columnas correspondientes a los factores establecidos en la matriz de diseño.
4. Para obtener todas las posibles interacciones entre los factores, combinar los distintos factores en interacción de  $2^\circ, 3^\circ, \dots, k^\circ$  orden.
5. Asignar a cada columna de interacción de los factores el signo que resulte de multiplicar los valores +1, -1, que contengan las columnas de los factores para cada una de las  $2^k$  condiciones experimentales.
6. Obtener los efectos principales así como los de interacción multiplicando las columnas de 1 y -1 correspondientes al efecto de interés por la columna de la respuesta  $y$ . Dividir esta suma, por  $N/2$ . Donde  $N$  es el número de mediciones de  $y$  realizadas.
7. Obtener la media estimada de la respuesta sumando los valores de  $y$ , y dividiendo esta suma por  $N$ .

La tabla A.2 es una matriz de cálculo que corresponde a un diseño  $2^3$ .

Tabla A.2. Matriz de cálculo para un diseño  $2^3$ .

Condición Experimental	I	Efectos principales			Efectos de interacción				y
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	y <sub>1</sub>
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	y <sub>2</sub>
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	y <sub>3</sub>
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	y <sub>4</sub>
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	y <sub>5</sub>
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	y <sub>6</sub>
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	y <sub>7</sub>
8	1	1	1	1	1	1	1	1	y <sub>8</sub>

### A.9.2 Estimación de los efectos significativos

A fin de juzgar la importancia relativa del efecto de una variable para determinar cuáles de los efectos principales e interacciones son significativos, es posible usar réplicas en la realización de cada condición experimental.

Si se asume que existe una varianza común para todas las N observaciones, incluyendo todas las réplicas de todas las condiciones experimentales (m), entonces un estimado de esta varianza común puede ser obtenido si se pondera en función de los grados de libertad de cada condición experimental ( $v_i$ ) según lo muestra la ecuación A.59.

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^m v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^m v_i} \quad (\text{A.59})$$

En general la varianza muestral de un efecto es calculada por la siguiente relación:

$$s_{\text{efecto}}^2 = \frac{4 s_p^2}{N} \quad (\text{A.60})$$

Por otro lado la varianza del promedio de la respuesta está dada por:

$$S_{\text{promedio}}^2 = \frac{S_p^2}{N} \quad (\text{A.61})$$

El intervalo de confianza para cada uno de las medias de los efectos estará dado por la siguiente expresión:

$$E_i \pm t_{v, 1-\alpha/2} S_{\text{efecto}} \quad (\text{A.62})$$

Los intervalos de confianza desarrollados para todas las medias de los efectos utilizarán la desviación estándar de los efectos ( $S_{\text{efecto}}$ ) para los grados de libertad ( $v$ ) de todas las condiciones experimentales y para un  $100(1-\alpha)\%$  de intervalo de confianza de acuerdo con la distribución t-student.

Los intervalos de confianza de esta forma obtenidos pueden ser usados para juzgar el nivel de significancia estadística de los efectos. Se rechazará la hipótesis nula,  $H_0$ : Media de los efectos = 0, si el intervalo de confianza no incluye al cero. De esta manera, se concluirá que un efecto es significativo, si el intervalo de confianza es estrictamente positivo o negativo.

Con el propósito de determinar si el promedio es significativo el intervalo de confianza a utilizar para emitir este juicio estará dado por la siguiente expresión:

$$\bar{y} \pm t_{v, 1-\alpha/2} S_{\text{promedio}} \quad (\text{A.63})$$

Cuando no se incluyen réplicas en un diseño de experimentos es posible juzgar la importancia de los efectos principales y de interacción mediante cualquiera de los 2 siguientes métodos:

1. El uso del gráfico normal probabilístico de los efectos para aislar los efectos significativos de aquellos que parecen deberse únicamente al error experimental.
2. El uso de los estimados de los efectos de interacción de alto orden para estimar directamente la varianza de los efectos.

El uso del gráfico normal probabilístico para juzgar la importancia de los efectos considera los 2 hechos siguientes:

1. Debido a que los estimados de los efectos son combinaciones lineales de la respuesta individual, tienden a estar normalmente distribuidos según el teorema del límite central.
2. La prueba de significancia que se hace tiene como propósito separar a los efectos en dos grupos: aquellos que no son significativos (sus valores medios son cero) y aquellos que son significativos (sus valores medios no son cero).

Cuando se realiza un gráfico normal probabilístico el procedimiento a seguir implica:

1. Ordenar los estimados de los efectos en orden ascendente ( $E_i$ ).
2. Estimar las correspondientes probabilidades acumuladas ( $p_i$ ) utilizando la ecuación A.64.
3. Se graficarán las probabilidades acumuladas contra los estimados de los efectos.
4. Se traza una línea que pase lo más cercana posible a la mayor cantidad de puntos, dicha línea generalmente cruzará muy cercano a las coordenadas (0, 50%).

$$p_i = \frac{100(i - 0.5)}{2^4 - 1} \quad (\text{A.64})$$

En la interpretación del gráfico se decidirá que son efectos significativos aquellos que estén fuera de la línea trazada, lo cual indicará que al parecer no pertenecen a una distribución normal con media cero.

A fin de juzgar la importancia de los efectos principales y de interacción a partir del uso de los estimados de los efectos de interacción de alto orden, se asume que todas las interacciones de tercer y más alto orden son no significativas. Con este supuesto, es posible estimar la varianza de un efecto directamente de la fórmula A.65:

$$S_{\text{efecto}}^2 = \sum_{\text{interacciones de alto orden}} \frac{(E_i - \mu_{E_i})^2}{\text{No. de interacciones de alto orden}} \quad (\text{A.65})$$

En la ecuación A.65 se sustituye  $0$  por  $\mu_{Ei}$ , que en este caso se asume ser conocida. La varianza así obtenida puede ser usada para obtener los intervalos de confianza de los efectos y juzgar si son o no significativos.

### A.9.3 Diseño factorial fraccionado $2^{k-p}$

En términos generales un diseño  $2^{k-p}$  implica lo siguiente:

1. Los experimentos analizan el efecto de  $k$  factores.
2. Se experimenta con cada factor en sus 2 niveles.
3. Se cuenta con  $2^{k-p}$  condiciones experimentales, es decir, con este número de experimentos se analiza el efecto sobre la característica de calidad de todas las posibles combinaciones de los  $k$  factores en sus 2 niveles.
4. Se requieren introducir las  $p$  variables en el factorial completo de  $k-p$  variables.

Una síntesis del procedimiento completo para el diseño de un experimento factorial fraccionado  $2^{k-p}$  es la siguiente:

1. Las  $p$  variables a considerar se introducirán en la matriz de diseño igualando las  $p$  variables a igual número de columnas de efectos de interacción.
2. Se obtendrán los generadores de diseño multiplicando por la variable  $p$  correspondiente las identidades obtenidas en el paso anterior para cada  $p$  variable. Considerar que cada  $p$  variable multiplicada por sí misma es igual a  $I$ .
3. Hacer todas las combinaciones posibles de multiplicación de los generadores tomando dos a la vez, tres a la vez, etc.
4. Obtener la relación de definición. La relación de definición consiste de las igualdades entre  $I$ , los generadores obtenidos y todas las combinaciones posibles de multiplicación de los generadores. El número de palabras totales en la relación de definición incluyendo  $I$ , es decir el número de efectos que serán igualados, se obtiene mediante  $2^p$ .
5. Obtener el patrón de confundimiento. El patrón de confundimiento se obtiene mediante la multiplicación de la relación de definición por cada una de las variables que corresponden a los encabezados de los efectos en la matriz de cálculo.

6. Todas las columnas (incluyendo I) en el diseño factorial fraccionado producirán una combinación lineal de efectos dados por el patrón de confundimiento, es decir se sumarán los efectos principales y de interacción obtenidos en el patrón de confundimiento. Dicha combinación lineal de efectos se denotará por  $l_{\text{efecto}}$ , donde el subíndice corresponderá a las variables que corresponden a los encabezados de los efectos en la matriz de cálculo.
7. Puesto que a menudo los efectos significativos son los principales y los de interacción de dos factores, se pueden eliminar de la combinación lineal de efectos aquellos que sean de interacción de tercer orden o superior.
8. Procurar que la resolución del diseño de experimentos sea lo suficientemente alta para asegurar que los efectos principales no estén confundidos con los de segundo orden. Por resolución de un diseño  $2^{k-p}$  debe entenderse como el número de letras en la palabra más corta de la relación de definición, excluyendo I. En el anexo C.4 se sugiere un listado de los generadores de diseño en función del número de variables  $k$  y de experimentos  $N$ .

En las etapas tempranas de una investigación al parecer muchas variables parecen ser de importancia potencial. Sin embargo, en el análisis final, quizás solamente 2 o 3 de estas variables puedan realmente ser significativas. La primera tarea en este sentido consistirá en conducir algunos experimentos que determinen cuáles efectos son significativos para proseguir luego con una experimentación más profunda. En la tarea de determinar cuáles variables son importantes a partir de un gran número inicial de las mismas, es útil tomar un enfoque secuencial, construyendo un conocimiento gradual a partir de una serie de experimentos relacionados; es aquí, donde pueden ser también aplicados los diseños factoriales fraccionados.

El enfoque secuencial que se está considerando asume que las interacciones de tercer orden o superior no son significativas. Cuando en un diseño factorial fraccionado se desean desconfundir todos los efectos principales de los efectos de segundo orden, se puede hacer uso de un segundo diseño llamado imagen de espejo, que consiste en cambiar todos los signos (de - a +, y viceversa) de las columnas de la matriz original de diseño. Ello traerá como consecuencia que los generadores de diseño originales cambien de signo y como consecuencia se formarán nuevas combinaciones lineales de efecto denotadas por  $l'_{\text{efecto}}$ . Bajo este nuevo esquema se correrán los experimentos correspondientes.



A fin de obtener los efectos principales a partir de los resultados de las combinaciones lineales de efecto del diseño original y del diseño del tipo imagen de espejo, se sumarán y restarán para cada columna las combinaciones lineales de efectos correspondientes y el resultado será dividido entre 2, es decir:

$$\frac{l_{\text{efecto}} + l'_{\text{efecto}}}{2} \quad \text{y} \quad \frac{l_{\text{efecto}} - l'_{\text{efecto}}}{2} \quad (\text{A.66})$$

Es posible obtener también los efectos de segundo orden que contengan cierto factor de interés mediante el cambio de signo de la columna que corresponda al factor de interés, ello provocará algunos cambios de signo en los generadores de diseño. Al correr los experimentos bajo estas condiciones y aplicar las fórmulas A.66, se obtendrá la información relativa a los efectos de interacción de segundo orden que contengan el factor de interés.

Todas las combinaciones de generadores que pueden surgir de todas las posibles combinaciones de cambio de signo de las columnas de la matriz de diseño, constituyen una familia de factoriales fraccionados. El diseño que se deriva de contar con todos los generadores con el signo + se llama fracción principal. El punto clave a partir de los resultados obtenidos de los experimentos de la fracción principal es elegir cualquiera de los fracciones alternativas de la familia de factoriales fraccionados para alcanzar un resultado particular cuando los resultados de dos o más fracciones son analizados.

#### A.9.4 Modelo matemático de un diseño factorial

El modelo matemático que corresponde a un diseño factorial de dos niveles, está dado por la suma de los coeficientes  $b$  multiplicados por las  $x$  de los efectos principales o de los efectos de interacción:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + \dots + b_{123} X_1 X_2 X_3 + \dots \quad (\text{A.67})$$

Los coeficientes  $b$  se obtienen de la siguiente manera:  $b_0$ , siempre será el promedio de los valores de la característica, mientras que el resto de las  $b$  se obtendrán dividiendo los

efectos correspondientes entre 2. El modelo final  $\hat{y}$  estará dado sólo por los parámetros  $b$  que correspondan a los efectos significativos.

### A.9.5 Análisis de varianza para verificar ajuste del modelo matemático

A fin de verificar que el modelo matemático utilizado con  $p$  número de parámetros sea el adecuado se utiliza frecuentemente el análisis de varianza (ANOVA). Las ecuaciones usadas para obtener un ANOVA se muestran en la tabla A.3 y A.4. El análisis propuesto en la tabla A.3 aplica cuando no se cuentan con réplicas para las condiciones experimentales ( $m$ ). La tabla A.4 se utiliza cuando se cuentan con cierto número de réplicas para las condiciones experimentales y se tienen en total  $n_m$  réplicas para cada condición experimental y en total  $N$  datos.

**Tabla A.3.** Ecuaciones para verificación de ajuste del modelo matemático sin réplicas.

Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (DOF)	Cuadrados medios (MS)	Valor F calculado
<b>Modelo</b>	$\sum_{i=1}^m \hat{y}_i^2$	$p$	SS(Modelo) / DOF(Modelo)	MS(Modelo) / MS (Residuo)
<b>Residuo</b>	$\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2$	$m-p$	SS(Residuo) / DOF(Residuo)	
<b>Total</b>	$\sum_{i=1}^m y_i^2$	$m$		

Para el caso presentado en la tabla A.3 se considera que el modelo propuesto es adecuado si el valor  $F$  calculado es superior al valor  $F$  de tablas con grados de libertad de  $p$  y  $m$  para el numerador y denominador respectivamente y con un nivel de confianza  $\alpha$  seleccionado.

**Tabla A.4.** Ecuaciones para verificación de ajuste del modelo matemático con réplicas.

Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (DOF)	Cuadrados medios (MS)	Valor F calculado
<b>Modelo</b>	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_m} \hat{y}_{ij}^2$	p		
<b>Residuo</b>	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( y_{ij} - \hat{y}_i \right)^2$	N-p		
<b>Falta de ajuste</b>	SS(Residuo) - SS(Error puro)	DOF(Residuo) - DOF(Error puro)	SS(Falta de ajuste) / DOF(Falta de ajuste)	MS(Falta de ajuste) / MS(Error puro)
<b>Error puro</b>	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_m} \left( y_{ij} - \bar{y}_i \right)^2$	$\sum_{i=1}^m (n_m - 1)$	SS(Error puro) / DOF(Error puro)	
<b>Total</b>	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_m} y_{ij}^2$	N		

Para el caso presentado en la tabla A.4 se considera que el modelo propuesto es adecuado si el valor F calculado es inferior al valor F de tablas con DOF(Falta de ajuste) y DOF(Error puro) para el numerador y denominador respectivamente y con un nivel de significancia  $\alpha$  seleccionado.

### A.10 METODOLOGIA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

A partir del diseño factorial fraccionado se eligen las 2 variables que sean las más significativas para ser entonces analizadas mediante superficies de respuesta. La metodología de superficies de respuesta consiste en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es afectada por varias variables y el objetivo es optimizarla. De una manera

bastante simplificada los pasos a seguir cuando se desea maximizar la respuesta son los siguientes:

1. Realizar un diseño factorial fraccionado  $2^2$  eligiendo los niveles en bajo y alto para cada factor.
2. Ajustar un modelo polinómico lineal de la forma dada por la ecuación A.68.
3. Comprobar si bajo estas condiciones el modelo lineal es el adecuado mediante la determinación del coeficiente de interacción  $b_{12}$  y si existe curvatura utilizando la relación A.69. El modelo lineal no será adecuado cuando  $b_{12}$  o  $y_f - y_c$  sean significativamente mayores que sus respectivas desviaciones típicas. Si el modelo lineal es adecuado ir al paso 4, en caso de que no, ir al paso 10.
4. Seguir el camino de la máxima pendiente de la siguiente manera. Comenzando en el centro de la región experimental, se sigue el camino moviendo simultáneamente  $b_2$  unidades en la dirección de  $x_2$  por cada  $b_1$  en la dirección de  $x_1$ .
5. Realizar experimentos en la dirección de la máxima pendiente y seleccionar el punto que halla dado el mejor resultado.
6. Realizar un diseño de experimentos  $2^2$  cerca del punto máximo encontrado.
7. Ajustar un modelo polinómico lineal de la forma dada por la ecuación A.68.
8. Comprobar si bajo estas condiciones existe curvatura utilizando la relación A.69. Si no existe curvatura ir al paso 9, en caso de existir aplicar el paso 10.
9. Si de acuerdo con el paso anterior no existe curvatura se dan por terminados los experimentos.
10. Ajustar un polinomio de segundo grado dado por la ecuación A.70.
11. Para estimar los 6 coeficientes del polinomio de segundo grado aumentar el último diseño  $2^2$  mediante la aplicación de un diseño estrella consistente en cuatro puntos axiales de acuerdo con los niveles seleccionados según lo muestra la tabla A.5.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (\text{A.68})$$

$$b_{11} + b_{22} = \bar{y}_f - \bar{y}_c = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) - \bar{y}_c \quad (\text{A.69})$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (\text{A.70})$$

Tabla A.5. Experimentos añadidos al  $2^2$  del tipo estrella para formar un diseño compuesto

No. Exp.	$x_1$	$x_2$
1	$-\sqrt{2}$	0
2	$+\sqrt{2}$	0
3	0	$-\sqrt{2}$
4	0	$+\sqrt{2}$

### A.11 PLAN DE CONTROL DE CALIDAD

Un plan de control es un resumen escrito de las acciones de la planeación de la calidad del productor para un proceso específico, producto y/o servicio. El plan de control lista todos los parámetros de proceso y características de diseño considerados importantes para la satisfacción del cliente y los cuales requieren acciones específicas de planeación de calidad. El plan de control describe las acciones y reacciones requeridas para asegurar que el proceso es mantenido en un estado de control estadístico.

