

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

Maestría en Ingeniería



“Optimización del proceso de impresión de pasta de soldadura en el
área de montaje superficial en SKYWORKS Mexicali”

T E S I S

que para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA presenta:

Ing. César Emanuel Montaña Godínez.

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. Mario Rafael Contreras Orendain

Mexicali, B.C., a 16 de Noviembre de 2007

Resumen aprobado por:

M.C. Mario Contreras Orendain

Director de tesis

RESUMEN

El presente trabajo de tesis aborda el problema de optimizar el desempeño de calidad de uno de los procesos clave dentro de la tecnología de montaje superficial – la impresión de pasta de soldadura. El que este proceso sea considerado así de importante, radica en el hecho de que típicamente la industria del montaje superficial reporta que entre un 52 y 71% de los defectos encontrados en ensambles y hechos mediante esta tecnología tienen su origen ahí, en la impresión de pasta de soldadura. Este era el mismo caso de la compañía SKYWORKS, lugar donde se llevaron a cabo los trabajos de investigación y experimentación relacionados con el desarrollo de esta tesis.

La hipótesis aquí planteada, afirma que un estudio detallado del proceso de impresión de pasta de soldadura, permitiría determinar con mayor certidumbre los factores que afectan de manera significativa el desempeño de dicho proceso; además, establece que dicho conocimiento podría ser empleado para experimentar de forma más efectiva, lo anterior con miras a lograr la optimización de este proceso. Para verificar la validez de esta hipótesis, se planteó el uso de una metodología concisa y sencilla, que pudiera ser empleada de forma genérica y práctica y que ayudaría a maximizar la cantidad de información útil que puede obtenerse después del análisis de los datos obtenidos en cada experimento.

Finalmente, el diseño de experimentos fue la herramienta de mejora de procesos que se decidió utilizar para resolver el problema objeto de este estudio, sin embargo, los alcances de esta tesis van más allá de exponer el caso de la simple utilización de esta poderosa herramienta para lograr la optimización del proceso; como ya se mencionaba anteriormente, en sus páginas se detalla el uso de una metodología simple y práctica, que de ser usada de manera correcta, ayudaría a aquellos que se encuentren en la tarea de lograr la optimización de un proceso igual o similar, en cualesquier otra compañía que realice ensambles con tecnología de montaje superficial.

Approved by:

M.C. Mario Contreras Oredaín

Thesis Advisor

ABSTRACT

The present thesis work approaches the problem of optimizing the quality performance of one of the key processes within the surface mount technology – the solder paste printing operation. The reason why this process is considered that important relates to the fact that the surface mount industry typically reports that between a 52 and 71% of their defects are one way or another related to the solder paste printing process. This was the case of SKYWORKS Company, place where all the investigation and experimental work needed to carry out this thesis work was done.

The hypothesis stated here, affirms that a detailed study of the solder paste printing process would allow determining with greater certainty the factors that notably affects the performance of this process; furthermore, it establishes that this knowledge could be used to conduct a more effective experimentation so that process optimization is really feasible. In order to verify the legitimacy of this hypothesis, the use of a very concise and simple methodology was posted. It is also exposed that such methodology could be used in a very generic and practical way so that it would help out to maximize the amount of useful information that results after analyzing the data collected within each set of experiments.

Finally, design of experiments is the process improvement tool that was chosen to solve the problem object of this study, however, the reaches of this thesis work go far beyond the simple use of this powerful tool to achieve the process optimization; just as it was mentioned before, the use of a simple and practical methodology is exposed in its pages, that if used as suggested, it would help those who are involved in the same or similar process optimization task, achieve satisfactory results.

Índice

| | |
|--|-----|
| Índice de figuras | i |
| Índice de tablas | ii |
| Dedicatoria | iii |
| | |
| Introducción | 1 |
| Antecedentes | 2 |
| Hipótesis | 3 |
| Objetivo | 3 |
| | |
| Capítulo I – Diseño de experimentos | |
| | |
| 1.1 Diseño de experimentos | 4 |
| 1.1.1 Perspectiva histórica | 6 |
| 1.2 Aplicaciones del diseño experimental | 6 |
| 1.3 Principios básicos del diseño de experimentos | 7 |
| 1.3.1 Directrices para el diseño de experimentos | 9 |
| 1.4 Diseños factoriales | 11 |
| 1.4.1 Ventajas de los diseños factoriales | 13 |
| 1.5 Diseño factorial 2^k | 13 |
| 1.6 Diseño de parcelas divididas | 14 |
| 1.7 Análisis del sistema de medición (MSA) | 14 |
| | |
| Capítulo II – Tecnología de montaje superficial | |
| | |
| 2.1 Tecnología de montaje superficial | 17 |
| 2.1.1 Procesos de ensamble de montaje superficial | 17 |
| 2.1.2 Historia de la tecnología de montaje superficial | 18 |
| 2.2 Beneficios de la tecnología de montaje superficial | 19 |
| 2.3 Componentes de montaje superficial | 20 |
| 2.4 Aplicación de la pasta de soldadura | 21 |
| 2.4.1 Composición de la pasta de soldadura | 22 |
| 2.4.1.1 Partículas de soldadura | 23 |
| 2.4.1.2 Resinas | 24 |
| 2.4.1.3 Activadores | 24 |

| | |
|--|----|
| 2.4.1.4 Solventes | 25 |
| 2.4.1.5 Agentes tixotrópicos | 25 |
| 2.4.2 Pastas No Lavables | 26 |
| 2.5 Impresión de pasta con plantilla | 26 |
| 2.5.1 Manufactura de la plantilla | 28 |
| 2.5.1.1 Materiales para construcción de las plantillas | 28 |
| 2.5.1.2 Plantillas de formado químico | 29 |
| 2.5.1.3 Plantillas de corte láser | 30 |
| 2.5.1.3.1 Electropulido | 30 |
| 2.5.1.4 Plantillas electroformadas | 31 |
| 2.5.2 Consideraciones en el diseño de la plantilla | 32 |

Capítulo III – Calidad del proceso de impresión

| | |
|---|----|
| 3.1 Factores que afectan la calidad del proceso de impresión | 34 |
| 3.2 Problemas de SMT con origen en el proceso de impresión de pasta | 35 |
| 3.2.1 Separación del fundente | 35 |
| 3.2.2 Endurecimiento de la pasta de soldadura | 36 |
| 3.2.3 Tiempo de vida de la pasta sobre la plantilla | 37 |
| 3.2.4 Altura de pasta inadecuada | 39 |
| 3.2.5 Corrimiento de pasta de soldadura | 40 |
| 3.2.6 Insuficiencia de pasta de soldadura | 40 |
| 3.2.7 Colapso de la pasta de soldadura | 40 |
| 3.3 Parámetros de impresión de pasta de soldadura | 41 |
| 3.3.1 Tope bajo de espátula | 41 |
| 3.3.2 Presión de la espátula | 42 |
| 3.3.3 Velocidad de impresión | 42 |
| 3.3.4 Separación | 42 |
| 3.3.5 Velocidad de separación | 42 |
| 3.4 Área de Impresión | 43 |
| 3.5 Limpieza de la plantilla | 43 |

Capítulo IV - Experimentación

| | |
|--|----|
| 4.1 Metodología propuesta | 44 |
| 4.1.1 Selección del vehículo de pruebas | 45 |
| 4.1.2 Validación del sistema de medición a emplearse | 47 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 4.1.2.1 | Equipo de medición | 47 |
| 4.1.2.2 | Análisis del sistema de medición | 47 |
| 4.1.2.2.1 | Verificación de la calibración de la SE-300 | 47 |
| 4.1.2.2.2 | MSA para la CyberOptics SE-300 | 48 |
| 4.1.3 | Estudio de estabilidad del equipo de impresión | 51 |
| 4.1.4 | Estudio de escrutinio y optimización de variables | 53 |
| 4.1.5 | Recomendaciones de operación | 59 |
| 4.2 | Conclusiones | 59 |
| 4.2.1 | Corridas de confirmación | 59 |
| 4.3 | Despliegue de los resultados | 61 |
| 4.4 | Correlación con defectos de SMT | 61 |
| 4.5 | Conclusiones finales | 62 |
| | Bibliografía | 64 |

Índice de Figuras

| | | Página |
|-------------|--|--------|
| Figura 1.1 | Modelo general de un proceso o sistema | 5 |
| Figura 2.1 | Apariencia típica de una línea de ensamble para tecnología de montaje superficial | 18 |
| Figura 2.2 | Secuencia de producción para ensamblajes puros de montaje superficial | 21 |
| Figura 2.3 | Composición en porcentajes de peso de la pasta de soldadura | 22 |
| Figura 2.4 | Modelo de la impresión de pasta de soldadura usando espátula | 27 |
| Figura 2.5 | Imagen ampliada de una abertura de plantilla por formado químico | 30 |
| Figura 2.6 | Imagen ampliada de una abertura de plantilla por corte láser | 31 |
| Figura 2.7 | Comparación entre el acabado de las paredes de una abertura tratada con electropulido y sin electropulido. | 31 |
| Figura 2.8 | Imagen ampliada de una abertura por electroformado | 32 |
| Figura 3.1 | Factores que afectan el proceso de impresión de pasta de soldadura | 35 |
| Figura 3.2 | Sistema de impresión con cámara cerrada | 39 |
| Figura 4.1 | Módulo individual correspondiente a un sustrato de CX77105-11 | 46 |
| Figura 4.2 | Sustrato CX77105-11 | 46 |
| Figura 4.3 | Gráfica para verificación de calibración de Cyberoptics SE-300 | 48 |
| Figura 4.4 | Análisis gráfico del sistema de medición | 49 |
| Figura 4.5 | Gráfico $\bar{X} - R$ construido para el estudio de estabilidad del equipo de impresión | 52 |
| Figura 4.6 | Gráfica de efectos promedio para el volumen de pasta de soldadura | 58 |
| Figura 4.7 | Gráfica de efectos promedio para la desviación estándar del volumen de pasta | 58 |
| Figura 4.8 | Gráfica \bar{X} antes y después de la optimización con DOE | 60 |
| Figura 4.9 | Gráfica S antes y después de la optimización con DOE | 60 |
| Figura 4.10 | Gráfica de tendencia de los defectos relacionados al proceso de impresión de pasta de soldadura | 62 |

Índice de Tablas

| | | Página |
|-----------|--|--------|
| Tabla 1.1 | Ejemplo de un experimento factorial | 12 |
| Tabla 1.2 | Ejemplo de un experimento factorial con interacción | 12 |
| Tabla 2.1 | Porcentajes y tamaños de partículas de soldadura | 23 |
| Tabla 2.2 | Comparación de la tecnología usada en la manufactura de las plantillas y el costo | 29 |
| Tabla 4.1 | Clasificación de variables experimentales | 54 |
| Tabla 4.2 | Factores y niveles a incluirse en el diseño final del experimento | 54 |
| Tabla 4.3 | Matriz de experimentación para el diseño de parcelas divididas | 56 |
| Tabla 4.4 | Análisis del diseño, factores significativos y medidas de ajuste del modelo | 57 |
| Tabla 4.5 | Resumen de las recomendaciones de operación para el proceso de impresión de pasta. | 59 |
| Tabla 4.6 | Índices de capacidad del proceso antes y después de DOE | 61 |

Dedicatoria

A Dios, por ser la luz de la esperanza en cada instante de mi vida...

A mis padres, por su ejemplo de fortaleza, de humildad y de entrega...

A mis hermanos, por su ejemplo de disciplina, de pasión y de coraje...

A Mónica, por tu amor, por tu candidez, por tu comprensión, por tu ternura...

A mis maestros Margarito, Mario y Víctor, por su paciencia e invaluable guía...

Introducción

En la actualidad, virtualmente todas las empresas de todos los tamaños y giros se desenvuelven y buscan su permanencia dentro de los hoy llamados mercados globales. Estos mercados globales ejercen una suerte de ley de selección natural sobre estas empresas, donde únicamente aquellas que logran tornarse y permanecer competitivas sobreviven. Es en la constante y rápida adecuación a las necesidades de estos mercados, donde las empresas han encontrado respuesta a las preguntas de ¿Cómo lograr la permanencia? y ¿Cómo continuar siendo competitivas? Bajo esta perspectiva, resulta claro el motivo por el cual hoy día las empresas se embarcan en una búsqueda constante de oportunidades para mejorar, para ser más eficientes y eficaces, para ser más productivas. Lo mismo buscan estas oportunidades a lo largo de la cadena de suministros, que en cada etapa de sus diferentes procesos productivos. Las oportunidades para mejorar están por doquier y deben ser explotadas y alcanzadas; las empresas que logran la permanencia dentro de estos mercados globales trabajan constante y pro-activamente en identificarlas y resolverlas a favor de estas.

Una mejora alcanzada dentro de un proceso productivo de una compañía es avanzar en dirección de la competitividad. Típicamente, los resultados de una mejora consolidada en un proceso, se traducen en niveles más elevados de calidad y de productividad, mayor eficiencia y una mayor satisfacción de los clientes tanto internos, como de los consumidores finales.

El presente trabajo de tesis intenta explorar y resolver una oportunidad de mejora que se ha logrado identificar en uno de los procesos productivos de una importante empresa dedicada a la manufactura de semiconductores de esta localidad. La probable consolidación de dicha mejora pudiera redituarse en una mejora significativa de los niveles de calidad de este proceso y una reducción notable en lo referente a costos de operación; situaciones que colocarían a este proceso en una posición privilegiada tanto dentro como fuera de la compañía, que en algún momento pudieran ser consideradas ventajas competitivas al momento de ser comparada con otras compañías encausadas al giro de esta empresa.

Por otro lado, la metodología y experimentación aquí detallada podría ser usada como marco referencial para posteriores esfuerzos de optimización de este mismo proceso o inclusive, servir de guía para emprender esta tarea de mejora en cualesquier compañía electrónica –que realice ensambles de montaje superficial- que identifique en su proceso de impresión de pasta de soldadura una oportunidad importante de mejora.

Antecedentes

Skyworks es una empresa enfocada a las operaciones de ensamble y prueba de semiconductores en altos volúmenes. Ha estado localizada en Mexicali por más de 34 años. Actualmente, cuenta con una planta laboral de cerca de 1,600 empleados.

El presente trabajo de tesis se desarrolló en una de las operaciones de ensamble de esta compañía – la operación de Montaje Superficial. Esta consiste en soldar componentes pasivos (resistencias, inductores, etc.) sobre tablillas de circuito impreso para ser usados como sub-ensambles en operaciones subsecuentes dentro de la misma compañía.

Hipótesis

Un análisis detallado del proceso de impresión de pasta de soldadura permitirá un conocimiento más amplio acerca de los factores que afectan significativamente el desempeño de este proceso. La identificación de dichos factores, consentirá llevar a cabo una experimentación efectiva con miras a la optimización de esta operación.

Objetivo

Se pretende que la optimización del proceso de impresión de pasta de soldadura permita elevar la calidad del producto terminado en el área de Montaje Superficial. Actualmente, el desempeño de calidad de esta operación se encuentra cercano a los 4,500 partes por millón (PPMs, por sus siglas en Inglés). Se piensa que una reducción de 1,500 PPMs es factible, considerando que son aproximadamente estos la cantidad de defectos asociados con este proceso en particular.

Capítulo I

Diseño de Experimentos

En este capítulo se expondrán detalles importantes acerca del uso del diseño de experimentos como herramienta para llevar a cabo mejoras radicales de forma eficiente y efectiva en cualquier tipo de proceso de manufactura.

1.1 Diseño de experimentos

Los experimentadores realizan experimentos virtualmente en todos los campos del saber, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular. Literalmente, un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio puede representarse por medio del modelo de la figura 1.1. Suele ser posible visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables del proceso x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras z_1, z_2, \dots, z_p son incontrolables (aunque pueden ser controlables para los fines de una prueba). Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

- Determinar cuales variables tienen mayor influencia en la respuesta, y .
- Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que y tenga casi siempre un valor cercano al nominal deseado.
- Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que la variabilidad de y sea pequeña.
- Determinar el mejor valor de las x que influyen en y , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables z_1, z_2, \dots, z_p .

Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el desarrollo de procesos y en la optimización de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto; esto es, un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas (las z 's). (Montgomery, 1991)

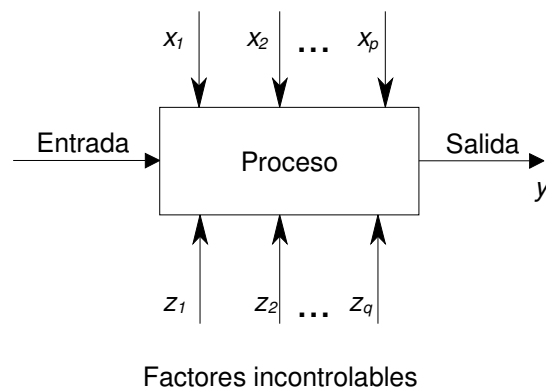


Figura 1.1. Modelo general de un proceso o sistema.