El FMEA es quien identifica las características críticas y significantes y es por consiguiente el punto inicial para comenzar a elaborar un plan de control. Los valores óptimos de los KPIVs significativos obtenidos vía diseño de experimentos o superficies de respuesta podrán ser considerados en el plan de control. Un plan de control típico puede incluir lo siguiente:

1. Una lista de variables críticas y significativas. Estas variables serán las CTQs y en los casos que se requiera control, las KPIVs significativas identificadas a partir de los diseños de experimentos y las superficies de respuesta. También pueden incluirse gráficos de control del tipo atributos para los defectos más severos determinados a partir del FMEA.
2. Tamaños de muestra y frecuencias de evaluación.
3. Método de evaluación.
4. Reacción y acción correctiva.



## ANEXO B. ENCUESTA

### ENCUESTA Inspección y calidad en SMT

Las siguientes preguntas se refieren exclusivamente al proceso SMT. El propósito es conocer la forma de resolver los problemas de calidad en las empresas mexicanas de manufactura electrónica que utilizan el proceso SMT, así como establecer áreas de oportunidad que sean incluidas en el trabajo de tesis que consiste en el "Desarrollo de un sistema para el control y mejora de calidad en el proceso SMT". De antemano gracias por su colaboración.

#### INSTRUCCIONES:

1. Esta encuesta consiste en 2 secciones de preguntas
2. La **SECCIÓN A** está integrada por preguntas que deben contestarse de manera inmediata, sin consultar información adicional.
3. La **SECCIÓN B** está conformada por preguntas en las cuales puede requerir información que aunque usted maneje no la tenga disponible en el momento. Para esta sección usted puede consultar la información que requiera.

Indique el puesto o función que desempeña actualmente en la empresa:

- a) Ingeniero de manufactura
- b) Ingeniero de calidad
- c) Ingeniero de proceso
- d) Supervisor de línea
- e) Operario de línea
- f) Otra: \_\_\_\_\_

#### SECCIÓN A

1. ¿Se cuenta con certificación ISO-9000?

- a) Sí
- b) No

2. De las siguientes herramientas de calidad señala las que se utilizan en el proceso SMT.

- a) Histogramas
- b) Hojas de verificación
- c) Paretos
- d) Diagramas de causa-efecto
- e) Diagramas de flujo del proceso
- f) Gráficos de control
- g) Diagramas de dispersión
- h) Otras: \_\_\_\_\_

3. En caso de utilizar gráficos de control, ¿cuál de los tipos de gráficos de control mencionados se emplean?
- a)  $n$
  - b)  $np$
  - c)  $u$
  - d)  $X-R$
  - e)  $X-S$
  - f) De suma acumulada (CUSUM)
  - g) Para mediciones individuales
  - h) Promedio en movimiento exponencialmente ponderado (EWMA)
4. En caso de utilizar gráficos de control, ¿cuál es la condición bajo las cuales ellos operan?
- a) Los gráficos de control son elaborados manualmente en la línea
  - b) Los gráficos de control son elaborados con algún paquete estadístico u hoja de cálculo fuera de la línea.
  - c) Los gráficos de control se obtienen mediante un sistema computacional directamente en la línea.
5. ¿Qué reglas son utilizadas para decidir que un proceso está fuera de control?
- a) La presencia de uno o más puntos fuera de los límites de control.
  - b) Dos o tres puntos consecutivos caen fuera de los límites 2-sigma de advertencia, pero dentro de los límites de control.
  - c) Cuatro de cinco puntos consecutivos se grafican más allá del límite de 1-sigma.
  - d) Una corrida de ocho puntos consecutivos se grafican a un mismo lado de la línea central.
  - e) Seis puntos muestran un comportamiento ascendente o descendente.
  - f) Se presenta un inusual o no aleatorio comportamiento en los datos graficados.
  - g) Otras: \_\_\_\_\_
- 
6. ¿Quién determina a partir de un gráfico de control si el proceso está fuera de control?
- a) El ingeniero a cargo de la producción
  - b) El operario en turno
  - c) El ingeniero de calidad
  - d) El supervisor
7. La información relativa a la interpretación de los gráficos de control y las acciones tomadas se tratan de la siguiente forma:
- a) No se almacena o archiva
  - b) Se almacena por un período menor de 1 día
  - c) Se almacena por un período entre 1 día y una semana
  - d) Se almacena por un período no mayor a 1 mes
  - e) Siempre se conserva
8. Cuando se soluciona un problema de calidad, ¿cuál es el destino que se le da a la información generada?
- a) Se almacena para que esté disponible para el ingeniero responsable del proceso SMT
  - b) Se almacena para que esté disponible para el ingeniero de calidad y la información pueda utilizarse en problemas futuros.
  - c) No se almacena, o si se almacena se hace por un período corto de tiempo
  - d) Se almacena para que esté disponible en línea en cualquier momento para el operario.
9. Para cada uno de los defectos que se presentan a continuación señale el tiempo que típicamente ocupa en encontrar la causa que lo origina:
- Puentes
- a) Entre 1 y 5 minutos
  - b) Entre 5 y 30 minutos
  - c) Entre 30 minutos y 3 horas
  - d) Entre 3 y 24 horas
- Componentes movidos
- a) Entre 1 y 5 minutos
  - b) Entre 5 y 30 minutos
  - c) Entre 30 minutos y 3 horas
  - d) Entre 3 y 24 horas



## Componentes levantados

- a) Entre 1 y 5 minutos
- b) Entre 5 y 30 minutos
- c) Entre 30 minutos y 3 horas
- d) Entre 3 y 24 horas

## Bolas de soldadura

- a) Entre 1 y 5 minutos
- b) Entre 5 y 30 minutos
- c) Entre 30 minutos y 3 horas
- d) Entre 3 y 24 horas

10. ¿Cuáles son los criterios aplicados para decidir parar con la operación de una línea SMT en caso de presentarse algún problema de calidad en el producto?
- 
- 

11. En caso de aplicar alguna de las siguientes herramientas o metodologías en el proceso SMT como parte del programa de calidad, señálela:

- a) R&R del sistema de medición
- b) FMEA de proceso
- c) FMEA de servicio
- d) Diseño de experimentos factorial completo
- e) Diseño de experimentos factorial fraccionado
- f) Superficies de respuesta

12. ¿Calculan la capacidad del proceso SMT?, en caso afirmativo, ¿cuál es el rango típico del índice Cpk?

- a) Inferior a 0.5
- b) Entre 0.5 y 1
- c) Entre 1 y 1.5
- d) Superior a 2

13. Selecciona las etapas del proceso en las que se lleva a cabo retrabajo

- a) Inmediatamente después de impresión de pasta
- b) Inmediatamente después de colocación de componentes
- c) Inmediatamente después de soldadura
- d) Después de la prueba ICT y la prueba funcional

14. En su opinión, por cuál de las siguientes razones no es recomendable realizar retrabajo en una unión soldada:

- a) El calor extra agregado causará una mayor formación de diferentes compuestos intermetálicos.
- b) El calor extra agregado generará un aumento sustancial de la ductilidad y fragilidad de la soldadura.
- c) El calor extra agregado provocará el choque térmico de la unión, por incremento brusco de la temperatura.

15. En su opinión, cuál de las siguientes tres causas mencionadas origina principalmente un puente de soldadura:

- a) Velocidad alta del squeegee
- b) Baja viscosidad de la pasta
- c) Desalineamiento en la impresión de pasta

16. En su opinión, cuál de las siguientes tres causas mencionadas origina principalmente las bolas de soldadura:

- a) Temperaturas bajas de contacto líquido en el horno de reflujo
- b) Presión alta del squeegee
- c) Humedad excesiva en el medio

17. ¿Cuál de los siguientes tres criterios se aplican para decidir que una soldadura es aceptable?

- a) Cuando el ángulo de contacto es superior a 90%
- b) Cuando el ángulo de contacto es igual a 90%
- c) Cuando el ángulo de contacto es menor a 90%

18. ¿Cuál de los siguientes indicadores utilizan para evaluar la calidad de las tarjetas producidas?

- a) Defectos por unidad (DPU)
- b) % de tarjetas defectuosas
- c) Partes por millón (ppm)
- d) Defectos por millón de oportunidades (DPMO)
- e) Yield

19. En caso de utilizar ppm o DPMO como indicador de calidad, conteste lo siguiente. En ambos casos se trata de un cociente donde el denominador es expresado como:

- a) El número total de componentes multiplicado por el número de unidades producidas
- b) El número total de uniones más el número total de componentes, esta suma multiplicada por el número de unidades producidas
- c) El número total de uniones multiplicado por el número de unidades producidas
- d) Otro: \_\_\_\_\_

20. De los siguientes medios de inspección selecciona los que estén operando actualmente en el proceso de impresión de pasta:

- a) Equipo para inspección de impresión de pasta 2D en línea
- b) Equipo para inspección de impresión de pasta 2D fuera de línea
- c) Equipo para inspección de impresión de pasta 3D en línea con muestreo
- d) Equipo para inspección total de impresión de pasta 3D en línea
- e) Equipo para medir altura de pasta
- f) Inspección visual humana
- g) Otros: \_\_\_\_\_

21. De los siguientes recursos de inspección en la colocación de componentes selecciona los que estén operando actualmente:

- a) Equipo de inspección visual automático en línea
- b) Equipo de inspección visual automático fuera de línea
- c) Rayos X
- d) Inspección visual humana
- e) Microscopio
- f) Plantilla de inspección
- g) Otros: \_\_\_\_\_

22. De los siguientes recursos de inspección después de soldadura seleccione los que estén operando actualmente:

- a) Equipo de inspección visual automático en línea
- b) Equipo de inspección visual automático fuera de línea
- c) Rayos X
- d) Equipo para ICT
- e) Equipo para prueba funcional
- f) Inspección visual humana
- g) Microscopio
- h) Plantilla de inspección
- i) Otros: \_\_\_\_\_





## ANEXO C. TABLAS

### ANEXO C.1. Equivalencias entre niveles de calidad sigma, ppm y Cpk.

Nivel de calidad sigma	ppm (se asume 1.5 $\sigma$ cambio en la media)	Cpk
1.0	547070.53	0.33
1.1	536851.42	0.37
1.2	522100.47	0.40
1.3	503203.05	0.43
1.4	480641.92	0.47
1.5	454976.77	0.50
1.6	426821.21	0.53
1.7	396818.56	0.57
1.8	365617.64	0.60
1.9	333850.11	0.63
2.0	302109.99	0.67
2.1	270936.71	0.70
2.2	240801.85	0.73
2.3	212100.16	0.77
2.4	185144.73	0.80
2.5	160166.22	0.83
2.6	137315.54	0.87
2.7	116669.58	0.90
2.8	98239.20	0.93
2.9	81978.73	0.97
3.0	67796.41	1.00
3.1	55565.02	1.03
3.2	45132.09	1.07
3.3	36329.43	1.10
3.4	28981.51	1.13
3.5	22912.50	1.17
3.6	17952.02	1.20
3.7	13939.37	1.23
3.8	10726.61	1.27
3.9	8180.33	1.30
4.0	6182.56	1.33
4.1	4630.79	1.37
4.2	3437.41	1.40
4.3	2528.69	1.43
4.4	1843.53	1.47
4.5	1331.97	1.50
4.6	953.73	1.53
4.7	676.78	1.57
4.8	475.95	1.60
4.9	331.71	1.63
5.0	229.11	1.67
5.1	156.83	1.70
5.2	106.39	1.73
5.3	71.52	1.77
5.4	47.65	1.80
5.5	31.47	1.83
5.6	20.59	1.87
5.7	13.35	1.90
5.8	8.58	1.93
5.9	5.47	1.97
6.0	3.40	2.00

## ANEXO C.2. Constantes para gráficos de control.

Observaciones en la muestra	Gráfico para promedios			Gráfico para desviaciones estándar		Gráfico para rangos						
	Factores para los límites de control			Factores para la línea central		Factores para la línea central		Factores para los límites de control				
n	A	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	1/C <sub>4</sub>	d <sub>2</sub>	1/d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
2	2.1210	1.8800	2.6590	0.7979	1.2533	1.1280	0.8865	0.8530	0.0000	3.6870	0.0000	3.2686
3	1.7320	1.0230	1.9540	0.8862	1.1284	1.6930	0.5907	0.8880	0.0000	4.3570	0.0000	2.5735
4	1.5000	0.7290	1.6280	0.9213	1.0854	2.0590	0.4857	0.8800	0.0000	4.6990	0.0000	2.2822
5	1.3420	0.5770	1.4270	0.9400	1.0638	2.3260	0.4299	0.8640	0.0000	4.9180	0.0000	2.1144
6	1.2250	0.4830	1.2870	0.9515	1.0510	2.5340	0.3946	0.8480	0.0000	5.0780	0.0000	2.0039
7	1.1340	0.4190	1.1820	0.9594	1.0423	2.7040	0.3698	0.8330	0.2050	5.2030	0.0758	1.9242
8	1.0610	0.3730	1.0990	0.9650	1.0363	2.8470	0.3512	0.8200	0.3870	5.3070	0.1359	1.8641
9	1.0000	0.3370	1.0320	0.9693	1.0317	2.9700	0.3367	0.8080	0.5460	5.3940	0.1838	1.8162
10	0.9490	0.3080	0.9750	0.9727	1.0281	3.0780	0.3249	0.7970	0.6870	5.4690	0.2232	1.7768
11	0.9050	0.2850	0.9270	0.9754	1.0252	3.1730	0.3152	0.7870	0.8120	5.5340	0.2559	1.7441
12	0.8660	0.2660	0.8860	0.9776	1.0229	3.2580	0.3069	0.7780	0.9240	5.5920	0.2836	1.7164
13	0.8320	0.2490	0.8500	0.9794	1.0210	3.3360	0.2998	0.7700	1.0260	5.6460	0.3076	1.6924
14	0.8020	0.2350	0.8170	0.9810	1.0194	3.4070	0.2935	0.7630	1.1180	5.6960	0.3281	1.6719
15	0.7750	0.2230	0.7890	0.9823	1.0180	3.4720	0.2880	0.7560	1.2040	5.7400	0.3468	1.6532
16	0.7500	0.2120	0.7630	0.9835	1.0168	3.5320	0.2831	0.7500	1.2820	5.7820	0.3630	1.6370
17	0.7280	0.2030	0.7390	0.9845	1.0157	3.5880	0.2787	0.7440	1.3560	5.8200	0.3779	1.6221
18	0.7070	0.1940	0.7180	0.9854	1.0148	3.6400	0.2747	0.7390	1.4230	5.8570	0.3909	1.6091
19	0.6880	0.1870	0.6980	0.9862	1.0140	3.6890	0.2711	0.7340	1.4870	5.8910	0.4031	1.5969
20	0.6710	0.1800	0.6800	0.9869	1.0133	3.7350	0.2677	0.7290	1.5480	5.9220	0.4145	1.5855
21	0.6550	0.1730	0.6630	0.9876	1.0126	3.7780	0.2647	0.7240	1.6060	5.9500	0.4251	1.5749
22	0.6400	0.1670	0.6470	0.9882	1.0119	3.8190	0.2618	0.7200	1.6590	5.9790	0.4344	1.5656
23	0.6260	0.1620	0.6330	0.9887	1.0114	3.8580	0.2592	0.7160	1.7100	6.0060	0.4432	1.5568
24	0.6120	0.1570	0.6190	0.9892	1.0109	3.8950	0.2567	0.7120	1.7590	6.0310	0.4516	1.5484
25	0.6000	0.1530	0.6060	0.9896	1.0105	3.9310	0.2544	0.7080	1.8070	6.0550	0.4597	1.5403

## ANEXO C.3. Escalas para severidad, ocurrencia y detección.

Severidad		Ocurrencia		Detección	
Nivel	Descripción	Nivel	Descripción	Nivel	Descripción
1	Menor: Es irrazonable esperar que la naturaleza menor de esta falla pudiera causar cualquier efecto sobre el producto. El cliente probablemente no se percatará de la falla.	1	Probabilidad remota de ocurrencia (1/10000).	1	Muy alto: Los controles casi siempre detectarán la presencia de un defecto (99.99%).
2-3	Bajo: Este bajo nivel se debe a que la naturaleza de la falla sólo causa una ligera inconformidad del cliente. El cliente probablemente notará un ligero deterioro del producto, una ligera inconveniencia en el próximo proceso o acciones mínimas de retrabajo.	2-5	Baja probabilidad de ocurrencia (1/5000-1/500). Proceso en control estadístico.	2-5	Alto: Los controles tienen una buena oportunidad de detectar la existencia de una falla (99.80%).
4-6	Moderado: Se aplica este nivel cuando las fallas causan alguna insatisfacción. El cliente está inconforme por la falla. Puede causar la realización de cierto retrabajo y/o daño a equipo.	6-7	Moderada probabilidad de ocurrencia. Proceso en control estadístico con fallas ocasionales (1/200-1/100).	6-8	Moderado: Los controles pueden detectar la existencia de un defecto (98.00%).
7-8	Alto: Existe alto grado de insatisfacción del cliente debido a la naturaleza de la falla, tal como un producto inoperable. Puede causar problemas en los siguientes procesos o servicios.	8-9	Alta probabilidad de ocurrencia. Proceso en control estadístico con fallas que ocurren frecuentemente (1/100-1/20).	9	Bajo: Los controles frecuentemente no detectarán la existencia de un defecto (> 90%).
9-10	Muy alto: Existe muy alta severidad cuando los efectos de falla violan la seguridad e involucra la no satisfacción de regulaciones gubernamentales	10	Muy alta probabilidad de ocurrencia: Las fallas ocurren de manera muy frecuente (1/10).	10	Muy bajo: Los controles muy frecuentemente no detectarán la presencia de un defecto (< 90.00%).