1.1.1 Perspectiva histórica

El finado sir Ronald A. Fisher fue el innovador en el uso de los métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Durante algunos años estuvo a cargo de la estadística y del análisis de datos en la Estación Agrícola Experimental Rothamsted en Londres, Inglaterra. Fisher fue quien desarrollo y uso por primera vez el análisis de variancia como herramienta primaria para el análisis estadístico en el diseño experimental. En 1933 Fisher trabajó como profesor en la Universidad de Londres. Después formó parte del cuerpo docente de la Universidad de Cambridge, y fue profesor visitante en varias universidades de todo el mundo. A pesar de que Fisher fue el pionero, muchos otros han contribuido de manera significativa a las publicaciones sobre el diseño de experimentos. Entre ellos pueden encontrarse F. Yates, G.E.P. Box, R. C. Bose, O. Kempthorne y W. G. Cochran.

Muchas de las primeras aplicaciones de los métodos del diseño experimental se dieron en el área de agricultura y ciencias biológicas. Como resultado de ello, gran parte de la terminología proviene de estos antecedentes agrícolas. Sin embargo, las primeras aplicaciones industriales del diseño experimental se hicieron en la década de 1930, en las industrias textil y de la lana británicas. Después de la Segunda Guerra Mundial, los métodos del diseño experimental se introdujeron en las industrias químicas y de transformación de Estados Unidos y Europa. Estos grupos industriales son todavía áreas muy fértiles para el uso del diseño experimental en el desarrollo de productos y procesos. La industria de los semiconductores y la electrónica se han servido también por muchos años y con considerable éxito de los métodos del diseño experimental. (Montgomery, 1991)

1.2 Aplicaciones del diseño experimental

Los métodos de diseño experimental tienen una amplia aplicación en muchas disciplinas. En efecto, es posible considerar a la experimentación parte del proceso científico y una de las formas en las que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas acerca de un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento

para establecer nuevas conjeturas, que llevan a realizar nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El diseño experimental es una herramienta de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se emplea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo puede dar por resultado:

1. Mejora en el rendimiento del proceso.
2. Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivo.
3. Menor tiempo de desarrollo.
4. Menores costos globales

Los métodos de diseño experimental también tienen un cometido importante en las actividades de diseño técnico (o diseño de ingeniería), en las cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones del diseño experimental en el diseño técnico son:

- Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas.
- Evaluación de materiales alternativos.
- Selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo (de uso real); esto es, de modo que el producto sea consistente (robusto).

El uso del diseño experimental en estas áreas puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costos, y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto. (Montgomery, 1991)

1.3 Principios básicos del diseño de experimentos

Para que un experimento se realice de la forma más eficiente, es necesario emplear métodos científicos en su planeación. El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones validas y objetivas.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son el de obtención de réplicas, aleatorización y análisis por bloques. La réplica se refiere a una repetición del experimento básico. Este concepto tiene dos propiedades importantes. En primer lugar permite al experimentador una estimación del error experimental. Tal estimación se convierte en la unidad básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas. En segundo lugar, el uso de réplicas permite al experimentador calcular una estimación más precisa del efecto de un factor en el experimento si se usa la media de la muestra (por ejemplo, \bar{y}) como una estimación de dicho efecto; esto es si σ^2 es la variancia de los datos y hay n réplicas, entonces la variancia de la media de la muestra es

$$\sigma^2_{\bar{y}} = \frac{\sigma^2}{n}$$

La aleatorización es la piedra angular que fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Se entiende por aleatorización el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en el que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determina aleatoriamente. Los métodos estadísticos requieren que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias independientes. La aleatorización usualmente confirma esta suposición. Además, al aleatorizar adecuadamente el experimento se ayuda a “cancelar” los efectos de los factores extraños que pudieran estar presentes.

El análisis por bloques es una técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que sea más homogénea que el total del material. Al realizarse un análisis por bloques se hacen las comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque. (Montgomery, 1991)

1.3.1 Directrices para el diseño de experimentos

Para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento se requiere que todos los participantes tengan de antemano una idea clara de que es exactamente lo que se va a estudiar, cómo se van a recopilar los datos y, al menos, una idea cualitativa de cómo se van a analizar. (Montgomery, 1991)

1. **Comprensión y planteamiento del problema.** Es necesario desarrollar todas las ideas sobre los objetivos del experimento. Un planteamiento claro del problema contribuye a menudo en forma sustancial a un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.
2. **Elección de factores y niveles.** El experimentador debe elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento. También debe considerarse la forma en que se controlarán estos factores para mantenerlos en los valores deseados, y cómo se les medirá. Para ello es necesario conocer el proceso. Tal conocimiento suele ser una combinación de experiencia práctica y comprensión teórica.
3. **Selección de las variables de respuesta.** Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir realmente provea información útil acerca del proceso de estudio. La capacidad de medición (el error de medición) también
4. **Elección del diseño experimental.** Para elegir el diseño es necesario considerar el tamaño muestral (número de repeticiones), seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, y determinar si hay implicado bloqueo u otras restricciones de aleatorización. Es importante tener presente los objetivos experimentales al seleccionar el diseño. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos factores producen respuestas diferentes. Consecuentemente, hay interés en identificar que factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta.

5. **Realización del experimento.** Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado. En esta fase los errores suelen anular la validez experimental. La planeación integral es decisiva para el proceso.
6. **Análisis de datos.** Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que apreciativos. Si el experimento se diseñó correctamente y si se ha realizado conforme al diseño, los métodos estadísticos que se requieren no son complicados. Hay que recordar que los métodos estadísticos no pueden probar que un factor (o varios factores) tiene un efecto particular; sólo proporcionan directrices para la veracidad y validez de los resultados. La principal ventaja de los métodos estadísticos es que agregan objetividad al proceso de toma de decisiones.
7. **Conclusiones y recomendaciones.** Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción. En esta fase a menudo son útiles los métodos gráficos, en especial al presentar los resultados a otras personas. También deben realizarse corridas de seguimiento y pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

Durante todo este proceso es necesario tener presente que la experimentación es parte importante del proceso de aprendizaje, en la cual formulamos tentativamente hipótesis acerca de un sistema, realizamos experimentos para investigar dichas hipótesis, y con base en los resultados formulamos nuevas hipótesis, etc. Esto sugiere que la experimentación es iterativa.

Para que un experimento sea exitoso es necesario conocer los factores importantes, los intervalos en los cuales deben hacerse variar estos factores, la cantidad adecuada de niveles por usar, y las unidades de medida apropiadas para estas variables. Por lo general no se conocen a la perfección las respuestas a estas preguntas, sino que se aprende acerca de cada una de ellas a medida que se avanza. Conforme progresa un programa experimental, con frecuencia se eliminan algunas variables de entrada, se agregan otras, se modifica la región de exploración de algunos factores, o se añaden

nuevas variables de respuesta. En consecuencia, se suele experimentar secuencialmente, y como regla general, en el primer experimento no debe invertirse más de alrededor del 25% de los recursos disponibles. Esto asegurará que se disponga de recursos suficientes para realizar corridas de confirmación y en última instancia alcanzar el objetivo final del experimento. (Montgomery, 1991)

1.4 Diseños factoriales

Muchos experimentos se llevan a cabo para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Puede mostrarse que en general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investiguen todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. Por ejemplo, si existen **a** niveles del factor A y **b** niveles del factor B, entonces cada réplica del experimento contiene todas las **ab** combinaciones de los tratamientos. A menudo, se dice que los factores están cruzados cuando estos se arreglan en un diseño factorial. (Montgomery, 1991)

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, este se conoce como efecto principal porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento. Por ejemplo, consideremos los datos de la tabla 1.1. El efecto principal del factor A podría interpretarse como la diferencia entre la respuesta promedio en el primero y segundo nivel de ese factor. Numéricamente

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21$$

En otras palabras, incrementar el factor A del nivel 1 al 2 produce un cambio en la respuesta promedio de 21 unidades. Similarmente, el efecto principal de B es

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11$$

Tabla 1.1. Ejemplo de un experimento factorial.

| | | <i>FactorB</i> | |
|----------------|-------|----------------|-------|
| | | B_1 | B_2 |
| <i>FactorA</i> | A_1 | 20 | 30 |
| | A_2 | 40 | 52 |

Si los factores tienen más de dos niveles, el procedimiento anterior debe ser modificado ya que las diferencias entre las respuestas promedio pueden expresarse de muchas formas.

En algunos experimentos pueden encontrarse que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles de los otros factores. Cuando esto ocurre existe una interacción entre los factores. Por ejemplo, considérense los datos de la tabla 1.2. En el primer nivel del factor B, el efecto de A es

$$A = 50 - 20 = 30$$

Mientras que en el segundo nivel de B, el efecto de A es

$$A = 12 - 40 = -28$$

Puede observarse que existe una interacción entre los factores A y B porque el efecto de A depende del nivel elegido de B.

Tabla 1.2. Ejemplo de un experimento factorial con interacción.

| | | <i>FactorB</i> | |
|----------------|-------|----------------|-------|
| | | B_1 | B_2 |
| <i>FactorA</i> | A_1 | 20 | 40 |
| | A_2 | 50 | 12 |

1.4.1 Ventajas de los diseños factoriales

Los diseños factoriales poseen algunas ventajas. Son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez. Más aún, los diseños factoriales son necesarios cuando alguna interacción puede estar presente, con el propósito de evitar hacer conclusiones que son engañosas. Finalmente, los diseños factoriales permiten estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son validas sobre toda la extensión de las condiciones experimentales. (Montgomery, 1991)

1.5 Diseño factorial 2^k

Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta. Existen métodos generales para el análisis de diseños factoriales. Sin embargo, existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor practico.

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería en el caso de dos valores de temperatura, presión o tiempo. También pueden ser cualitativos como sería el caso de dos máquinas, dos operadores, los niveles “superior” e “inferior” de un factor o, quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como diseño factorial 2^k .

El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Conlleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Debido a que solo hay dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores. (Montgomery, 1991)

1.6 Diseño de parcelas divididas

En algunos diseños multifactoriales, en los que intervienen bloques aleatorizados, puede que sea imposible aleatorizar totalmente el orden de los ensayos dentro de cada bloque. A menudo, esto conduce a una generalización del diseño por bloques aleatorizados denominada diseño en parcelas divididas.

El diseño de parcelas divididas tiene una herencia agrícola, ya que las parcelas completas usualmente son grandes áreas de terreno y las subparcelas pequeñas extensiones. Por ejemplo, algunas variedades de cultivo pueden plantarse en diferentes campos (parcelas completas), una variedad por campo. Luego cada campo puede dividirse, por ejemplo, en cuatro subparcelas, y tratarse cada una con un fertilizante diferente. En este caso las variedades de cosecha son los tratamientos principales y los fertilizantes son los subtratamientos.

A pesar de sus antecedentes agrícolas, el diseño en parcelas divididas es útil en muchos experimentos científicos e industriales. Usualmente, en estos experimentos algunos factores requieren grandes unidades experimentales, mientras que otros necesitan unidades experimentales más pequeñas. Por otra parte, en ocasiones es imposible la aleatorización total porque resulta más difícil cambiar los niveles de algunos factores que de otros. Los factores que difícilmente pueden variar son las parcelas completas, mientras que las subparcelas si varían con más facilidad. (Montgomery, 1991)

1.7 Análisis del sistema de medición (MSA)

Los datos medidos son usados de varias maneras diferentes y más comúnmente que en el pasado. Por ejemplo, la decisión de ajustar un proceso de manufactura o no, esta ahora típicamente basada en datos medidos. Estos datos medidos o algunos estadísticos calculados a partir de ellos, son comparados con los límites de control estadístico para los procesos, y si la comparación indica que el proceso esta fuera de control estadístico, entonces se efectúa algún tipo de ajuste. De lo contrario, se le permite al proceso continuar sin necesidad de ajuste. Otro uso de los datos medidos es para determinar si existe alguna relación significativa entre dos o más variables. Por ejemplo, puede sospecharse que una dimensión crítica en una parte plástica moldeada esta relacionada

con la temperatura a la que se alimenta el material. Es posible que esta probable relación pudiera ser estudiada usando un procedimiento estadístico llamado análisis de regresión para comparar mediciones de la dimensión crítica con medidas de la temperatura a la que se alimenta el material.

Los estudios que exploran este tipo de relaciones son ejemplos de lo que el Dr. W. E. Deming llamaba *estudios analíticos*. En general, un estudio analítico es aquel que ayuda a incrementar el conocimiento acerca del sistema de causas que afectan el proceso. Los estudios analíticos están entre los usos más importantes de los datos medidos ya que estos dirigen de manera última a la mejor comprensión de los procesos.

El beneficio de usar un procedimiento basado en datos se determina principalmente por la calidad de los datos medidos usados. Si la calidad de los datos es baja, el beneficio del procedimiento es probable que sea bajo. De manera similar, si la calidad de los datos es alta, es probable que el beneficio también lo sea.

Para asegurar que el beneficio derivado de usar datos medidos es lo suficientemente grande para garantizar el costo de obtenerlos, es necesario enfocar la atención en la calidad de los datos.

La calidad de los datos medidos esta definida por las propiedades de las múltiples mediciones obtenidas de un sistema de medición operando bajo condiciones estables. Por ejemplo, suponga que un sistema de medición, operando bajo condiciones estables, es usado para obtener varias mediciones de cierta característica. Si todas las mediciones están cercanas al valor maestro para esta característica, entonces se dice que la calidad de los datos es alta. De manera similar, si algunas o todas las mediciones se encuentran alejadas de este valor maestro, entonces se dice que la calidad de los datos es baja.

Las propiedades estadísticas más comúnmente usadas para caracterizar la calidad de los datos son el sesgo y la variancia del sistema de medición. La propiedad llamada sesgo se refiere a la locación de los datos relativa a una referencia (valor maestro) y la propiedad llamada variancia se refiere a la dispersión de los datos.

Una de las causas más comunes de los datos de baja calidad es demasiada variación. Mucha de la variación en un conjunto de mediciones se puede deber a la interacción entre el sistema de medición y su ambiente. Por ejemplo, un sistema de medición usado para medir el volumen de líquido en un tanque puede ser sensible a la temperatura ambiente del lugar en el cual es usado. En tal caso, la variación en los datos puede deberse ya sea a los cambios en el volumen o a cambios en la temperatura ambiente. Esto hace que la interpretación de los datos se torne más difícil y por lo tanto, sea menos deseable el sistema de medición. Si la interacción genera demasiada variación, entonces la calidad de los datos puede ser tan baja que pueden tornarse inservibles. Por ejemplo, un sistema de medición con una larga cantidad de variación puede no ser apropiado para usarse en el análisis de un proceso de manufactura porque es probable que la variación del sistema de medición pueda enmascarar la variación del proceso. Mucho del trabajo de administrar un sistema de medición se dirige a monitorear y controlar la variación. Entre otras cosas, esto significa que se debe poner mayor énfasis en aprender como el sistema de medición interactúa con su ambiente de manera que sólo datos de calidad aceptable son generados. (MSA, 2002)

Capítulo II

Tecnología de montaje superficial

Este segundo capítulo constituye una breve introducción al proceso de ensamble de montaje superficial, marco dentro del cual, se encuentra el alcance de la presente tesis.

2.1 Tecnología de montaje superficial

El montaje superficial implica soldar un componente directamente a un conjunto de superficies de metal expuesto o Islas - también conocidas con el nombre de “PADs”- en lugar de insertar las terminales de los componentes en las perforaciones de una tablilla de circuito impreso (tecnología “a través de agujero” o de inserción). (Hollander, 1987)

2.1.1 Procesos de ensamble de montaje superficial

Un ensamble de Montaje superficial es primordialmente un proceso de soldadura de “Reflujo”. Este involucra deposición de pasta de soldadura, posicionamiento de componentes y posiblemente soldadura de ola y limpieza. (N. C. Lee, 2002). La figura 2.1 muestra la configuración típica de una línea de ensamble de Montaje Superficial.

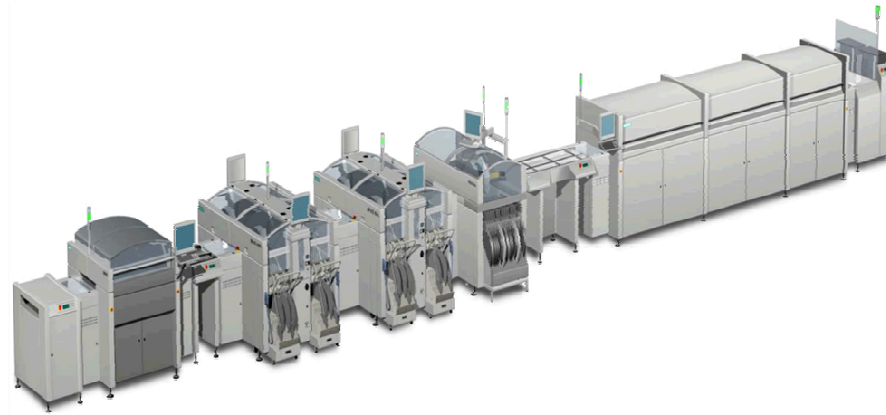


Figura 2.1. Apariencia típica de una línea de ensamble para tecnología de montaje superficial.