ANEXO C.4. Diseños factoriales fraccionales a dos niveles para k variables y N experimentos [32].

		Número de variables, k									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Número de experimentos, N	4	$2^{3-1}$ III ± 3 = 12									
	8	$2^3$	$2^{4-1}$ IV ± 4 = 123	$2^{5-2}$ III ± 4 = 12 ± 5 = 13	$2^{6-3}$ III ± 4 = 12 ± 5 = 13 ± 6 = 23	$2^{7-4}$ III ± 4 = 12 ± 5 = 13 ± 6 = 23 ± 7 = 123					
	16	$2^3$ 2 veces	$2^4$	$2^{5-1}$ V ± 5 = 1234	$2^{6-2}$ IV ± 5 = 123 ± 6 = 234	$2^{7-3}$ IV ± 5 = 123 ± 6 = 234 ± 7 = 134	$2^{8-4}$ IV ± 5 = 234 ± 6 = 134 ± 7 = 123 ± 8 = 124	$2^{9-5}$ III ± 5 = 123 ± 6 = 234 ± 7 = 134 ± 8 = 124 ± 9 = 1234	$2^{10-6}$ III ± 5 = 123 ± 6 = 234 ± 7 = 134 ± 8 = 124 ± 9 = 1234 ± 10 = 12	$2^{11-7}$ III ± 5 = 123 ± 6 = 234 ± 7 = 134 ± 8 = 124 ± 9 = 1234 ± 10 = 12 ± 11 = 13	
	32	$2^3$ 4 veces	$2^4$ 2 veces	$2^5$	$2^{6-1}$ VI ± 6 = 12345	$2^{7-2}$ IV ± 6 = 1234 ± 7 = 1245	$2^{8-3}$ IV ± 6 = 123 ± 7 = 124 ± 8 = 2345	$2^{9-4}$ IV ± 6 = 2345 ± 7 = 1345 ± 8 = 1245 ± 9 = 1235	$2^{10-5}$ IV ± 6 = 1234 ± 7 = 1235 ± 8 = 1245 ± 9 = 1345 ± 10 = 2345	$2^{11-6}$ IV ± 6 = 123 ± 7 = 234 ± 8 = 345 ± 9 = 134 ± 10 = 145 ± 11 = 245	(1/256)
	64	$2^3$ 8 veces	$2^4$ 4 veces	$2^5$ 2 veces	$2^6$	$2^{7-1}$ VII ± 7 = 123456	$2^{8-2}$ V ± 7 = 1234 ± 8 = 1256	$2^{9-3}$ IV ± 7 = 1234 ± 8 = 1356 ± 9 = 3456	$2^{10-4}$ IV ± 7 = 2346 ± 8 = 1346 ± 9 = 1245 ± 10 = 1235	$2^{11-5}$ IV ± 7 = 345 ± 8 = 1234 ± 9 = 126 ± 10 = 2456 ± 11 = 1456	(1/128)
	128	$2^3$ 16 veces	$2^4$ 8 veces	$2^4$ 4 veces	$2^6$ 2 veces	$2^7$	$2^{8-1}$ VIII ± 8 = 1234567	$2^{9-2}$ VI ± 8 = 13467 ± 9 = 23567	$2^{10-3}$ V ± 8 = 1237 ± 9 = 2345 ± 10 = 1346	$2^{11-4}$ V ± 8 = 1237 ± 9 = 2345 ± 10 = 1346 ± 11 = 1234567	(1/64)
		(16)	(8)	(4)	(2)	(1)	(1/2)	(1/4)	(1/16)	(1/32)	





## ANEXO D. DEFINICIONES DE DEFECTOS

**Puente:** Cuando las terminales o conductores adyacentes están conectados por una cantidad de soldadura. En este trabajo para el caso de la impresión de pasta también se llama puente a la condición en la cual los depósitos de pasta de soldadura se encuentran uniendo pads consecutivos.

**Exceso:** Presencia de excesiva cantidad de soldadura en la unión, el filete tiene una superficie cóncava. En impresión de pasta el exceso se manifiesta por un depósito no uniforme sobre los pads, las paredes del depósito no son derechas y se aprecia un desborde de pasta sobre el pad; puede considerarse que existe un exceso en impresión cuando la pasta sobresale más del 25% del espacio asignado para separar pads consecutivos.

**Insuficiencia:** Logra apreciarse poca soldadura en la unión. Para el caso de la impresión de pasta un criterio usado considera insuficiencia si las hendiduras o huecos debidos a la insuficiencia reducen el área del pad por más del 10%.

**Desalineamiento:** Este defecto en impresión de pasta consiste en que la pasta impresa no está debidamente centrada en el pad correspondiente. Un criterio aplicado indica que se presenta este defecto si el desalineamiento de la pasta es superior al 25% del largo o el ancho del pad.

**Pico:** Un pico es una protuberancia presente en la pasta impresa. Generalmente cada tipo de producto tiene una cierta especificación en cuanto a la altura máxima permitida para la pasta impresa.

**Componente movido:** Este defecto se presenta cuando la terminal del componente sobresale más del 50% del ancho o el largo del pad. Para componentes sin patitas se aplican criterios similares que pueden ser consultados en la norma J-STD-001B.

**Faltante de componente:** Este defecto consiste en la falta de colocación de un componente.

**Polaridad invertida de componente:** Este defecto originado en la colocación de componentes consiste en que el componente fue colocado sobre los pads apropiados pero con la polaridad incorrecta.

**Componente equivocado:** Se presenta porque la máquina de colocación de componentes ensambla un cierto componente en los pads que no corresponden.

**No humidificación:** La soldadura líquida no entra en contacto con el metal de la terminal o de la pista, de tal forma que existen ángulos de contacto superiores a 90°. Puede estar encubierto por excesiva soldadura sobre la unión como cuando ocurre encapsulamiento de las terminales.

**Soldadura fría:** Se presenta este defecto cuando se observa que la pasta de soldadura no reflujo lo suficiente en el horno.

**Porosidad:** Cavidades esféricas pequeñas en la superficie de los filetes de soldadura.

**Componente levantado:** En este defecto se aprecia que el componente está levantado y por lo tanto una o más terminales del componente no están en contacto con sus pads respectivos.

**Unión fracturada:** En este defecto se aprecia agrietamiento de la soldadura provocando un desplazamiento de las terminales con respecto a la unión.

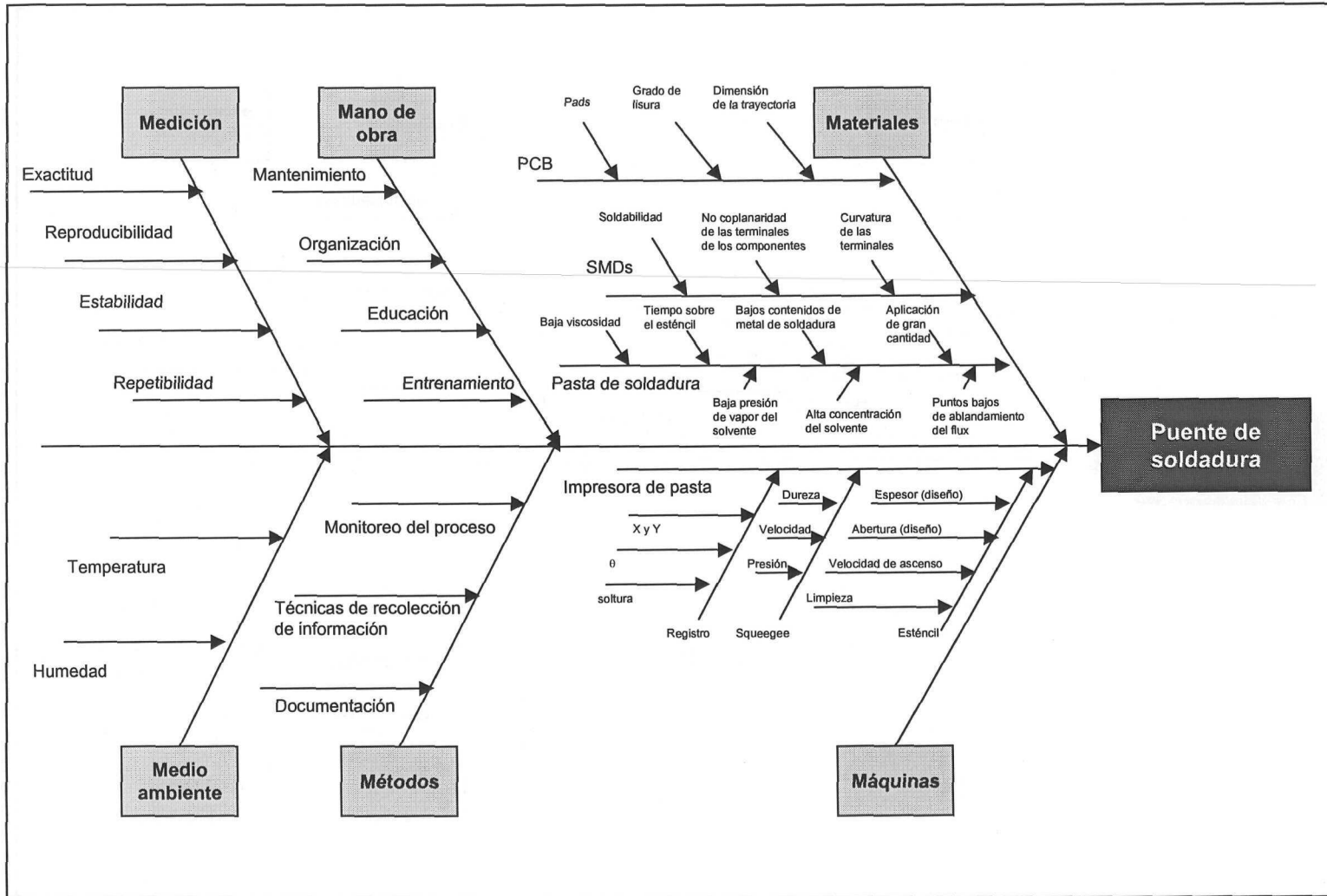
**Retracción de soldadura:** La soldadura se observa contraída, puede ser discontinua y formar glóbulos. La soldadura tiene una apariencia amarillenta.

**Bolas de soldadura:** Pequeñas esferas de soldadura que se presentan en las zonas cercanas a los componentes soldados.

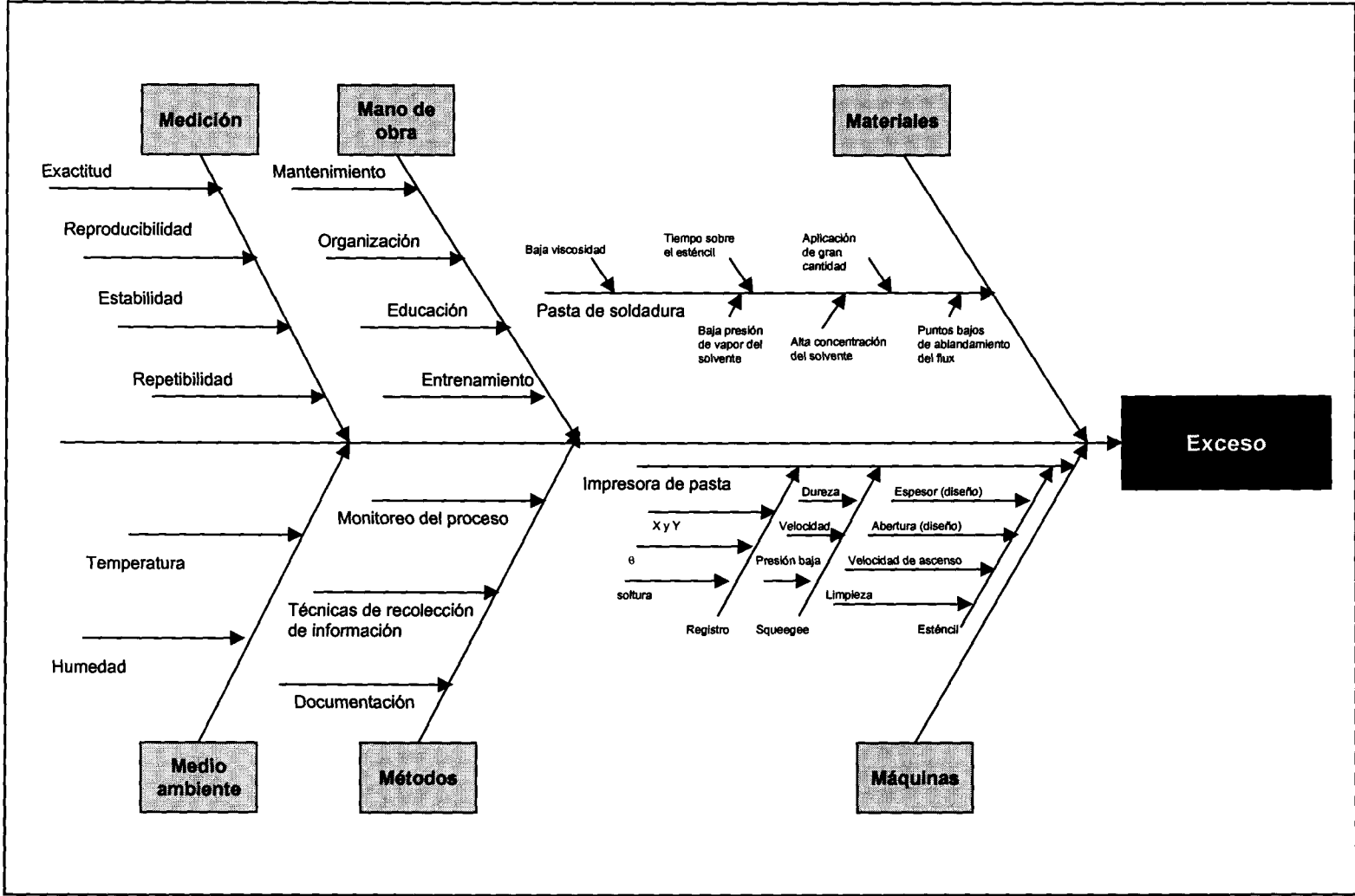
**Unión granulosa:** Apariencia granulosa de la soldadura donde se encuentran formados compuestos intermetálicos que tienen solubilidad limitada en soldadura.