2.1.2 Historia de la tecnología de montaje superficial

La tecnología de montaje superficial (Surface Mount Technology – SMT, por sus siglas en inglés) es un cambio revolucionario para la industria electrónica. A mediados de los 60's, las primeras aplicaciones de SMT emergieron dada la ventaja de ser capaces de colocar componentes en ambos lados de una tablilla de circuito impreso (Printed Circuit Board - PCB, por sus siglas en Inglés). Sin embargo, SMT no dominó sino hasta casi 15 años después. A finales de los 70's, la tecnología "a través de agujero" o de inserción (Through-Hole - THT, por sus siglas en Inglés) comenzó a experimentar dificultades para cumplir con la constante demanda de mayores densidades, principalmente debido al costo incremental de barrenar más perforaciones para un mayor número de terminales y la dificultad de hacer estas perforaciones más pequeñas (por debajo de 0.1 pulgadas). Fue entonces que el interés en la Tecnología de Montaje Superficial aumentó rápidamente y su potencial comenzó a ser reconocido por las industrias. (N. C. Lee, 2002)

En tan solo unos años, la tecnología de montaje superficial ha reemplazado casi totalmente a la tecnología convencional "a través de agujero"- en muchas aplicaciones. Esto es particularmente cierto para productos cuyos mercados demandan una mayor miniaturización y los cuales, al mismo tiempo, son producidos en grandes cantidades. Esto gracias a que el montaje superficial ofrece una amplia gama de ventajas y muy pocas desventajas para la producción industrial de este tipo de productos. Por ejemplo, los componentes de montaje superficial son mucho más pequeños que sus contrapartes en la tecnología de inserción, lo que significa que las dimensiones del ensamble pueden

ser altamente reducidas mientras que se mantiene la misma funcionalidad o bien, es posible aumentar la cantidad de funciones dentro de las mismas dimensiones. La densidad de integración puede ser aumentada aún más colocando componentes de montaje superficial en ambos lados de la tablilla de circuito impreso. Es también posible mezclar componentes de Montaje Superficial con los de Tecnología “a través de agujero” en las mismas tablillas de circuito impreso. (Wormuth, et al, 2001).

2.2 Beneficios de la tecnología de montaje superficial

De los muchos beneficios adscritos a la tecnología de montaje superficial, los principales incluyen:

- **Reducción del tamaño de los componentes.** Los componentes para montaje superficial pueden hacerse de 2 a 5 veces más pequeños que los componentes convencionales con terminales.
- **Es posible incrementar la densidad de los circuitos.** Dispositivos electrónicos de bolsillo, celulares, relojes digitales, entre otros, no hubiesen sido posibles sin esta ventaja inherente al uso de tecnología de montaje superficial.
- **Reducción del tamaño de los tableros de circuito impreso.** Componentes más pequeños y una mayor densidad de los circuitos favorece la reducción del tamaño de las tablillas de circuito impreso, así como del costo de estas.
- **Reducción de Peso.** El tamaño más pequeño de los tableros y componentes se traduce a circuitos más ligeros y compactos.
- **Ensamble más robusto.** Los ensamblajes de montaje superficial pueden ser más pequeños, ligeros y más resistentes a los golpes o vibraciones que los ensamblajes hechos con componentes convencionales.
- **Mayor inter-conectividad.** Los componentes de montaje superficial pueden ser ensamblados o montados con un mayor número de interconexiones por un área dada que cuando se utilizan componentes convencionales.
- **Mayor confiabilidad.** A medida que el número de capas del tablero y conexiones entre capas se reduce, la confiabilidad del circuito aumenta.
- **Alto desempeño en altas frecuencias.** Los caminos más cortos de interconexión permitidos por la tecnología de montaje superficial, hacen posible un mejor desempeño de estos circuitos al trabajar en altas frecuencias.

- **Bajos costos de manufactura.** El ensamble automático de tableros y componentes de montaje superficial no es solamente más fácil y más barato, sino además, la calidad alcanzada es mucho mayor cuando se compara con el desempeño de la tecnología convencional usando componentes con terminales.
- **No existe alternativa.** Algunos componentes están disponibles únicamente para Montaje Superficial, simplemente porque la cantidad de terminales de entrada y salida del paquete así lo demanda. (Bergeron, 1990)

2.3 Componentes de montaje superficial

Los componentes de montaje superficial (Surface Mount Devices, SMD por sus siglas en inglés) están disponibles para casi cualquier tipo de aplicación, tales como capacitores, resistencias, transistores, diodos, inductores, circuitos integrados y conectores. (N. C. Lee, 2002)

El uso de SMD's tiene muchas ventajas en términos del diseño de circuitos y la funcionalidad de los ensambles electrónicos. Los componentes son más pequeños, por lo tanto, es posible aumentar la densidad, lo cual reduce el tiempo de propagación de las señales. Los SMD's permiten que el tamaño de ciertos productos electrónicos, tales como los teléfonos celulares, sean miniaturizados en masa.

Por el lado de producción, estos son mucho más fáciles de procesar en líneas de ensamble automatizadas, lo que vuelve la producción en masa más económica. Por ejemplo, la colocación de SMD's automatizada omite varios pasos preparatorio en el proceso (enderezar terminales, etc.) necesarias para la colocación de componentes en la tecnología de inserción. En contraste, la producción de un ensamble con componentes de montaje superficial únicamente consistirá en aplicación de pasta de soldadura, posicionamiento de componentes y soldadura de reflujo. Ver figura 2.2 (Wormuth, et al, 2001).

2.4 Aplicación de la pasta de soldadura

Para crear una unión de soldadura confiable mediante la soldadura de reflujo, el primer paso es aplicar soldadura en forma de pasta sobre las islas de la tablilla de circuito impreso. Esto puede hacerse de muy diversas maneras. Además del viejo método de impresión con malla y el método de dispensado, la impresión mediante el uso de plantilla es hoy día el método más comúnmente utilizado, considerando las necesidades actuales por lograr la más alta calidad en la producción en masa. El proceso de aplicación de la pasta de soldadura es la parte más importante del proceso entero de producción para un ensamble eléctrico, ya que la calidad alcanzada durante la aplicación de la pasta de soldadura tiene un efecto directo en las etapas subsecuentes del proceso. (Wormuth, et al, 2001).

El control de la cantidad de pasta depositada es crítico en el caso de ensambles de montaje superficial con espaciamiento fino y ultra fino. El proceso de impresión aún no está entendido en su totalidad tal como lo indica el hecho de que la industria reporta que entre el 52 y 71% de los defectos encontrados en ensambles de SMT están relacionados al proceso de impresión de pasta con plantilla. (Pan, 2004)

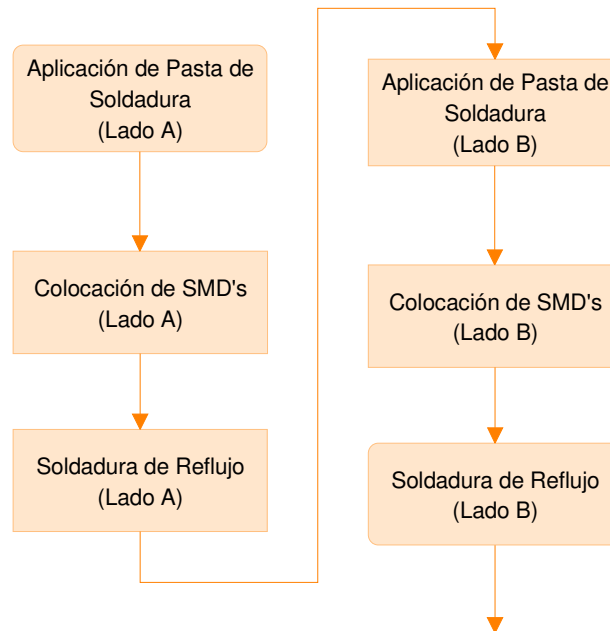


Figura 2.2. Secuencia de producción para ensambles puros de montaje superficial.

2.4.1 Composición de la pasta de soldadura

La pasta de soldadura es una mezcla homogénea de partículas metálicas y aditivos de *fundente*. En la actualidad, las partículas metálicas contenidas en las pastas de soldadura usadas en la tecnología de montaje superficial consisten de una aleación principalmente de estaño y plomo, algunas veces conteniendo adiciones de plata. Sin embargo, cada vez más y más soldaduras libres de plomo están disponibles por razones ambientales.

El *fundente* consiste de resinas, solventes, activadores y agentes tixotrópicos.

La figura 2.3 muestra la composición de una pasta de soldadura típica (porcentajes por peso):

- 90% de partículas de soldadura:
 - Aleación de estaño y plomo (con algo de plata si esto es necesario).
- 10% fundente:
 - 5% resinas, 4% solventes y 1% activadores y agentes tixotrópicos.

Por otro lado, los porcentajes en volumen para una pasta de soldadura estándar son apenas 50% de partículas de soldadura y 50% de fundente. (Wormuth, et al, 2001)

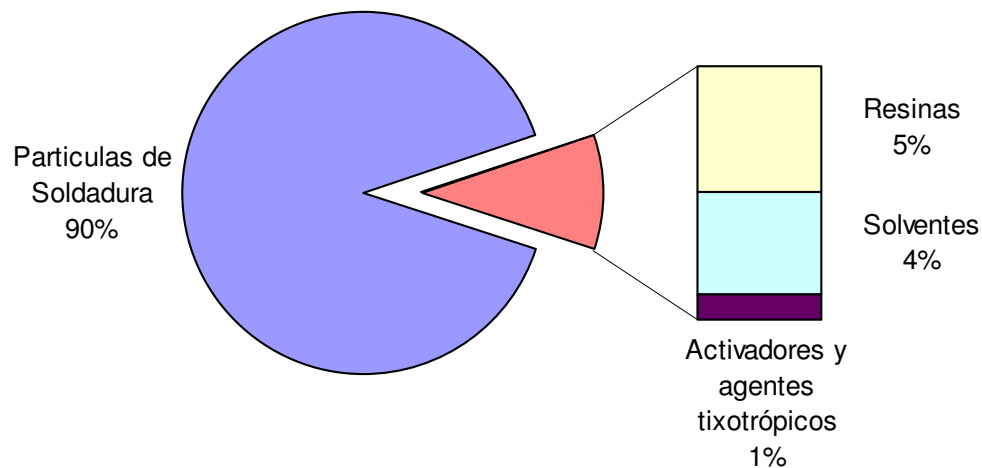


Figura 2.3. Composición en porcentajes de peso de la pasta de soldadura.

2.4.1.1 Partículas de soldadura

Las partículas de soldadura (o el contenido de metales) determinarán el éxito del proceso de soldadura. Las aleaciones metálicas más comúnmente usadas para pastas de soldadura incluyen el tipo Estaño 60%/Plomo 40% (Sn60Pb40) con un rango de fusión que va de los 183 °C a los 190 °C, y Estaño 63%/Plomo 37% (Sn63Pb37) con un punto de fusión de 183 °C.

El tamaño y forma de las partículas en el metal pulverizado afectan las propiedades y calidad de impresión de la pasta de soldadura. Las partículas deben tener una forma esférica uniforme con una superficie suave, con mínimas desviaciones respecto de su forma ideal.

El tamaño de las partículas se encuentra asignado a varias clases o categorías. La tabla 2.1 muestra una clasificación de estos tamaños.

Las pastas de soldadura con tamaños de partícula clase 3 y 4 son usadas para aplicaciones con espaciado fino y ultra fino (0.5 a 0.3 mm). Si el diámetro de las partículas de soldadura es reducido sustancialmente, el área de superficie total de las partículas a ser soldadas incrementará significativamente, aunque, el volumen de soldadura permanezca sin cambio.

Tabla 2.1. Porcentajes y tamaños de partículas de soldadura.

| Tipo de Partícula | Rango Nominal | Limite Superior | | Limite Inferior | |
|-------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Mínimo 85% entre (µm) | Máximo 10% de partículas ente (µm) | No. partículas arriba de (µm) | Máximo 10% de partículas ente (µm) | Máximo 3% de partículas (µm) |
| 1 ^a | 75 – 150 | 150 – 200 | 200 | 50 – 75 | 50 |
| 1b | 20 – 150 | 150 – 200 | 200 | 15 – 20 | 5 |
| 2a | 45 – 75 | 75 – 100 | 100 | 32 – 45 | 32 |
| 2b | 20 – 75 | 75 – 100 | 100 | 15 – 20 | 15 |
| 2c | 20 – 63 | 63 – 80 | 80 | 15 – 20 | 15 |
| 3 | 20 – 45 | 45 – 60 | 60 | 15 – 20 | 15 |
| 4 | 20 – 38 | 38 – 50 | 50 | 15 – 20 | 15 |
| 5 | 15 – 25 | 25 – 30 | 30 | 10 – 15 | 10 |

El inevitable incremento en el área de superficie total, producto del uso de partículas de soldadura más pequeñas puede ocasionar una mayor oxidación, la cual puede tener un efecto adverso en la calidad de la unión de soldadura. Los óxidos se forman cuando el metal pulverizado es procesado, y tienen un efecto negativo en la humectación de las superficies y en la formación de bolas de soldadura durante el proceso de soldado. Con el fin de prevenir una pérdida de calidad, la pasta de soldadura debe siempre activarse adecuadamente. (Wormuth, Dirk, 2001)

2.4.1.2 Resinas

Las resinas son un componente importante del fundente (y de los residuos de este después del proceso de soldado). Estas protegen las superficies de las partículas de soldadura en contra de la oxidación en un grado alto, además que tienen influencia sobre las propiedades adhesivas de la pasta de soldadura (la cual es importante para fijar los SMD's durante el proceso de posicionamiento) y sus características reológicas; por ejemplo, el comportamiento de flujo (deformación irreversible) y viscosidad.

Entre menor sea la cantidad de resinas contenidas en la pasta de soldadura, la cantidad de residuos de fundente que permanecen después del proceso de soldado serán menores. Desafortunadamente, el efecto protector de la resina también disminuye. Por otro lado, un contenido excesivo de resinas tendría un efecto negativo en el comportamiento de flujo y pudiera causar que la pasta de soldadura fluyera junta entre depósitos adyacentes. (Wormuth, Dirk, 2001)

2.4.1.3 Activadores

Los activadores sirven para remover las capas de óxido de las partículas de soldadura (metal pulverizado) y de las superficies a soldar (islas y terminales), dejando las superficies metálicas limpias y brillantes. Las partículas de soldadura son entonces capaces de fundirse mejor juntas y humedecer las superficies de contacto. Los activadores incluyen halógenos y ácidos. La concentración de los activadores debe sin embargo ser limitada ya que los residuos y otros productos derivados que ocurren en muchas aplicaciones, permanecen en los componentes después de soldados. Por esta razón, los valores de corrosión electrolítica, resistencia de la superficie y residuos iónicos deben por tanto ser tomados en consideración. Estas especificaciones, deberán tomarse

en cuenta cuando se manejan los tipos más nuevos de pastas de soldadura, las cuales han sido diseñadas para eliminar el proceso de limpieza (pastas de soldadura No Lavables). (Wormuth, Dirk, 2001)

2.4.1.4 Solventes

Los solventes son usados para disolver las resinas. Se debe preferir el uso de alcoholes y éteres (con altos puntos de ebullición). Para extender el tiempo de vida de la pasta sobre la plantilla, los solventes deben evaporarse lentamente a temperatura ambiente, de otra manera, la pasta se volvería más viscosa. Esto resultaría en una pobre calidad de impresión y la pasta tendería a quedarse pegada a las navajas y a la plantilla de impresión. Por ejemplo, la pasta quedaría adherida a las aberturas de la plantilla.

Al contrario que en la temperatura ambiente, cuando la pasta de soldadura es calentada en el sistema de reflujo, los solventes deben evaporarse rápidamente para evitar que la pasta de soldadura comience a fluir una vez más. Un comportamiento inapropiado de flujo podría causar defectos tales como puentes de soldadura o pequeñas interconexiones de soldadura entre islas.

2.4.1.5 Agentes tixotrópicos

La viscosidad de una pasta de soldadura esta determinada por el fundente, el solvente, las partículas de soldadura (forma, tamaño y porcentaje de volumen en la pasta) y por los aditivos. Los aditivos o agentes tixotrópicos, tales como la celulosa o resinas acrílicas, afectan la viscosidad relacionada con la presión o el comportamiento tixotrópico de la pasta de soldadura. La tixotropía es la reducción en viscosidad causada por un estrés mecánico sostenido, con un correspondiente incremento cuando dicho estrés desaparecen. El comportamiento tixotrópico es por tanto una separación de la estructura intrínseca de la pasta de soldadura causada por el estrés aplicado (las fuerzas estructurales internas son sobrepasadas o destruidas), resultando en una reducción de fuerza (baja viscosidad, mejor comportamiento de flujo). La estructura original se reestablece una vez que el estrés desaparece, así que, se trata de un proceso reversible y relacionado con el tiempo.