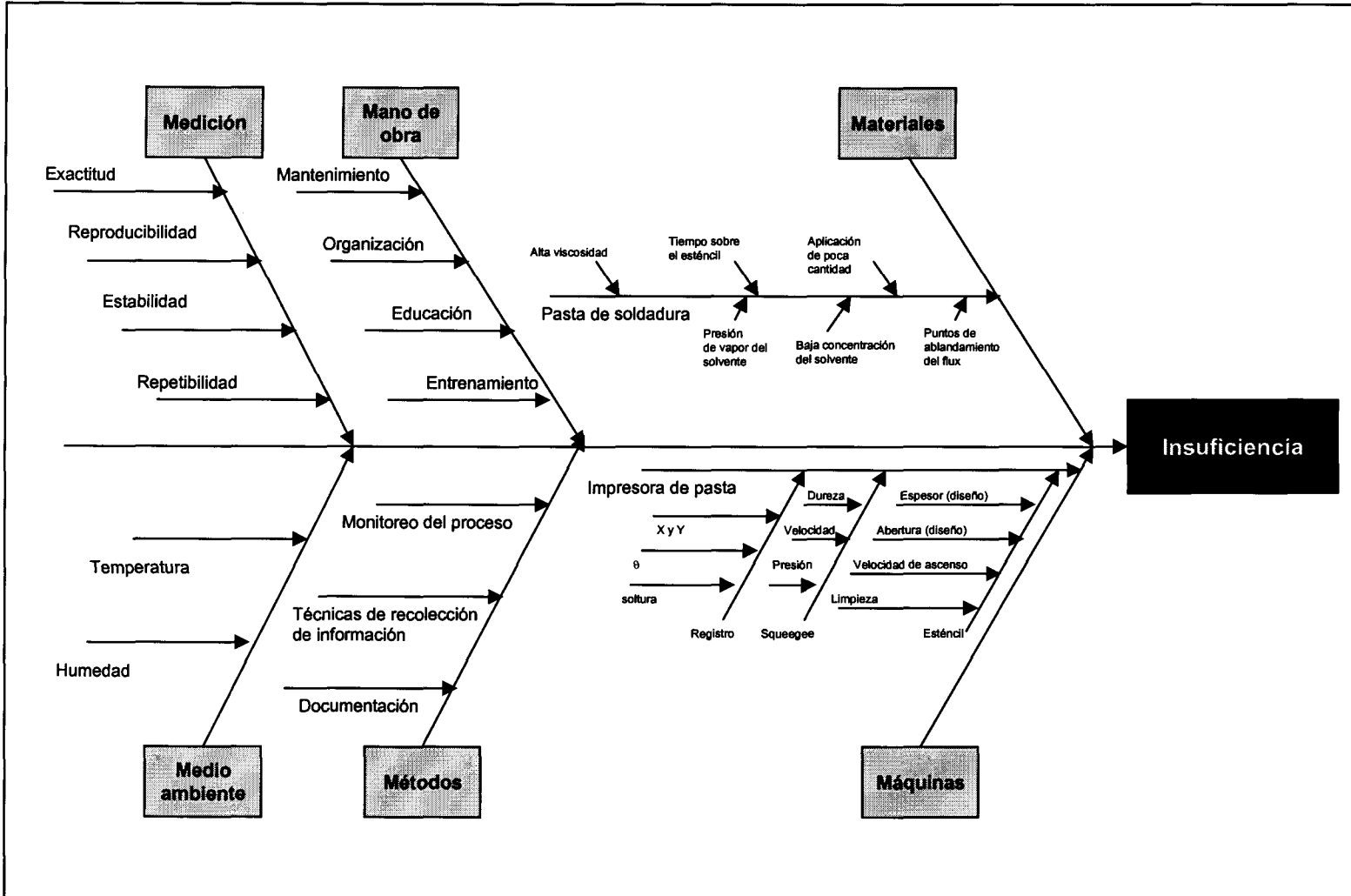
**Unión opaca:** Se presenta cuando la soldadura carece de brillo metálico. Debido a los diferentes tipos de pasta que existen, la apariencia opaca no indica necesariamente un defecto.