La alta viscosidad durante el reposo y la baja viscosidad cuando la pasta se encuentra en movimiento y bajo presión, cumplen los requerimientos que tienen lugar durante y después del proceso de impresión; baja viscosidad en plantilla de impresión y alta viscosidad sobre la tablilla de circuito impreso.

2.4.2 Pastas No Lavables

La designación de No Lavables o “No-Clean” indica que los residuos del fundente que permanecen después del proceso de soldadura de reflujo no tienen que ser obligatoriamente removidos mediante lavado. Hay innumerables razones para usar este tipo de pasta de soldadura. Con la continua miniaturización de componentes y el resultante incremento de densidad en los circuitos, se ha vuelto aún más difícil limpiar los componentes electrónicos de una manera reproducible – con calidad uniforme. Otra razón que ha convencido a muchos ensambladores a usar soldaduras No Lavables es la prohibición del uso de clorofluorocarbonos, los cuales han sido empleados como agentes de limpieza en el pasado. La eliminación de los procesos de lavado reduce tanto costos de inversión (equipo de lavado) como los costos de operación (agentes de limpieza, disposición de residuos). La batalla de los precios particularmente en la industria de los electrónicos y de las computadoras ha alentado a muchos ensambladores a eliminar la etapa de lavado.

2.5 Impresión de pasta con plantilla

La impresión con plantilla continúa siendo el método predominante para efectuar la aplicación de la pasta de soldadura en la manufactura en altos volúmenes de ensambles de Tecnología de Montaje Superficial. (Pan, 2004).

La impresión mediante el uso de plantilla es una evolución del proceso de impresión con malla. Cuando se compara con la malla, el uso de plantilla permite un control más preciso del volumen de pasta de soldadura depositada, por lo tanto, es adecuada para aplicaciones con espaciamentos más finos. (N. C. Lee, 2002).

En el proceso de impresión con plantilla, la pasta de soldadura es forzada a través de las aberturas de esta y transferida a una tablilla de circuito impreso, el cual se encuentra en

contacto con la plantilla (PCB). Un equipo de impresión de pasta, en conjunción con una espátula de metal o plástico o una cabeza de transferencia conteniendo soldadura en forma de pasta es usada para este propósito (ver figura 2.4). (Coleman, 2002).

Cuando se usa una plantilla metálica, todos los depósitos de soldadura en un lado del PCB son aplicados en una misma impresión o pasada. El metal de la plantilla contiene el patrón a ser impreso (Wormurth, Dirk, 2001); dicho patrón debe corresponder con las áreas que se desean imprimir sobre el PCB. La plantilla descansa enteramente sobre el tablero de circuito impreso durante el proceso de impresión. Durante la impresión, la previamente homogenizada pasta de soldadura es empujada sobre la plantilla con una espátula o navaja. La pasta es rodada enfrente de la espátula, y es forzada a través de las aberturas en la plantilla sobre las islas debajo en el PCB.

La espátula usada para aplicar la presión esta hecha de plástico o metal. El uso de espátulas de metal y plantillas de corte láser o electroformadas han aumentado notablemente la confiabilidad del proceso de aplicación de la pasta de soldadura. Sin embargo, existen algunas pocas restricciones sobre este método. En la segunda mitad de 1997, técnicas más avanzadas fueron desarrolladas en las cuales la pasta esta enteramente contenida o encerrada en una cabeza denominada de impresión. En lugar de usar una espátula para rolar la pasta de soldadura previamente aplicada sobre la plantilla, la cabeza de impresión aplica presión mecánica o de aire para presionar la pasta a través de las aberturas en la plantilla y sobre las islas correspondientes en el PCB a medida que dicha cabeza se mueve. En este caso, la pasta de soldadura es empujada dentro de una cámara de procesamiento en la cabeza de impresión desde cassettes o cartuchos. La pasta de soldadura esta protegida del potencialmente dañino medio ambiente dentro de esta cámara.

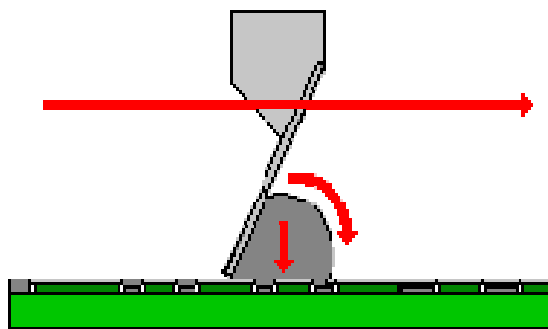


Figura 2.4. Modelo de la impresión de pasta de soldadura usando espátula.

Pruebas previas han mostrado que el sistema cerrado de la cabeza de impresión permite simples y robustos procesos que – si son instalados correctamente – logran una calidad uniforme y excelente de impresión en periodos largos, sin intervención regular del operador. (Wormurth, Dirk, 2001).

La limitante en el uso del proceso de impresión mediante plantilla consiste en el requerimiento de un substrato con superficie plana para que esta pueda ser colocada. Esto limita el potencial de usar el proceso de impresión con propósito de efectuar re-trabajos o para tareas de soldadura que involucren superficies no planas. (N. C. Lee, 2002)

2.5.1 Manufactura de la plantilla

Tres métodos son utilizados para fabricar una Plantilla

- Formado
- Cortado láser
- Electroformado.

Con respecto al costo, las plantillas de formado químico son las más económicas, seguidas por las de corte láser. Las plantillas electroformadas son las menos económicas. (Wormuth, et al, 2001)

2.5.1.1 Materiales para construcción de las plantillas

Dependiendo en consideraciones de costo y la tecnología de formación de la plantilla elegida, los materiales usados para su construcción incluyen latón, acero inoxidable, molibdeno, níquel y plásticos.

El acero inoxidable y el latón son los materiales empleados más comúnmente en los procesos de formado químico. Las plantillas de Molibdeno son producidas mediante un proceso similar a las utilizadas en el formado químico de plantillas de latón y acero inoxidable, teniendo como diferencia la solución empleada en el formado; esta es más agresiva y peligrosa. El Molibdeno ha sido promovido como un metal alternativo al latón o

al acero inoxidable debido a su estructura granular más densa, la cual reporta efectos positivos en el aspecto de liberación de pasta de la plantilla. El Níquel es el metal de elección para la tecnología de electroformado, esto debido a los requerimientos químicos del proceso de formado de la plantilla. Para la tecnología de cortado láser, el acero inoxidable es por excelencia la opción a escoger. (N. C. Lee, 2002). La tabla 2.2 presenta una breve comparación entre los costos de las diferentes tecnologías de manufactura de plantillas.

2.5.1.2 Plantillas de formado químico

Las aberturas formadas empleando esta tecnología comúnmente sufren de un problema llamado perfil de “reloj de arena” (ver figura 2.5). La presencia de este perfil complica la liberación de pasta de soldadura de la plantilla. Además del perfil de “reloj de arena” existen otros problemas asociados al uso de esta tecnología. Estos incluyen “sobre formación”, aberturas redondeadas y pobre alineación. Todos estos defectos presentes en la plantilla resultarán en una liberación deficiente de la pasta de las aberturas de esta. El proceso de formado químico es barato y adecuado para aplicaciones con espaciamento grande. (N. C. Lee, 2002)

Tabla 2.2. Comparación de la tecnología usada en la manufactura de las plantillas y el costo.

| Tecnología | Tipo | Material | Costo (\$) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| Formado Químico | Convencional | Acero Inoxidable | \$ 325.00 |
| | | Latón | |
| | | Latón | \$ 325.00 |
| | | Molibdeno | \$ 475.00 |
| | Formado en Banda | Acero Inoxidable | \$ 370.00 |
| Electroformado | | Únicamente Níquel | \$ 1,500.00 |
| Cortado Láser | | Acero Inoxidable | \$ 1,500.00 |
| | | Plásticos | \$ 450.00 |
| Tratamientos Adicionales | Electropulido | Acero Inoxidable | \$ 60.00 |
| | Recubrimiento de Níquel | Únicamente Latón | \$ 75.00 |
| | Escalonado | Acero Inoxidable | \$ 100.00 |
| | “Step down” | Latón | \$ 100.00 |



Figura 2.5. Imagen ampliada de una abertura de plantilla por formado químico.