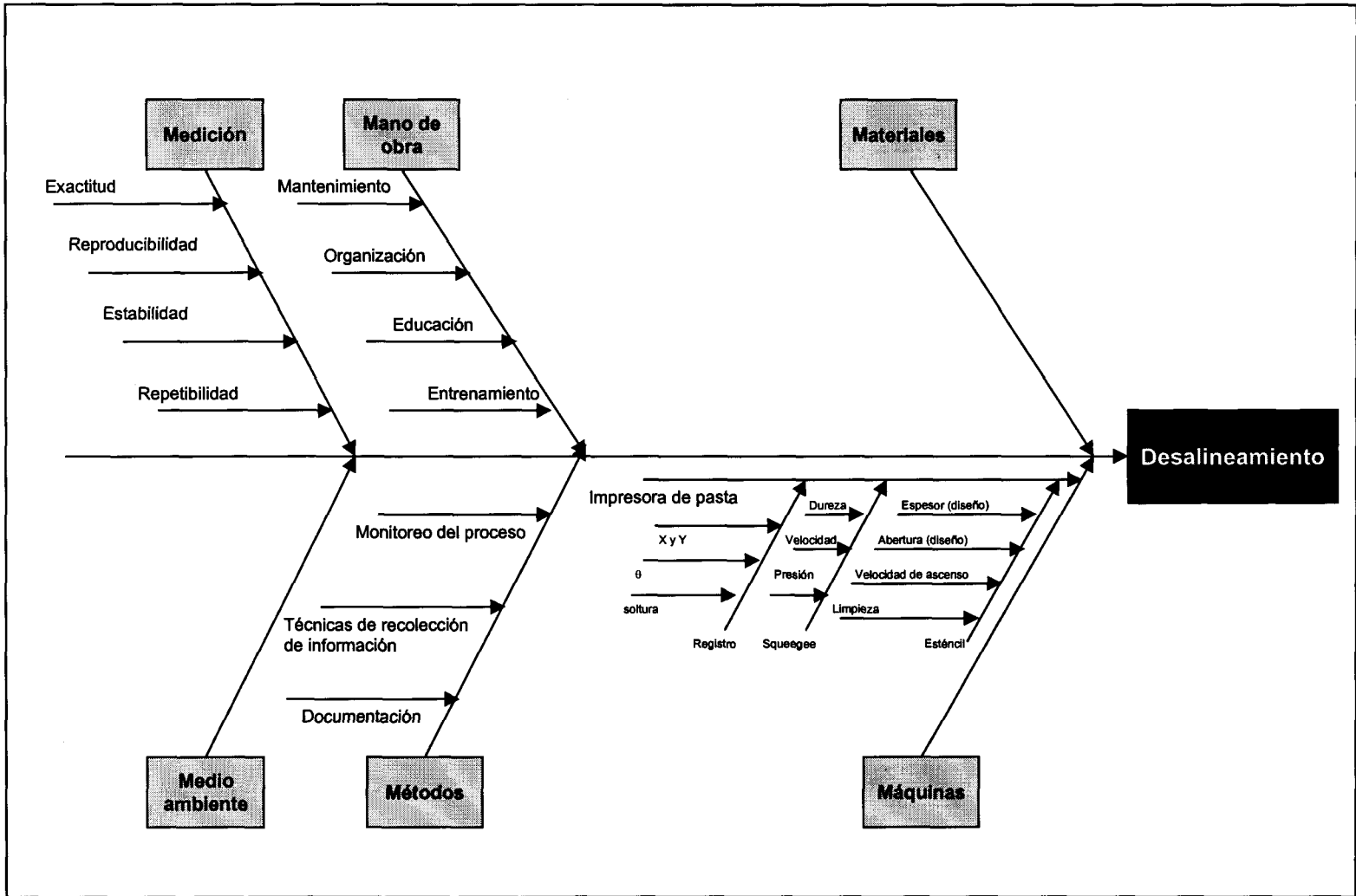




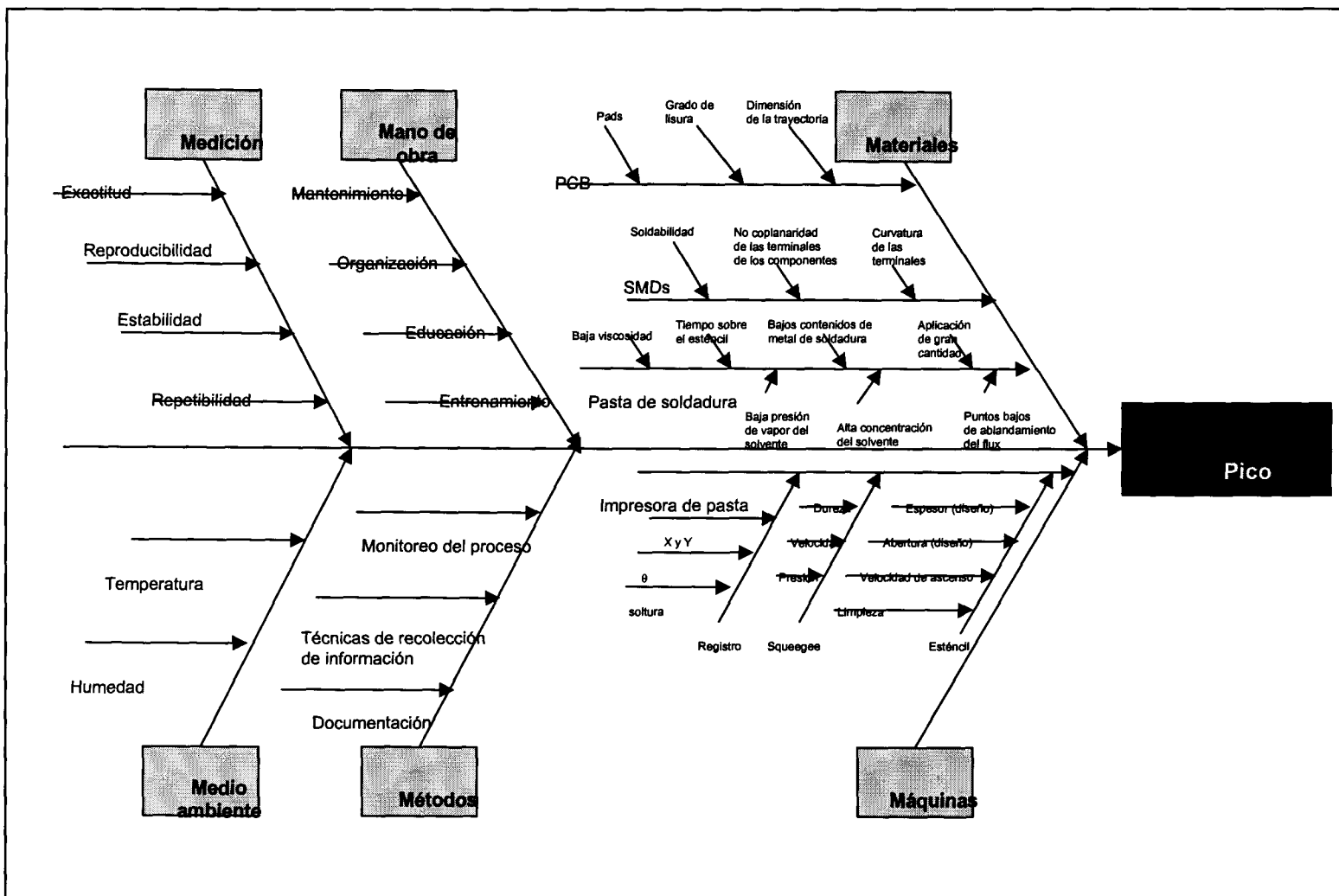
**ANEXO E. DIAGRAMAS DE CAUSA-EFECTO DE LOS DEFECTOS DE SOLDADURA**

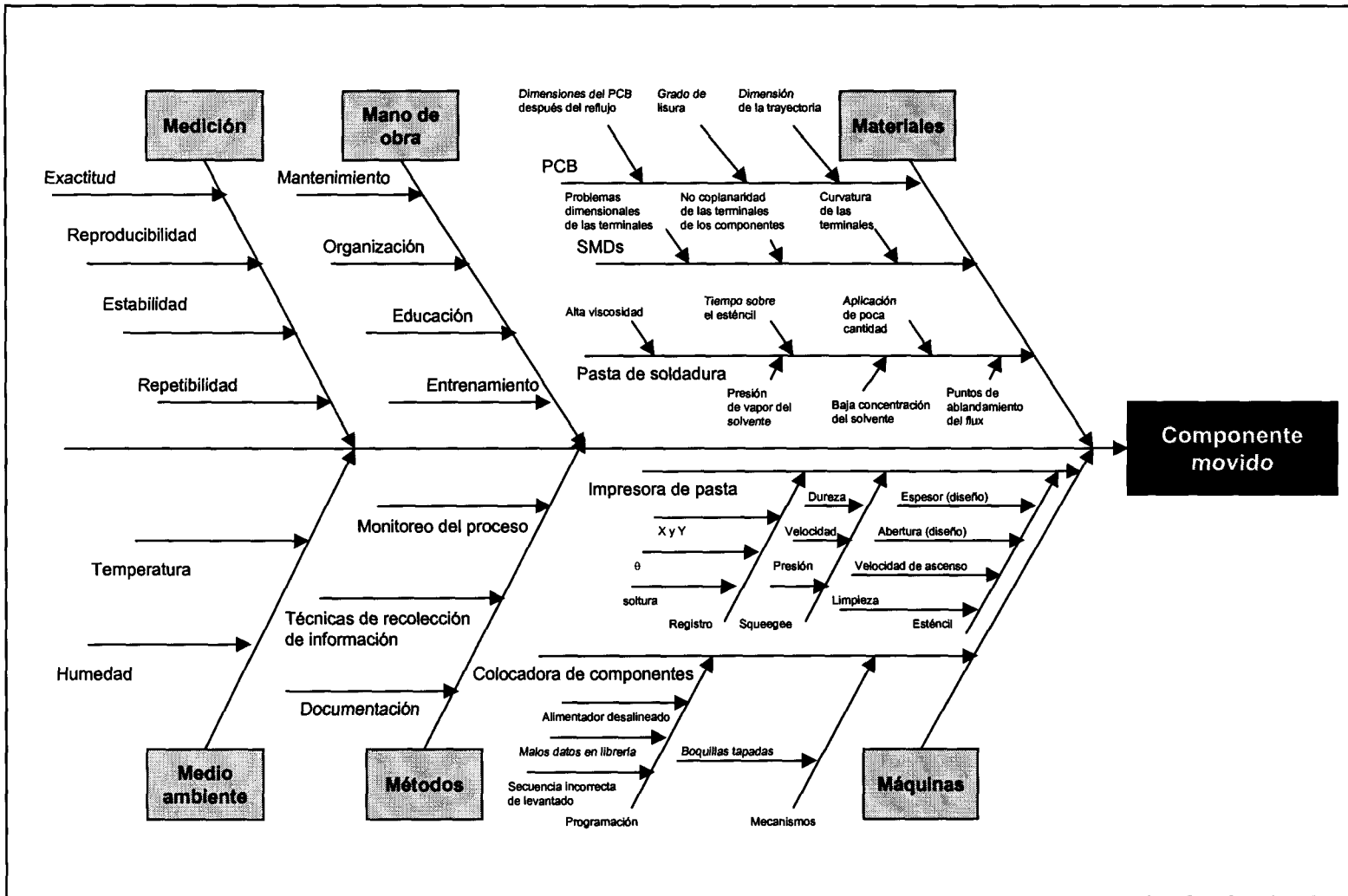


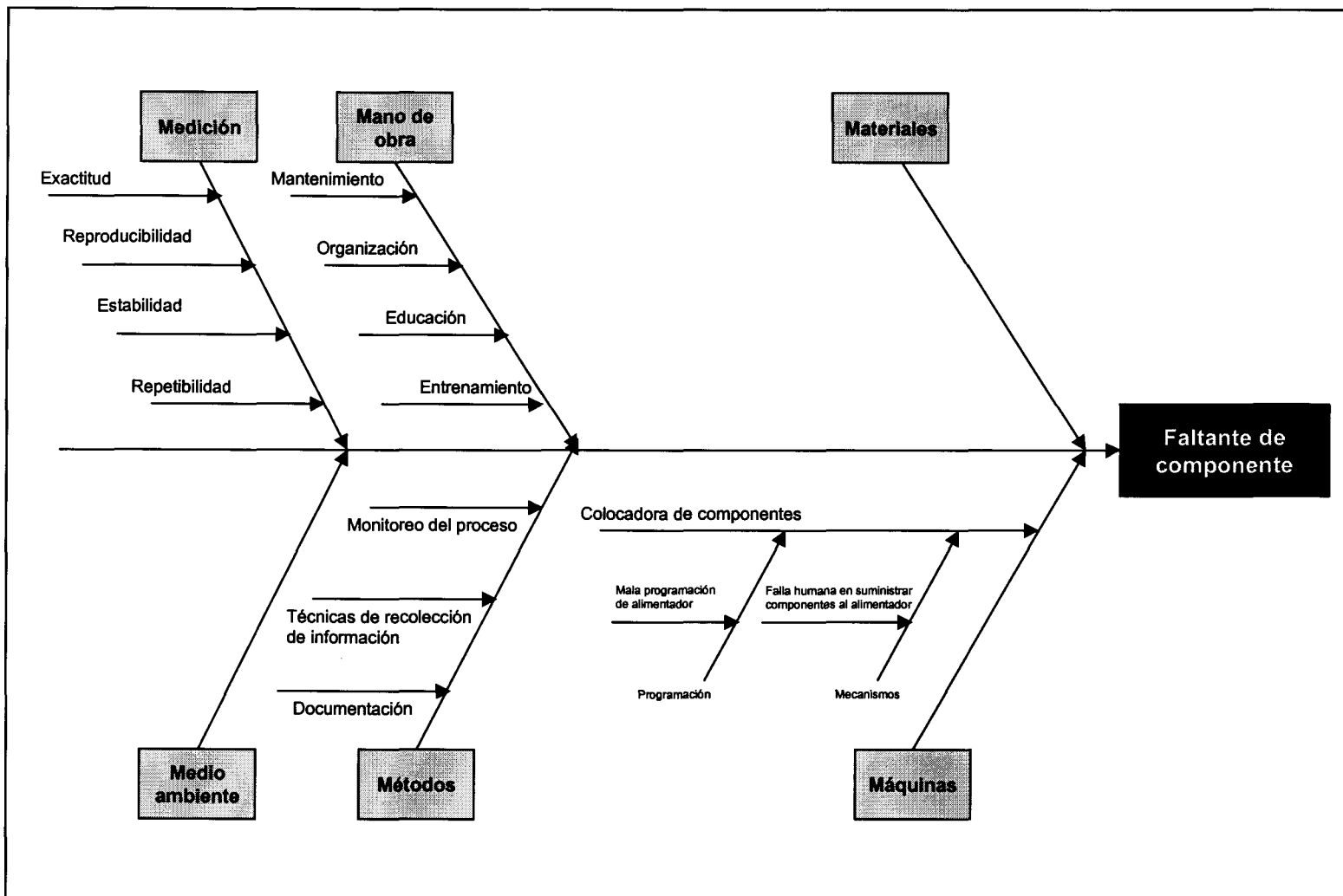


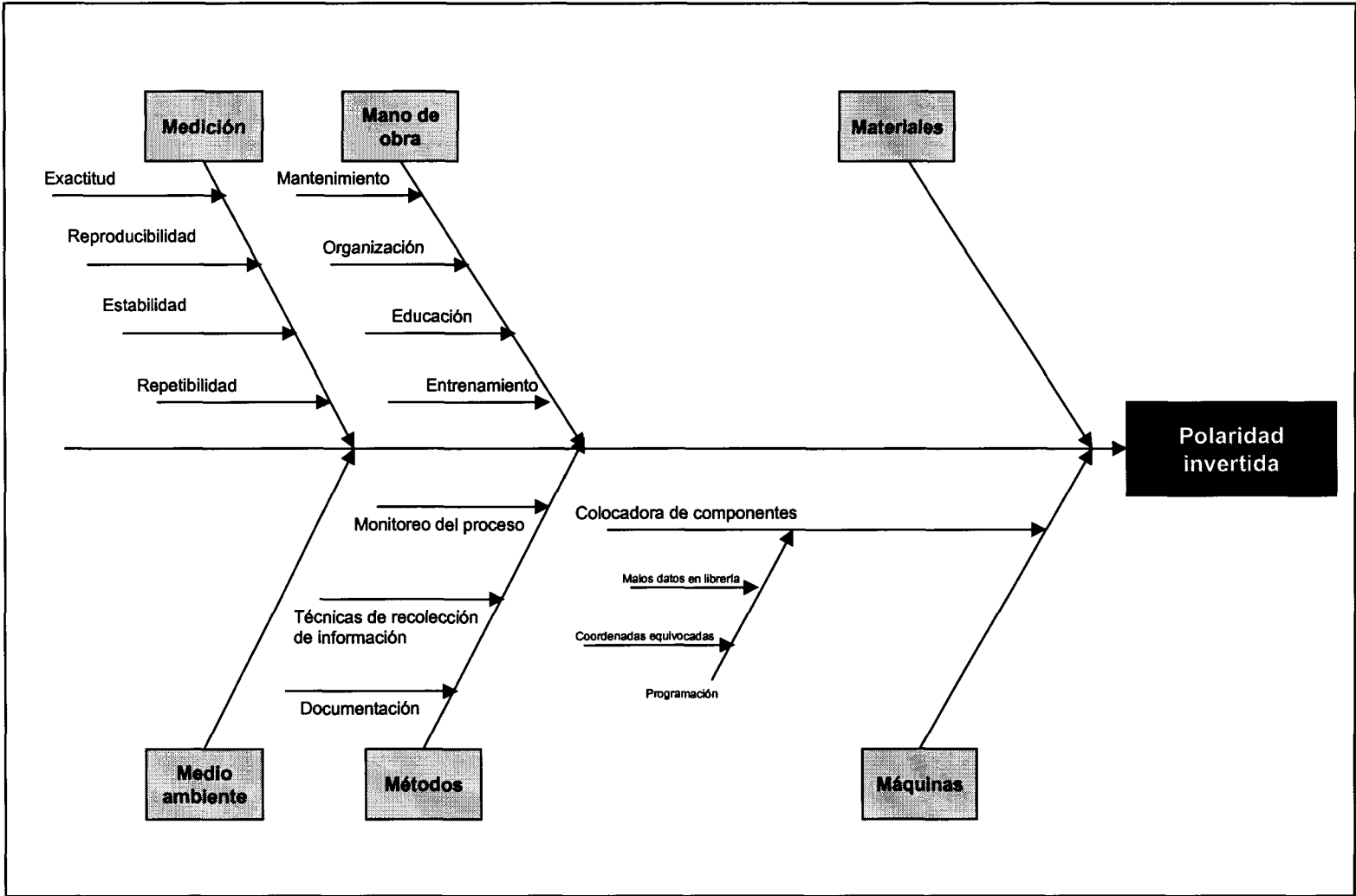


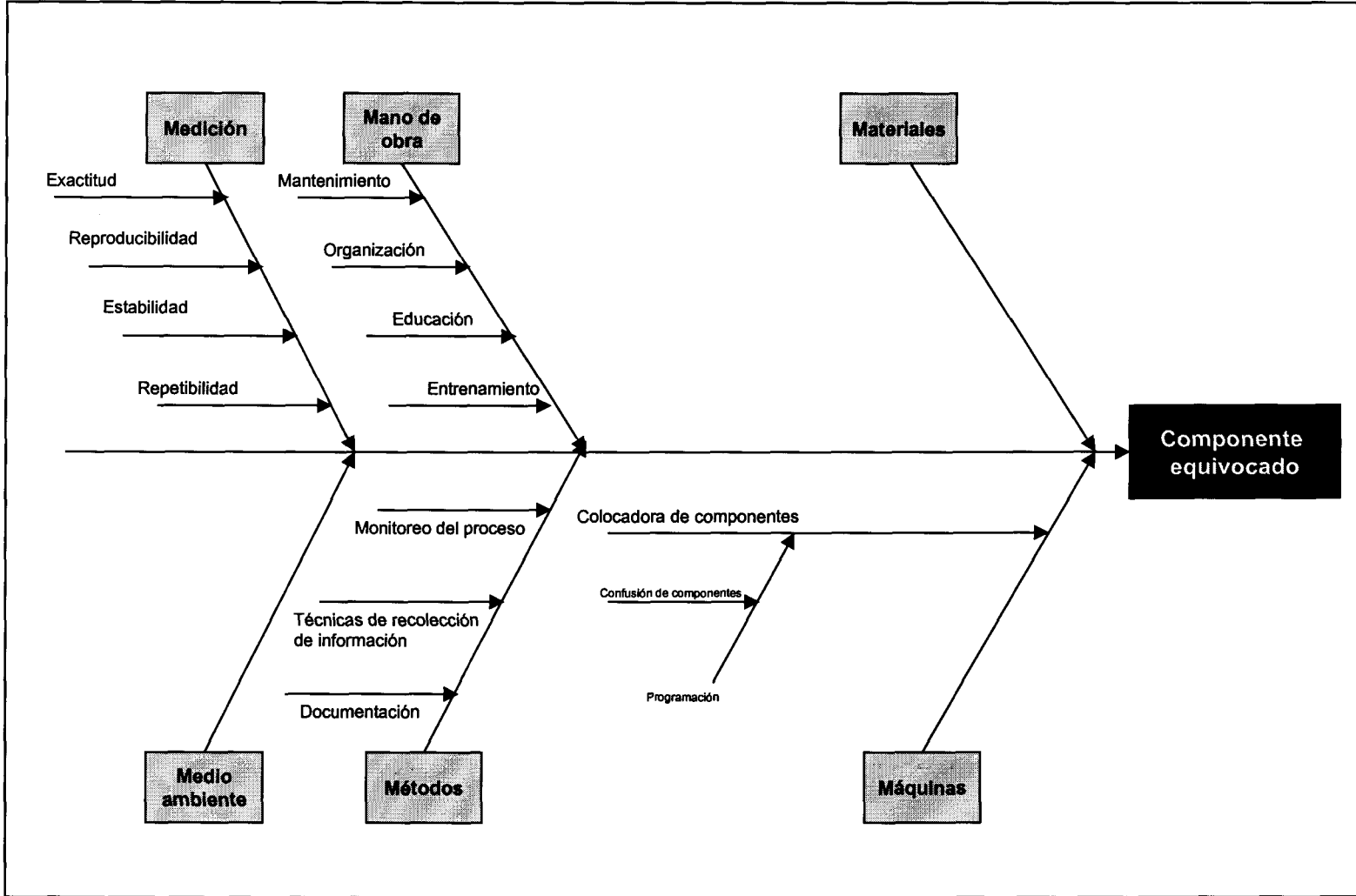


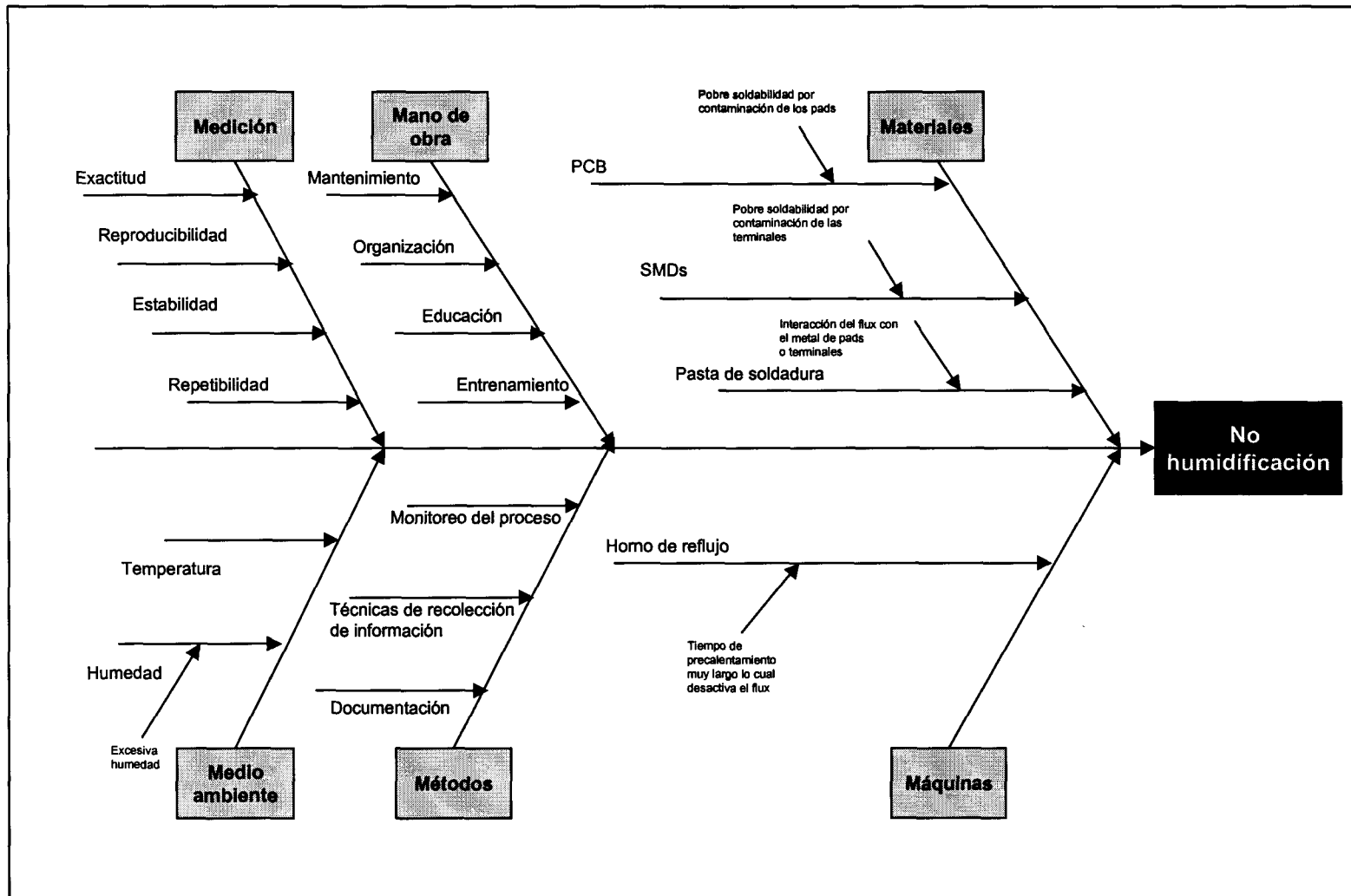


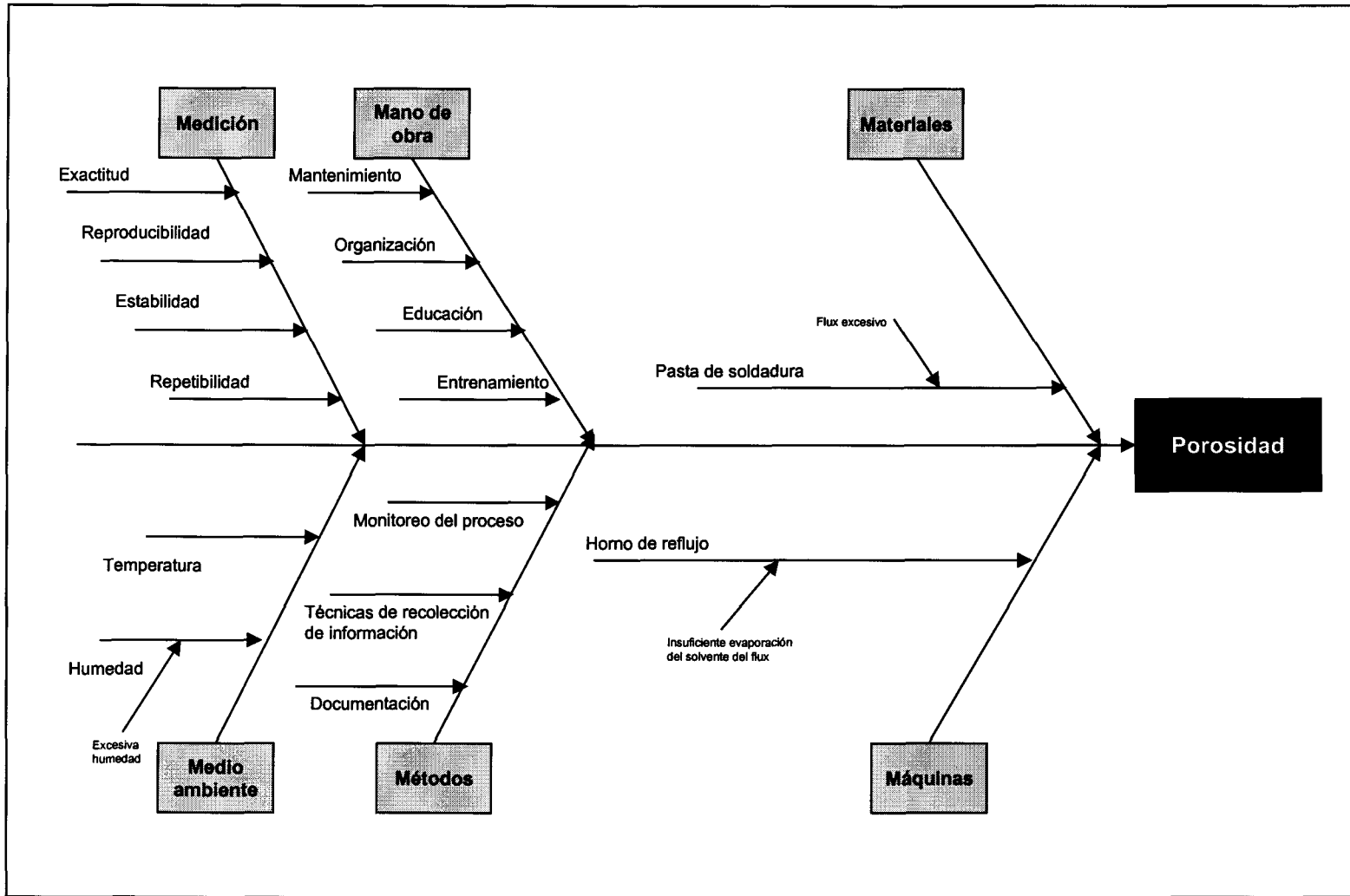


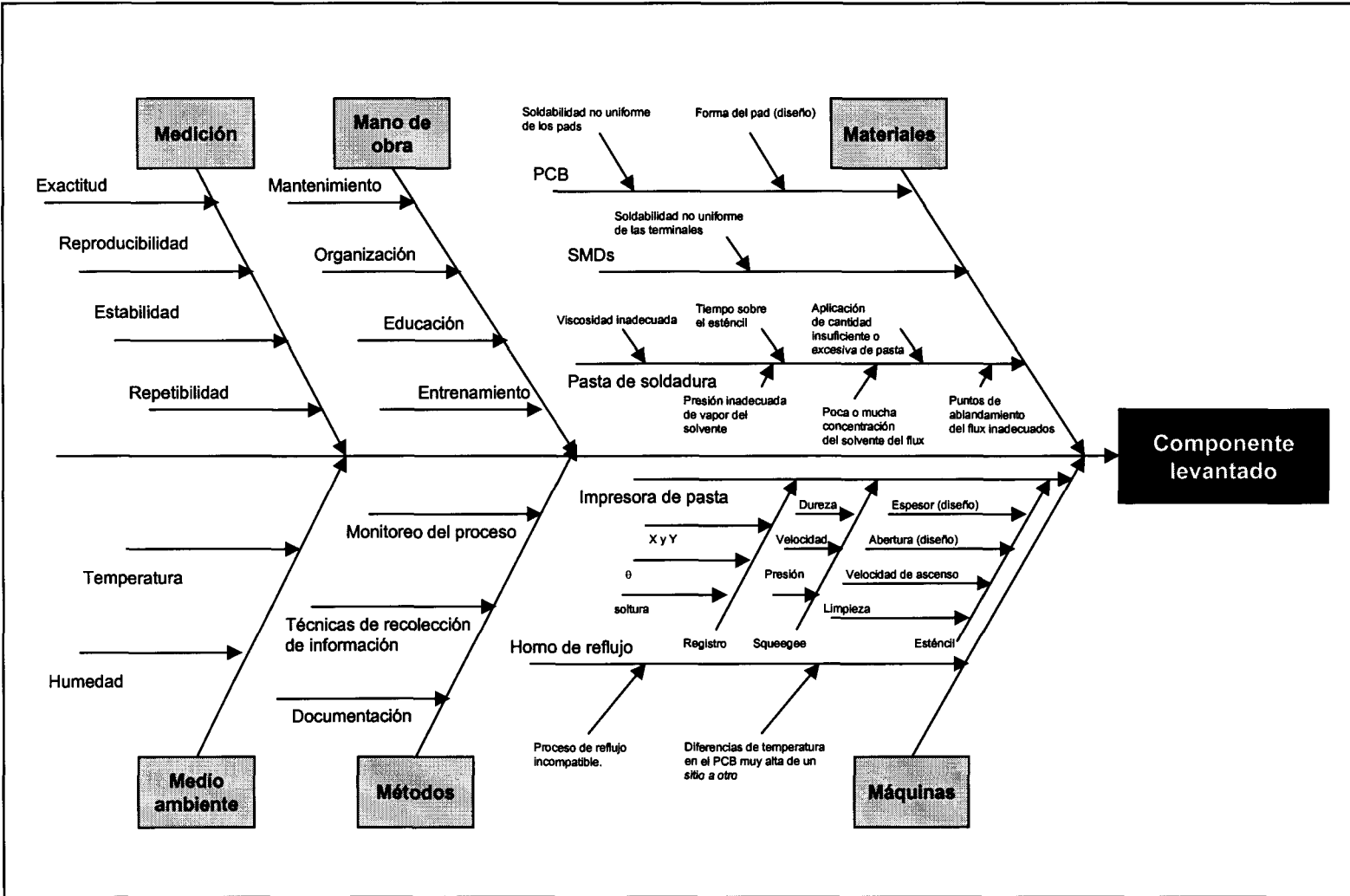




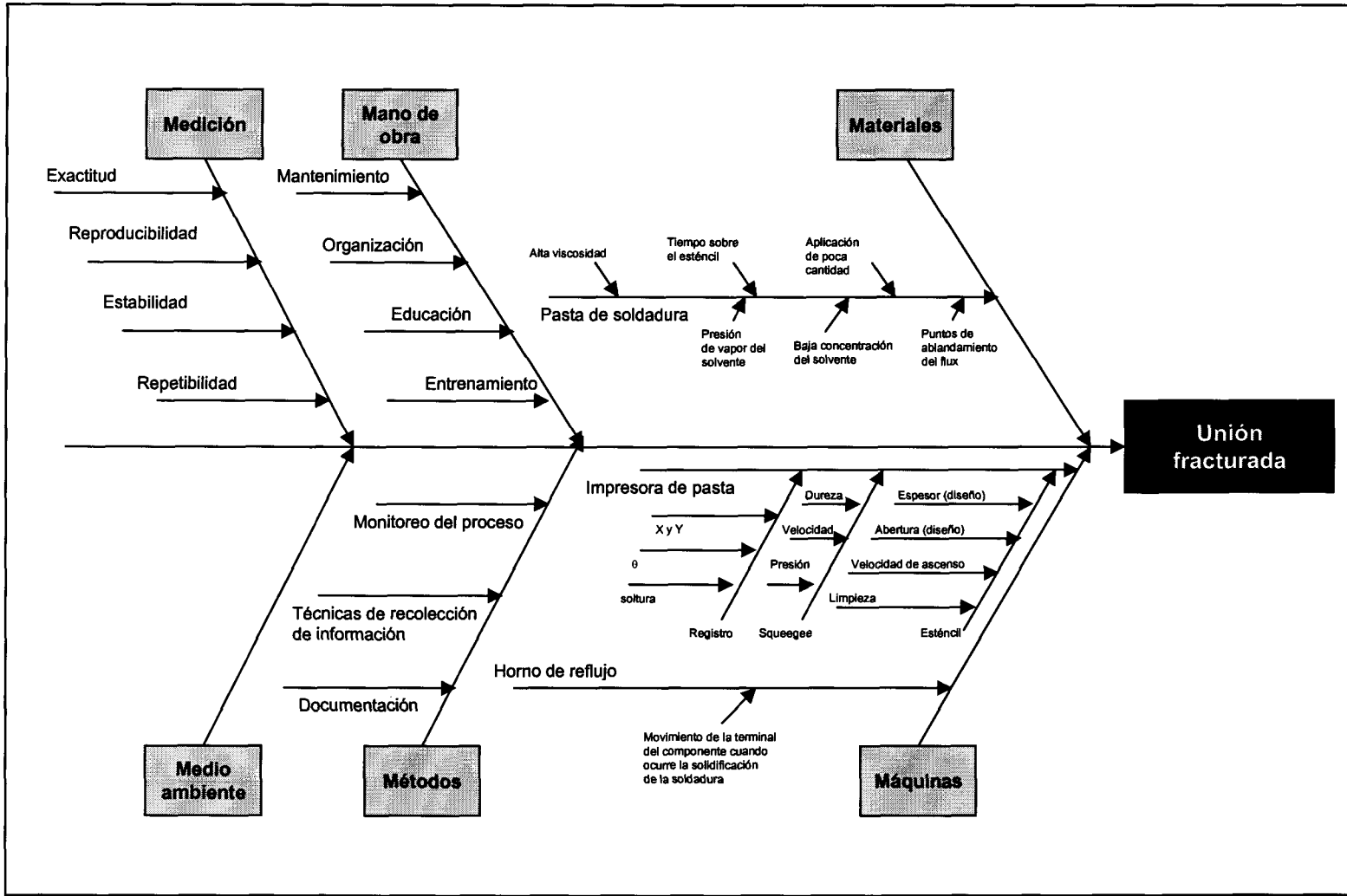


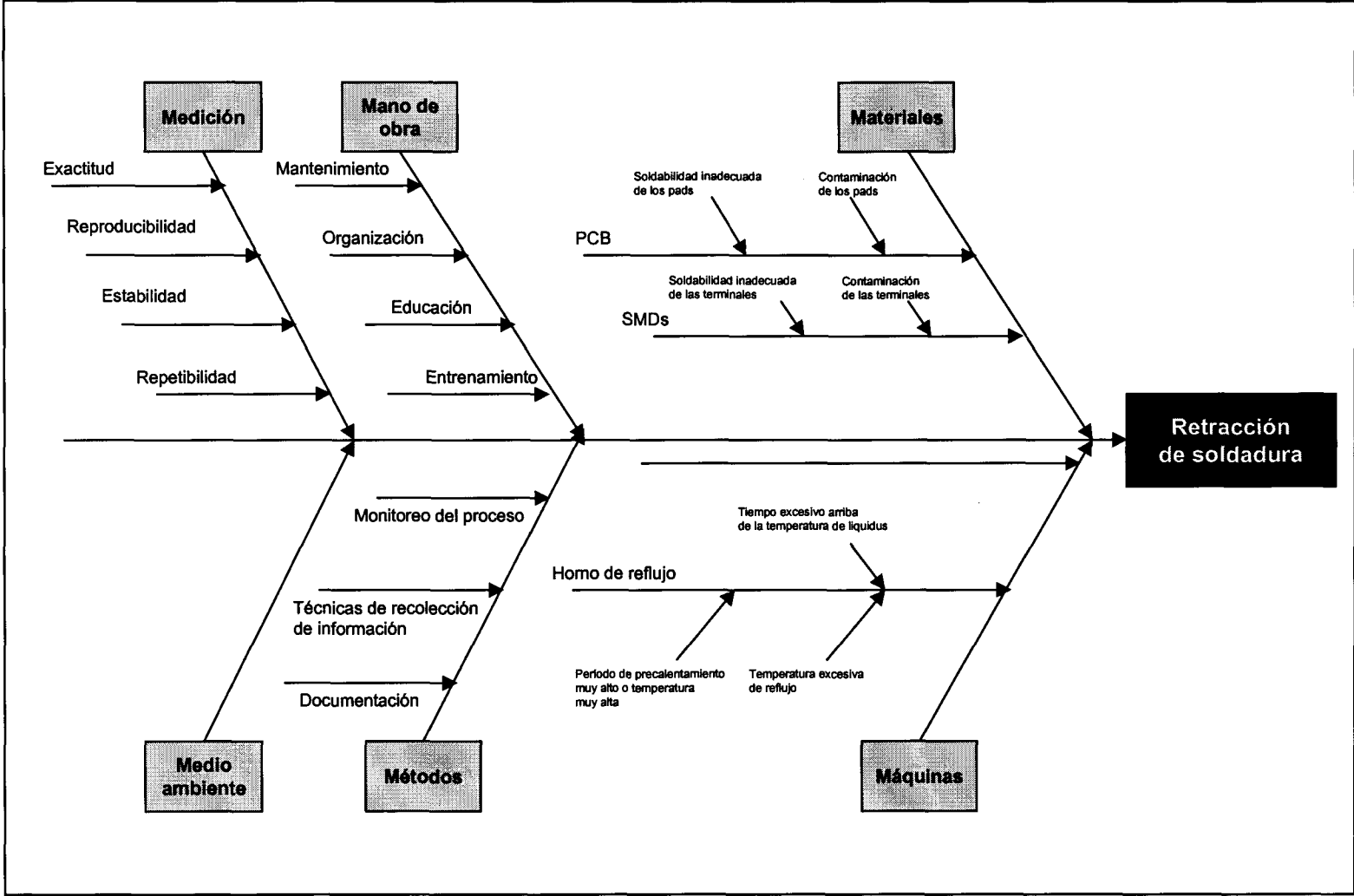


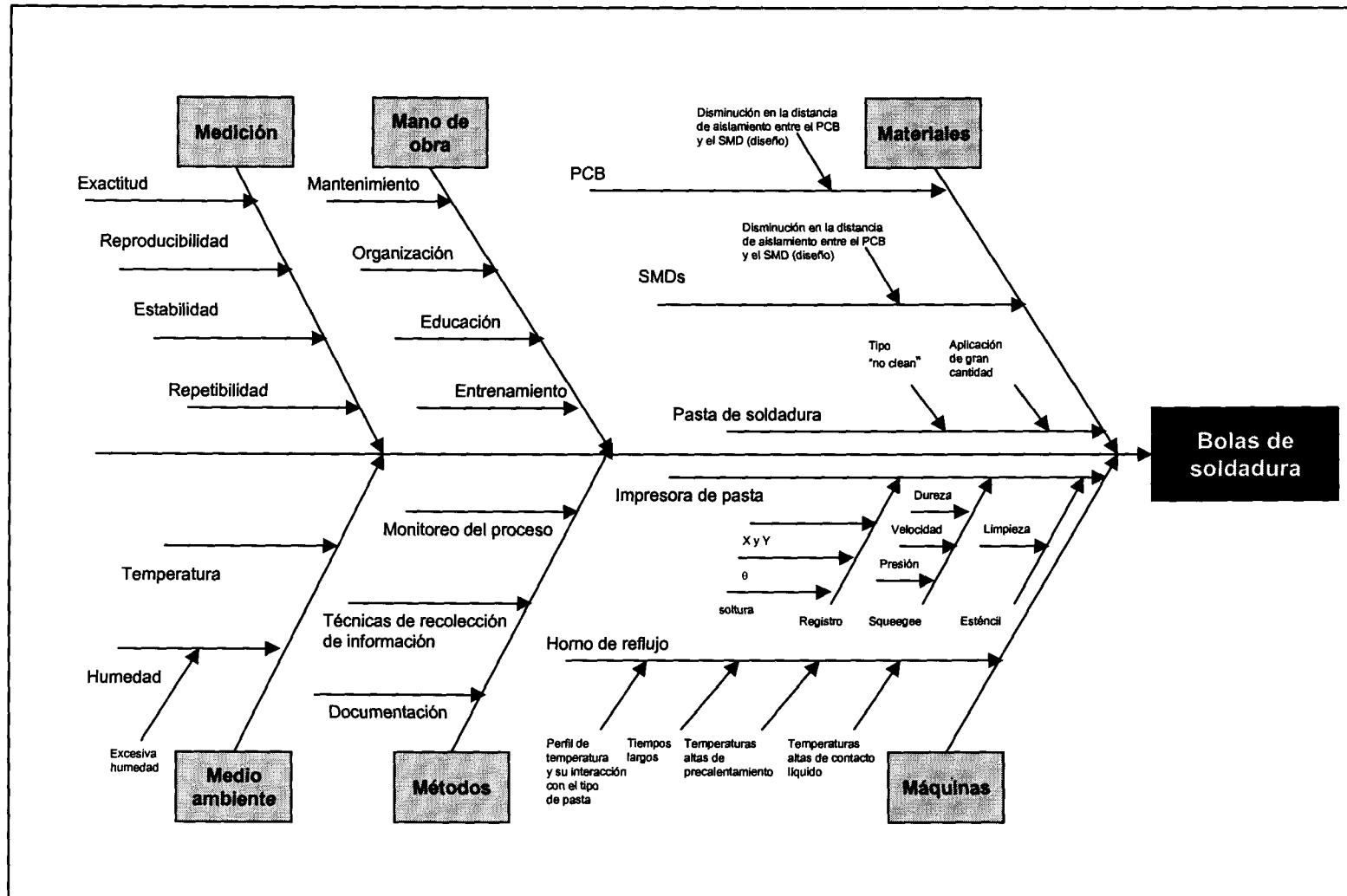


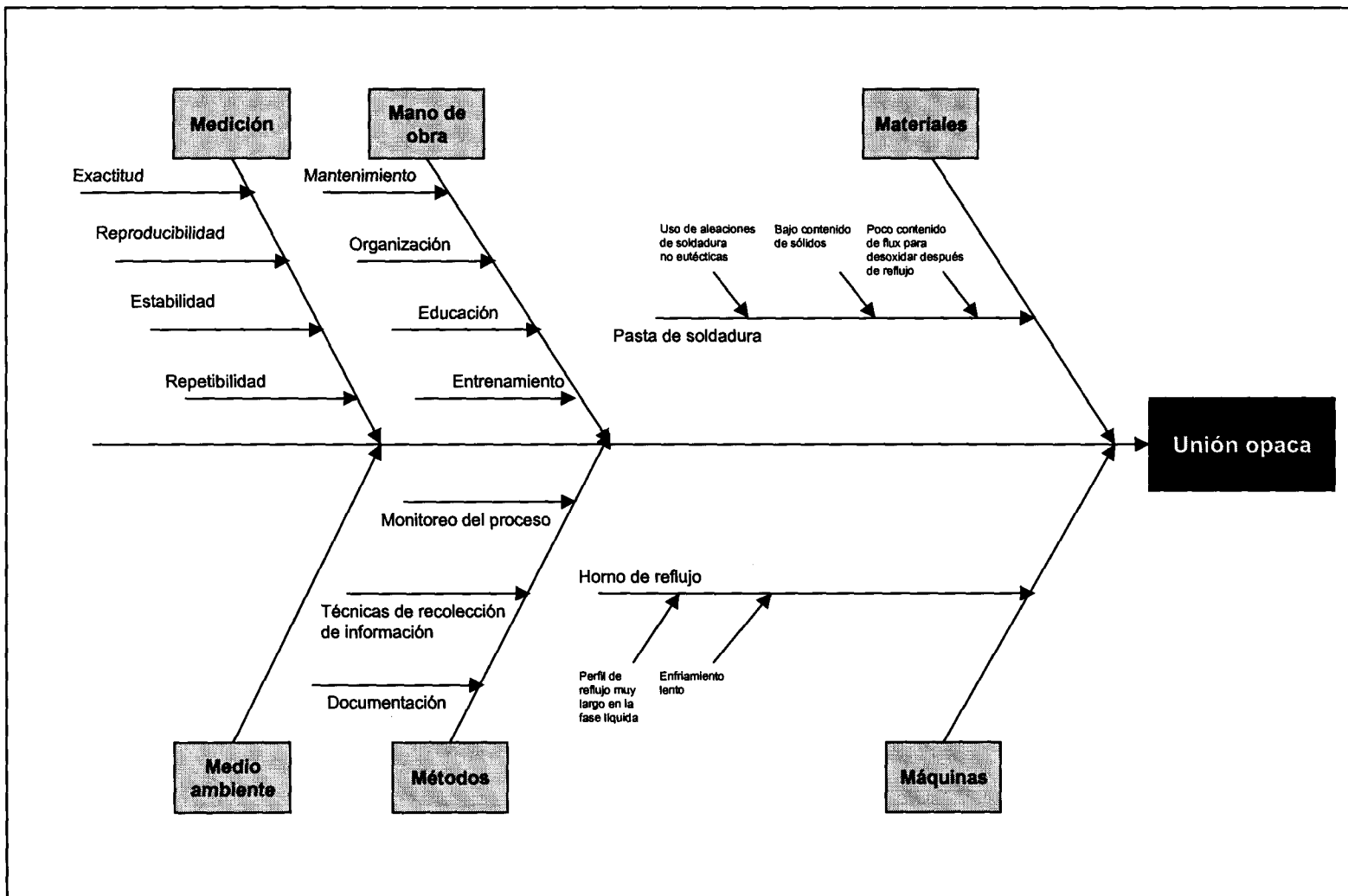


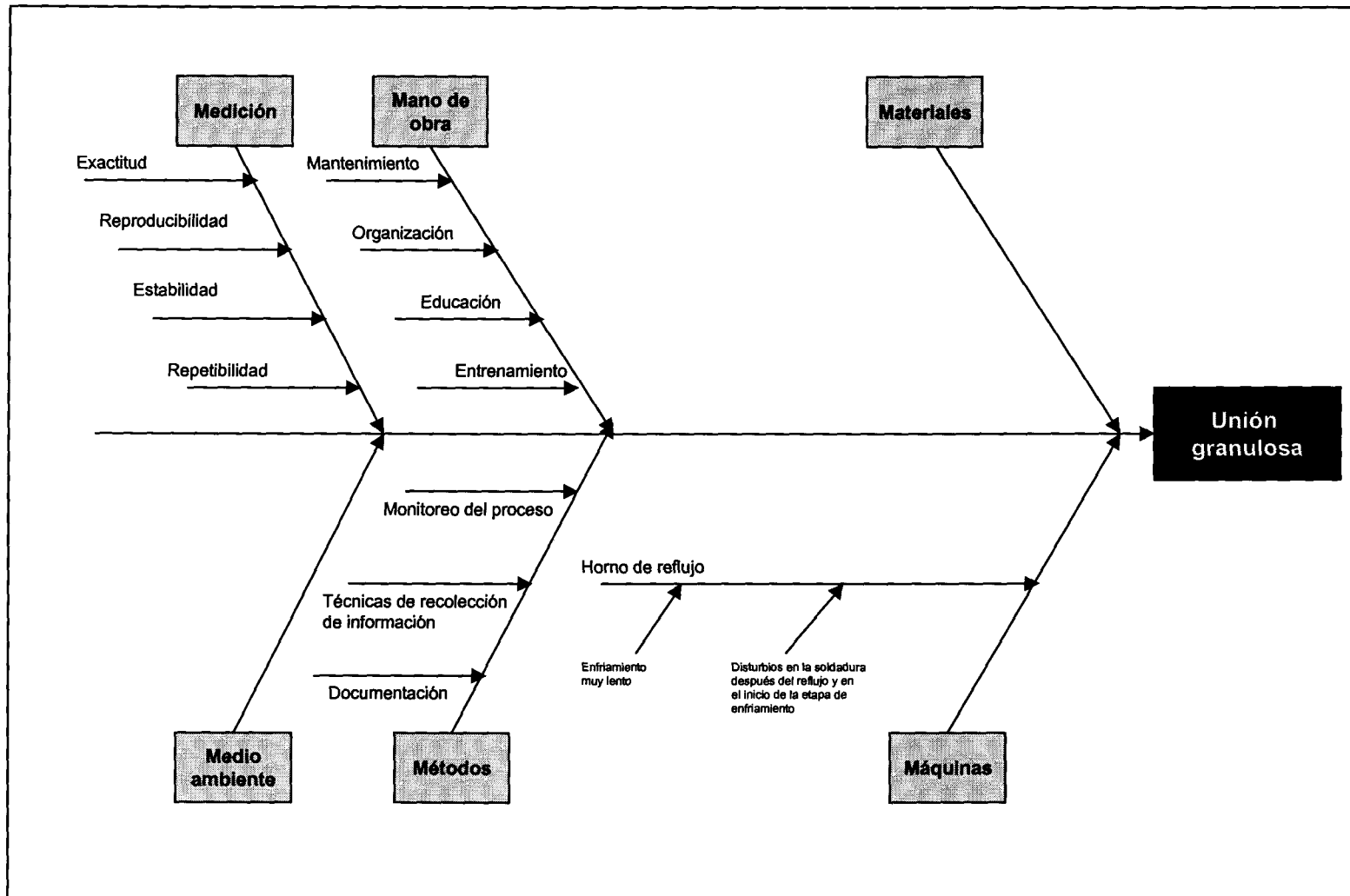


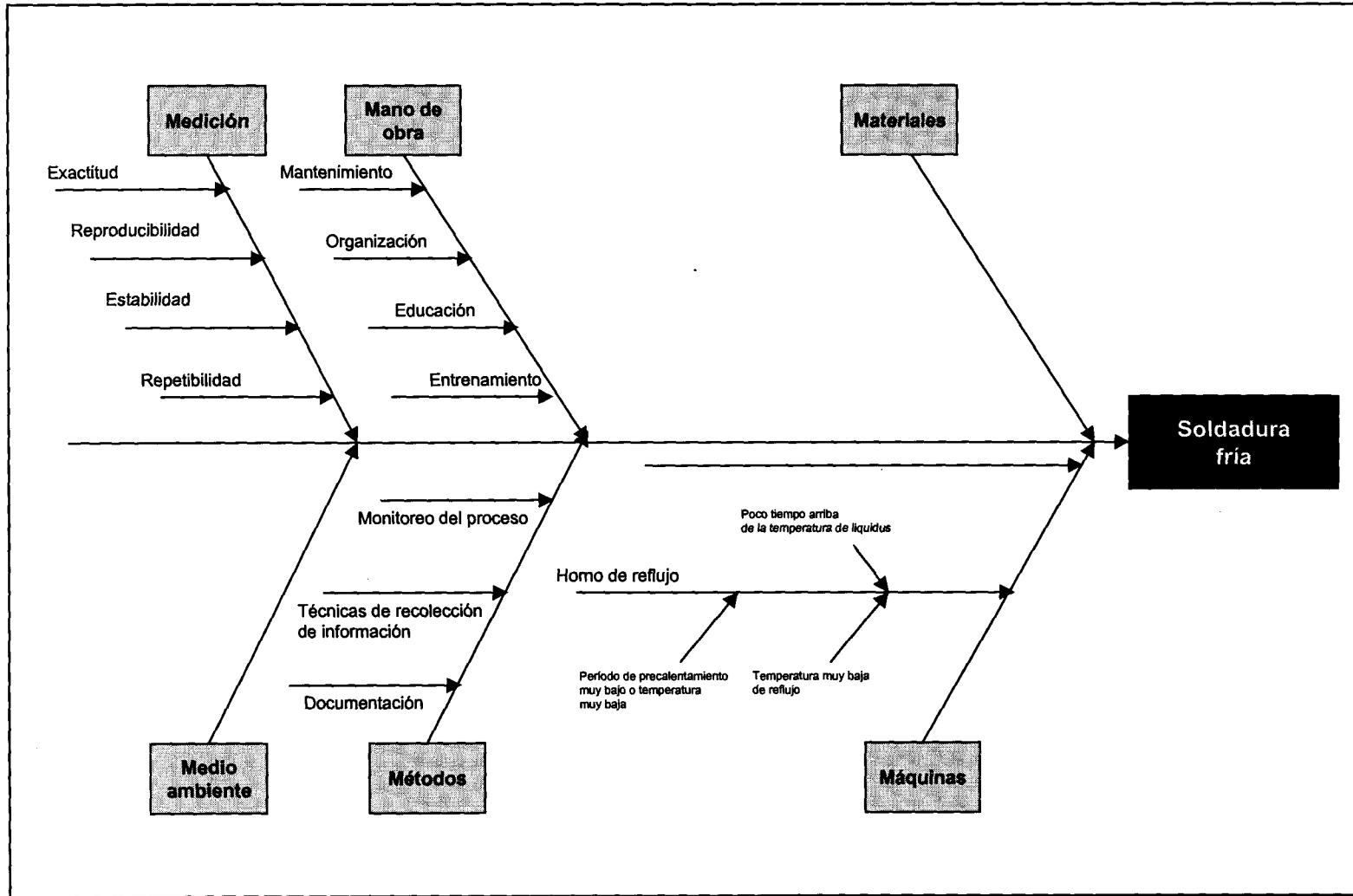












## ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA PARA IMPRESIÓN DE PASTA

Función del proceso	Modo potencial de falla	Efectos potenciales de falla	Característica crítica	SEV	Causas potenciales de falla	OCC	Método de detección	DET	RPN	Acción recomendada	Individuo/ Área responsable
Buena impresión de pasta en términos de sus CTQs	Puente	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	8	Cuando no cumple con altura: Velocidad y presión del squeegee, espesor y abertura del estencil	7	Antes de colocación de componentes: a) Lupa. Usar gráfico np b) Medidor de altura. Usar gráficos X-R Después de soldadura: a) Estereoscopio. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10	560	Cambiar velocidad o presión Cambiar el diseño del estencil	Operador Ingeniería
								9	504		
								9	504		
								2	112		
	Exceso	Próximos procesos: Puede provocar puente y componente levantado en soldadura Producto: Puede fallar Cliente: Si falla, alto grado de insatisfacción	Sí	6	Cuando la definición de la pasta no es satisfactoria: Velocidad y presión del squeegee, viscosidad de la pasta	7	Antes de colocación de componentes: a) Lupa. Usar gráfico np b) AOI. Usar gráfico np Después de soldadura: a) Estereoscopio. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10	420	Cambiar velocidad o presión Análisis de la viscosidad de la pasta	Operador Ingeniería
								7	294		
								9	504		
								2	112		
	Insuficiencia	Próximos procesos: Puede provocar componente movido y componente levantado en soldadura Producto: Puede fallar Cliente: Si falla, alto grado de insatisfacción	Sí	6	Cuando no cumple con altura: Presión y velocidad del squeegee limpieza del estencil	8	Antes de colocación de componentes: a) Lupa. Usar gráfico np b) AOI. Usar gráfico np c) Medidor de altura. Usar gráfico X-R Después de soldadura: a) Estereoscopio. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10	480	Cambiar presión, velocidad o grado de limpieza del estencil	Ingeniería
								7	336		
								9	432		
								2	112		
Pico	Próximos procesos: Puede provocar puente en soldadura Producto: Puede fallar Cliente: Si falla, alto grado de insatisfacción	Sí	5	Cuando no cumple con altura: Velocidad de descenso de la mesa	3	Antes de colocación de componentes: a) Lupa. Usar gráfico np c) Medidor de altura. Usar gráfico X-R	10	150	Cambiar la velocidad de ascenso del estencil	Ingeniería	
							9	135			
Desalineamiento	Próximos procesos: Componente movido en colocación de componentes. Puede provocar puente en soldadura Producto: Puede fallar Cliente: Si falla, alto grado de insatisfacción	Sí	7	Cuando no cumple con localización: X, Y, θ	2	Antes de colocación de componentes: a) Lupa. Usar gráfico np	10	140	Cambiar X, Y, θ, ancho de la banda transportadora	Ingeniería	

## ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA PARA COLOCACIÓN DE COMPONENTES

Función del proceso	Modo potencial de falla	Efectos potenciales de falla	Característica crítica	SEV	Causas potenciales de falla	OCC	Método de detección	DET	RPN	Acción recomendada	Individuo/ Área responsable
Buena colocación en términos de sus CTQs	Componente movido	Próximos procesos: Ninguno Producto: Puede provocar falla Cliente: Alto grado de insatisfacción		5	Error en programa de la máquina: a) Alimentador desalineado b) Malos datos en librería c) Secuencia de levantado Boquillas tapadas Defecto de desalineamiento en impresión de pasta	5	Antes de soldadura: a) Lupa. Usar gráfico np Después de soldadura: a) Estereoscopio y plantilla. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10 7 2 2	250 175 50 50	Revisar trabajo de operador Revisar programa Investigar posible falla mecánica	Ingeniería y supervisor Ingeniería Ingeniería y mantenimiento
	Faltante	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	SI	8	Error en programa de la máquina: a) Mala programación de alimentador Falla humana	3	Antes de soldadura: a) Lupa. Usar gráfico np Después de soldadura: a) Estereoscopio y plantilla. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10 7 2 2	240 168 48 48	Revisar trabajo de operador Revisar programa	Ingeniería y supervisor Ingeniería
	Polaridad invertida	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	SI	8	Error en programa de la máquina: a) Malos datos en librería b) Coordenadas equivocadas	4	Antes de soldadura: a) Lupa. Usar gráfico np Después de soldadura: a) Estereoscopio y plantilla. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10 7 2 2	320 224 64 64	Revisar trabajo de operador Revisar programa	Ingeniería y supervisor Ingeniería
	Componente equivocado	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	SI	8	Error en programa de la máquina: a) Confusión de componente	2	Antes de soldadura: a) Lupa. Usar gráfico np Después de soldadura: a) Estereoscopio y plantilla. Usar gráfico np b) ICT. Usar gráfico np c) FT. Usar gráfico np	10 7 2 2	320 224 64 64	Revisar trabajo de operador Revisar programa	Ingeniería y supervisor Ingeniería



## ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA PARA SOLDADURA

Función del proceso	Modo potencial de falla	Efectos potenciales de falla	Característica crítica	SEV	Causa potenciales de falla	OCC	Método de detección	DET	RPN	Acción recomendada	Individuo/ Área responsable
Buena soldadura en términos de sus CTQs	Puente	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	8	Velocidad y presión del squeegee, espesor y abertura del estencil	7	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	504 112 112	Cambiar velocidad o presión Cambiar el diseño del estencil	Ingeniería
	No humedificación	Próximos procesos: Ninguno Producto: Puede provocar falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	7	Pobre soldabilidad de terminales y pads Tiempo de precalentamiento muy largo	2	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	128 28 28	Revisar perfil de temperatura en horno Investigar soldabilidad	Ingeniería
	Porosidad	Próximos procesos: Ninguno Producto: Puede provocar falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	7	Flux excesivo Insuficiente evaporación del solvente del flux	2	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	128 28 28	Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería
	Componente levantado	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	8	Desalineamiento en impresión de pasta Proceso de reflujo incompatible con el PCB.	6	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	432 96 96	Investigar proceso de impresión de pasta Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería
	Unión fracturada	Próximos procesos: Ninguno Producto: Falla Cliente: Alto grado de insatisfacción	Sí	8	Puede ser provocada por insuficiencia en impresión de pasta Movimiento de la terminal del componente cuando ocurre la solidificación de la soldadura	2	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	144 32 32	Investigar proceso de impresión de pasta Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería
	Retracción de soldadura	Próximos procesos: Ninguno Producto: Puede provocar falla Cliente: Cierta grado de insatisfacción		4	Inadecuada soldabilidad de las terminales o los pads Período de precalentamiento muy alto o temperaturas muy altas Temperatura excesiva de reflujo	2	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	72 16 16	Revisar perfil de temperatura en horno Investigar soldabilidad	Ingeniería
	Bolas de soldadura	Próximos procesos: Ninguno Producto: Puede provocar falla Cliente: Cierta grado de insatisfacción		4	Aplicación de gran cantidad de pasta Temperaturas altas de precalentamiento o de contacto líquido Tiempos largos en horno	4	Estereoscopio. Usar gráfico np ICT. Usar gráfico np FT. Usar gráfico np	9 2 2	144 32 32	Investigar proceso de impresión de pasta Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería
	Unión opaca	Próximos procesos: Ninguno Producto: Poco probable que falle Cliente: Puede no notar la falla		2	Uso de aleaciones no eutécticas Perfil de reflujo muy largo en la fase líquida Enfriamiento lento	2	Estereoscopio. Usar gráfico np	9	36	Analizar composición de pasta Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería
	Unión granulosa	Próximos procesos: Ninguno Producto: Poco probable que falle Cliente: Puede no notar la falla		2	Enfriamiento muy lento Disturbios en la soldadura después del reflujo y en el inicio de enfriamiento	2	Estereoscopio. Usar gráfico np	9	36	Revisar perfil de temperatura en horno	Ingeniería



---

---

## **ANEXO G. PROGRAMA DE COMPUTADORA**





vi

-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_s

r\panel1.vi

modified on 02/09/00 at 16:27

l on 02/09/00 at 18:35

# IMPRESIÓN DE PASTA

## DATOS GENERALES

### PRODUCTOS EXISTENTES

PRODUCTO 1



PRODUCTO 2

## KPIV's

VELOCIDAD DEL SQUEEGEE (pulg/seg)	0,00
PRESIÓN DEL SQUEEGEE (lb)	0,00
ESPESOR DEL ESTENCIL (pulg)	0,00
OSCILACIÓN DE LA PASTA (cps)	
UMEDAD (%)	
TEMPERATURA (°C)	
VELOCIDAD DE DESCENSO DE LA MESA (pulg/seg)	0,00
FRECUENCIA DE LIMPIEZA DEL ESTENCIL	
TIEMPO DE SQUEEGEE	
FUERZA DE SUJECIÓN DEL PCB (lbs)	0,00
DISTANCIA DE BARRIDO DEL SQUEEGEE (pulg)	0,00
DISTANCIA DE DESCENSO DE LA MESA (pulg)	0,00
TIEMPO DE ESPERA PARA BAJAR LA MESA (seg)	0,00
DISTANCIA DEL SQUEEGEE AL ESTENCIL (pulg)	0,00
DISTANCIA DEL PCB AL ESTENCIL (pulg)	0,00

## CTQ's

ALTURA DE PASTA	<input type="checkbox"/>
ÁREA DE PASTA	<input type="checkbox"/>
VOLUMEN DE PASTA	<input type="checkbox"/>
% DESALINEAMIENTO	<input type="checkbox"/>
% DE SEPARACIÓN PADS	<input type="checkbox"/>
% DEL ÁREA DEL PAD CUBIERTO	<input type="checkbox"/>

## HERRAMIENTAS DE AYUDA

DIAGRAMA DE FLUJO	<input type="checkbox"/>
DEFECTOS	<input type="checkbox"/>
RELACIÓN ENTRE CTQ's Y DEFECTOS	<input type="checkbox"/>













3.vi

n-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_s

rw\panel3.vi

modified on 02/09/00 at 15:05

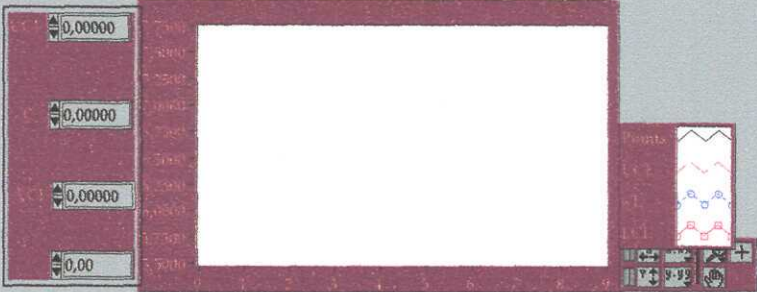
ed on 02/09/00 at 21:46

# IMPRESIÓN DE PASTA

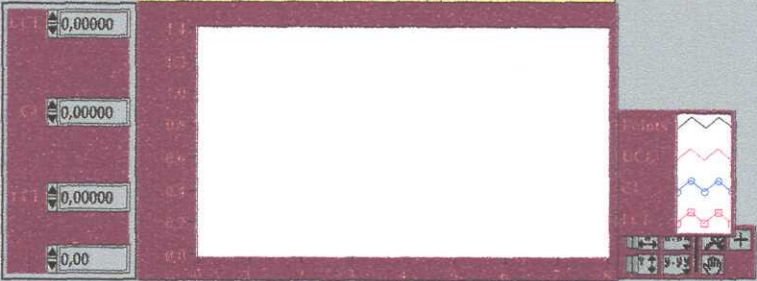
## DESPLIEGUE DE GRÁFICO DE CONTROL

NUMERO DE MUESTRA	VALOR DEL DATO
0	

### GRÁFICO DE CONTROL X



### GRÁFICO DE CONTROL MR



## ESTADO FUERA DE CONTROL HERRAMIENTAS DE AYUDA

DIAGRAMAS DE CAUSA-EFECTO

INTERPRETACION DE TENDENCIAS

## ESTADO BAJO CONTROL

CAPACIDAD DEL PROCESO

DEFINICIÓN DE GRÁFICO DE CONTROL

ESTUDIO R&R

DATOS DEL PROCESO













5.vi

n-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_s  
w\panel5.vi

modified on 02/09/00 at 15:36

d on 02/09/00 at 16:56

# IMPRESIÓN DE PASTA

## ESTUDIO R&R

### OPERADOR 1

INTENTO 1	INTENTO 2	RANGO
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000

#### Roperador

0,00000

#### Xoperador

0,00000

### OPERADOR 2

INTENTO 1	INTENTO 2	RANGO
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000

#### Roperador

0,00000

#### Xoperador

0,00000

#### X DIFERENCIA

0,00000

#### R PROMEDIO

0,00000

#### REPETIBILIDAD

0,00000

#### REPRODUCIBILIDAD

0,00000000

#### R&R

0,00000

#### % DE TOLERANCIA

0,00000

CAPACIDAD  
DEL  
PROCESO







6.vi

n-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_s

ew\panel6.vi

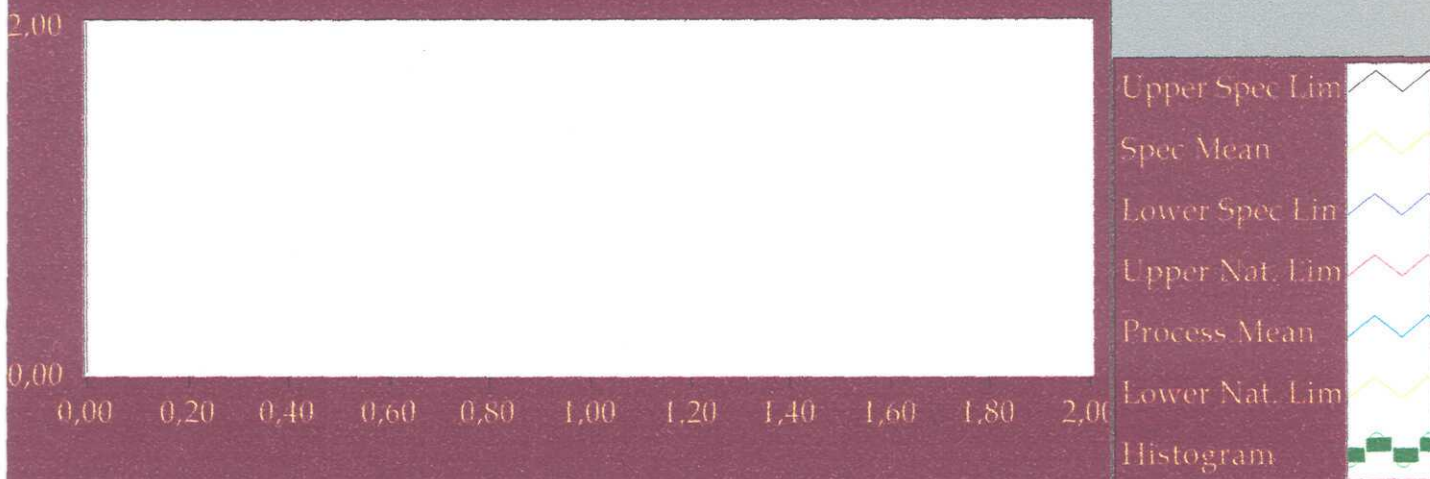
modified on 02/09/00 at 17:22

ed on 02/09/00 at 22:41

# IMPRESIÓN DE PASTA

## CAPACIDAD DEL PROCESO

### HISTOGRAMA



**MEDIA**

0,00000

**DESVIACION  
ESTANDAR**

0,00000

**CP**

0,00000

**CPK**

0,00000

**MEJORAR  
CAPACIDAD DEL  
PROCESO**







7.vi  
n-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_sj  
w\panel7.vi  
modified on 02/09/00 at 15:36  
ed on 02/09/00 at 22:52

# IMPRESIÓN DE PASTA

## HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

DIAGRAMAS DE PARETO



MATRIZ CAUSA- EFECTO



FMEA



DESPLIGUE DE  
GRÁFICO DE  
CONTROL





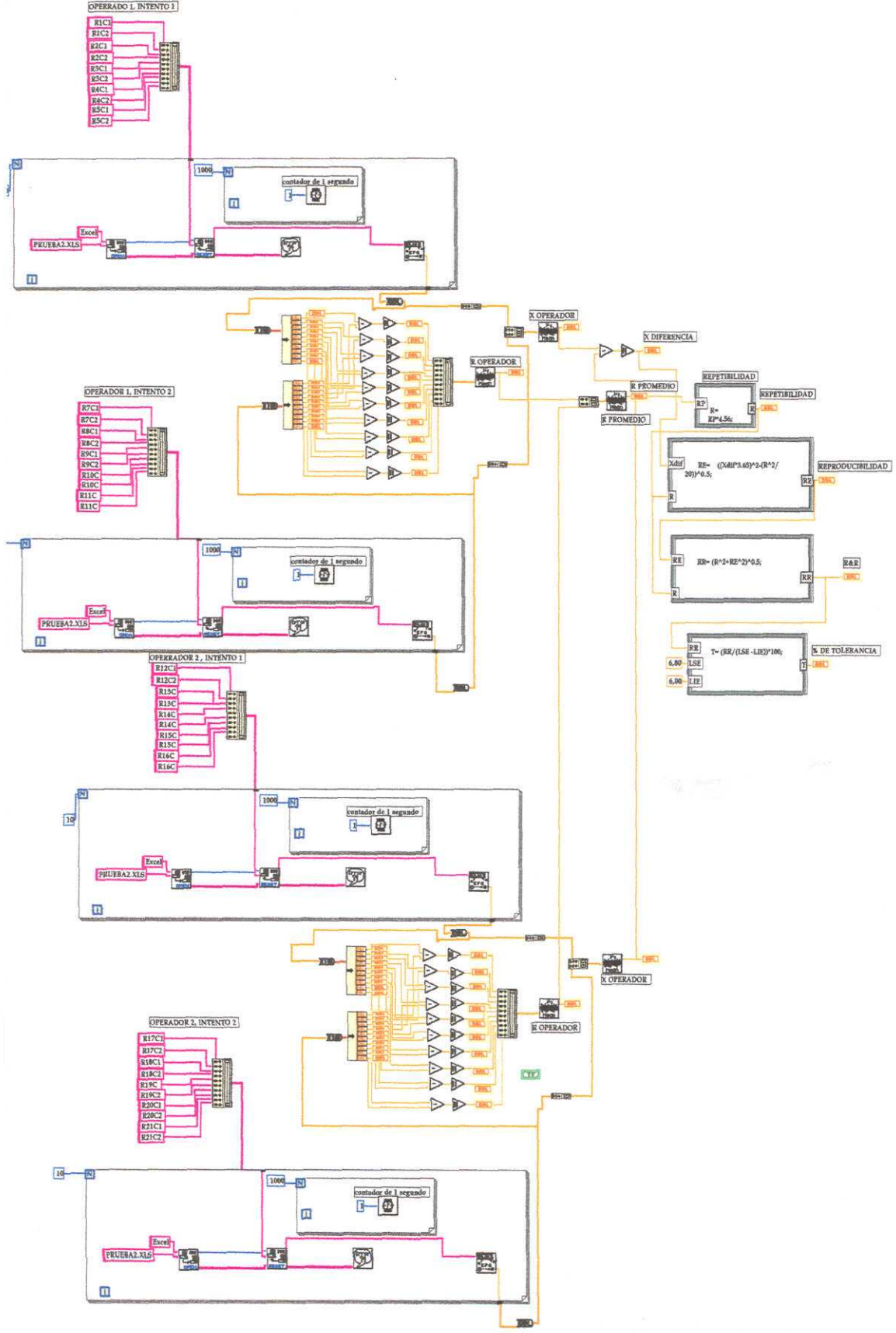
5.vi

m-server\shared files\Hidden Files\Users\Research Assistant Staff\Juan Carlos\programa\_s

ew\panel5.vi

modified on 02/09/00 at 20:36

ed on 02/09/00 at 23:25







## CONSULTAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. "Industria maquiladora de exportación". (Banco de Información económica). Agosto del 2000. <http://www.inegi.gob.mx/>. 17 de agosto del 2000.
- [2] Oresjo, Stig. 1998. "Test/Inspection". *SMT*. Octubre. EUA.
- [3] Denielsson, H. 1995. *Surface Mount Technology with Fine Pitch Components*, Primera edición. Chapman & Hall. Londres, Gran Bretaña.
- [4] Manríquez, J. 1998. Asesorías de tesis. Director del Laboratorio de Manufactura Electrónica. CSIM, ITESM, Campus Monterrey. Monterrey, N.L., México.
- [5] Ruiz, V. F. 1987. *Componentes Electrónicos*. Primera edición. CEAC. Barcelona, España.
- [6] Capillo, C. 1990. *Surface Mount Technology. Materials, Processes, and Equipment*. McGraw-Hill. Nueva York, EUA.
- [7] Amkor Electronics Inc. "Products". (Catálogo de productos). 1999. [http://www.amkor.com/assembly\\_and\\_test/products](http://www.amkor.com/assembly_and_test/products) 15 de marzo del 2000.
- [8] Coombs, C. F. 1990. *Printed Circuits Handbook*. McGraw-Hill. Nueva York, EUA.
- [9] Manko, H. 1979. *Solders and Soldering. Materials, Design, Production, and Analysis for Reliable Bonding*. Segunda edición. McGraw-Hill. Nueva York, EUA.
- [10] Electronic Industries Association; Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits. 1996. *J-STD-001B. Requiriments for Soldered Electrical and Electronic Assemblies*. Global Engineering Documents. EUA.
- [11] Harry, M. J. 1994. *The Vision of Six Sigma: Tools and Methods for Breakthrough*. Sigma Publishing Company. Phoenix, AZ, EUA.
- [12] Clifford, T. 1998. "Defects in ppm, Part II". *Circuits Assembly*. Abril. EUA.
- [13] SMT Magazine on Line. "SMT Step by Step". (Guía). 1999. <http://www.smtmag.com/> Julio del 2000.
- [14] Brisky, M. 1992. *Mastering SMT Manufacturing*. SMT Plus Inc. EUA.
- [15] Clark, D. 1998. "Sampling vs 100% Inspection". *Circuits Assembly*. Marzo. EUA.
- [16] Kamen, E.; Goldstein, A. y Sahinci, E. 1999. "Monitoring Surface-Mount Component Placement". *Circuits Assembly*. Enero. EUA.
- [17] Moore, M. 1998. "Improving Pin Fault Coverage at In-Circuit Test". *Circuits Assembly*. Junio. EUA.
- [18] Ries, B. 1998. "3-D Post-Printing Inspection". *Circuits assembly*. Junio. EUA.
- [19] Miller, D. 1998. "X-Ray Inspection Systems". *Circuits Assembly*. Junio. EUA.
- [20] Norma Mexicana IMNC. 1995. *Sistemas de Calidad-Modelo para el aseguramiento de la Calidad en Diseño, Desarrollo, Producción, Instalación y Servicio*. México, D.F.
- [21] Smith, G. F. *Quality Problem Solving*. 1998. ASQ Quality Press. Milwaukee, WI. EUA.
- [22] Hann, G. J.; Hill, W. H.; Hoerl, R. W et al. 1999. "The Impact of Six Sigma Improvement. A Glimpse Into the Future of Statistics". *The American Statistician*. Agosto, Vol. 53, No. 3. EUA.

- [23] Breyfogle, F. W. 1999. *Implementing Six Sigma. Smarter Solutions Using Statistical Methods*. John Wiley & Sons. EUA.
- [24] Wadsworth, H. M; Stephens, K. S y Godfrey A. B. 1986. *Modern Methods for Quality Control and Improvement*. John Wiley & Sons. EUA.
- [25] Winchell, W. 1991. *Continuous Quality Improvement. A manufacturing Professional's Guide*. Segunda edición. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, EUA.
- [26] Montgomery, D. C. 1997. *Introduction to Statistical Quality Control*. Tercera edición. John Wiley & Sons. EUA.
- [27] Burr, I. J. 1967. "The Effect of Nonnormality on Constants for  $\bar{x}$  and R Charts". *Industrial Quality Control*. Vol. 23. EUA.
- [28] Hawkins, D. M 1992. "A Fast Accurate Approximation of Average Run Lengths of CUSUM Control Charts". *Journal of Quality Technology*. Vol. 24. EUA.
- [29] Duncan, A. J. 1986. *Quality Control and Industrial Statistics*. Quinta edición. Irwin, Homewood, Ill.
- [30] Stamatis, D. H. 1995. *Failure Mode and Effect Analysis. FMEA from Theory to Execution*. ASQC Quality Press. Milwaukee, Wisconsin, EUA.
- [31] DeVor, R. E.; Chang, T. y Sutherland, J. W. 1992. *Statistical Quality Design and Control. Contemporary Concepts and Methods*. Prentice Hall. EUA.
- [32] Box, G. E.; Hunter, W. G. y Hunter, J. S. 1993. *Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*. Editorial Reverté. Barcelona, España.



Centro de Información-Biblioteca



30002005878749