2.5.1.3 Plantillas de corte láser

El proceso de corte láser de la plantilla involucra el procesamiento de datos del archivo “Gerber” y el cortado de la imagen. Típicamente, se usa acero inoxidable o algunos otros materiales con bajo contenido de Zinc. Algunos de los problemas asociados con esta tecnología son los bordes aserrados o la formación de viruta en la superficie de la plantilla o paredes de las aberturas. Algunos procesos posteriores al cortado tales como el electropulido son capaces de remover estas imperfecciones.

Las plantillas de corte láser son empleadas para aplicaciones con espaciamiento fino dada la mayor precisión con la que son fabricados (ver figura 2.6).

2.5.1.3.1 Electropulido.

El electropulido es un proceso de micro formado secundario que se aplica al acero inoxidable una vez que se ha completado el proceso de corte. Consiste en colocar la plantilla de formado químico o de corte láser en un tanque conteniendo una solución alcalina o ácido y aplicando una corriente eléctrica a la solución. El electropulido removerá los puntos altos y rugosos de la superficie de la plantilla, lo que dará origen a una superficie lisa y brillante (ver figura 2.7). Este proceso ha sido reconocido por su capacidad de mejorar la liberación de la pasta en aberturas concebidas para aplicaciones con espaciamiento fino.

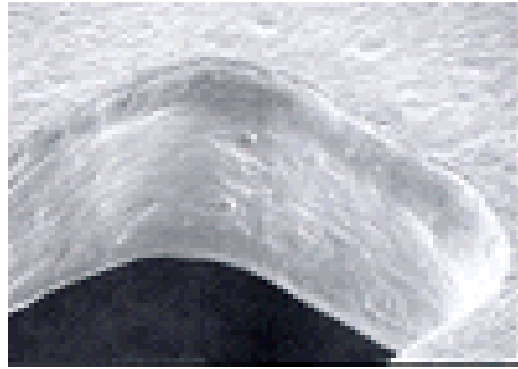


Figura 2.6. Imagen ampliada de una abertura de plantilla por corte láser.

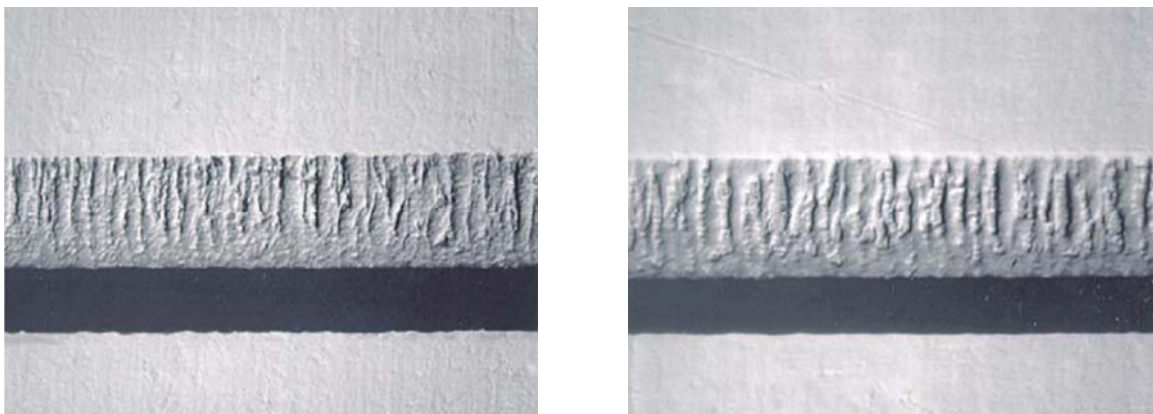


Figura 2.7. Comparación entre el acabado de las paredes de una abertura tratada con electropulido (derecha) y sin electropulido (izquierda).

2.5.1.4 Plantillas electroformadas.

Las plantillas electroformadas son hechas mediante un proceso aditivo opuesto a los procesos sustractivos usados para el formado químico y las plantillas de corte láser. (Escarcega, 2003). Se usa un mandril como base para la aplicación del elemento foto-resistivo y para la resolución de la imagen. El mandril es colocado en un baño donde el níquel es depositado. La abertura será formada alrededor del elemento foto-resistivo hasta que el espesor deseado haya sido alcanzado. La definición y tolerancias del electroformado son mejor que los procesos de formado químico. Sin embargo, debe notarse que el níquel es suave y más propenso a dañarse. Una pared suave, y presumiblemente una baja tensión superficial del níquel pueden favorecer la liberación de la pasta de la abertura (ver figura 2.8).

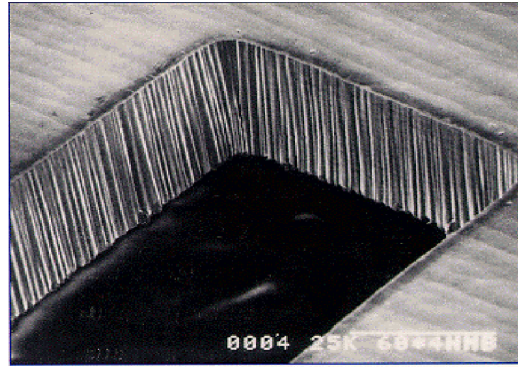


Figura 2.8. Imagen ampliada de una abertura por electroformado.

2.5.2 Consideraciones en el diseño de la plantilla

A medida que la espátula recorre la superficie de la plantilla durante el ciclo de impresión, la pasta de soldadura llena sus aberturas. Es entonces que la pasta es liberada y depositada en las islas sobre el PCB durante el ciclo de separación de la plantilla y la tablilla de circuito impreso. Idealmente, el 100% de la pasta de soldadura que llenó la abertura durante el proceso de impresión es liberada de las paredes de la abertura y adherida a las islas del tablero formando un depósito de soldadura completo. La habilidad de la pasta de soldadura para liberarse de las paredes internas de la abertura depende principalmente de tres factores:

- a) La “proporción de áreas” de impresión para el diseño de la plantilla.
- b) La geometría de las paredes laterales de la abertura.
- c) La rugosidad de las paredes de la abertura.

El primer factor esta íntimamente relacionado con el diseño de la abertura, en tanto que los factores 2 y 3 están más relacionados con la tecnología que se utilizó para fabricar la plantilla. (Coleman(1), 2001)

La “proporción de áreas” de impresión es el área de la isla debajo de la abertura dividida entre el área de las paredes de la abertura. (Belmonte, 2005)

$$\frac{\text{Tensión de "Atracción" de la Isla}}{\text{Tensión de "Retención" de las Paredes}} = \frac{\text{Abertura}}{\text{Espesor de Plantilla}(T) \times \text{perímetro de la abertura}} \geq 0.6$$

$$[2(L \times W)]$$

La regla de diseño generalmente aceptada para la lograr una liberación aceptable de la pasta consiste es una "proporción de áreas" igual o mayor a 0.66. Cuando la pasta se separa del substrato, la liberación de la pasta se encuentra en medio de una competencia: ¿será transferida la pasta al substrato? o ¿permanecerá esta adherida a las paredes de la abertura?. Cuando el área de la isla es mayor que $\frac{2}{3}$ del área de las paredes internas de la abertura, la pasta tiene una buena probabilidad de alcanzar una liberación igual o mayor al 80%. Sin embargo, la tecnología utilizada en la fabricación de la plantilla tiene un efecto directo en la liberación de la pasta y por lo tanto en la definición de lo que es una "proporción de áreas" para lograr una impresión aceptable. Una plantilla fabricada mediante corte láser que ha sido sometido a un proceso de electropulido, presentará un mejor acabado en las paredes de las aberturas que uno que no haya sido tratado con dicho proceso. Esta es la principal razón por la que el primero de estas plantillas exhibirá una mejor liberación de pasta que el último aún cuando ambos presenten la misma "proporción de áreas". De manera semejante, el acabado tipo espejo de las paredes de una plantilla electroformada presentarán un mayor porcentaje de pasta liberada aún cuando el valor de "proporción de áreas" sea el mismo. (Coleman(2), 2001)

Capítulo III

Calidad del proceso de impresión

En el presente capítulo se exponen aquellos factores o variables que guardan cierto tipo de relación con el desempeño y calidad del proceso de impresión de pasta de soldadura, el cual, es el objeto de estudio de esta tesis. De igual forma, se presentan algunos problemas comunes que tienen su origen en este proceso.

3.1 Factores que afectan la calidad del proceso de impresión

Existen muchas variables que afectan la calidad del proceso de impresión con plantilla, la cual es medida por la cantidad y posición de la pasta depositada. La figura 3.1 muestra una lista de variables importantes en el proceso. (Pan, 2004).

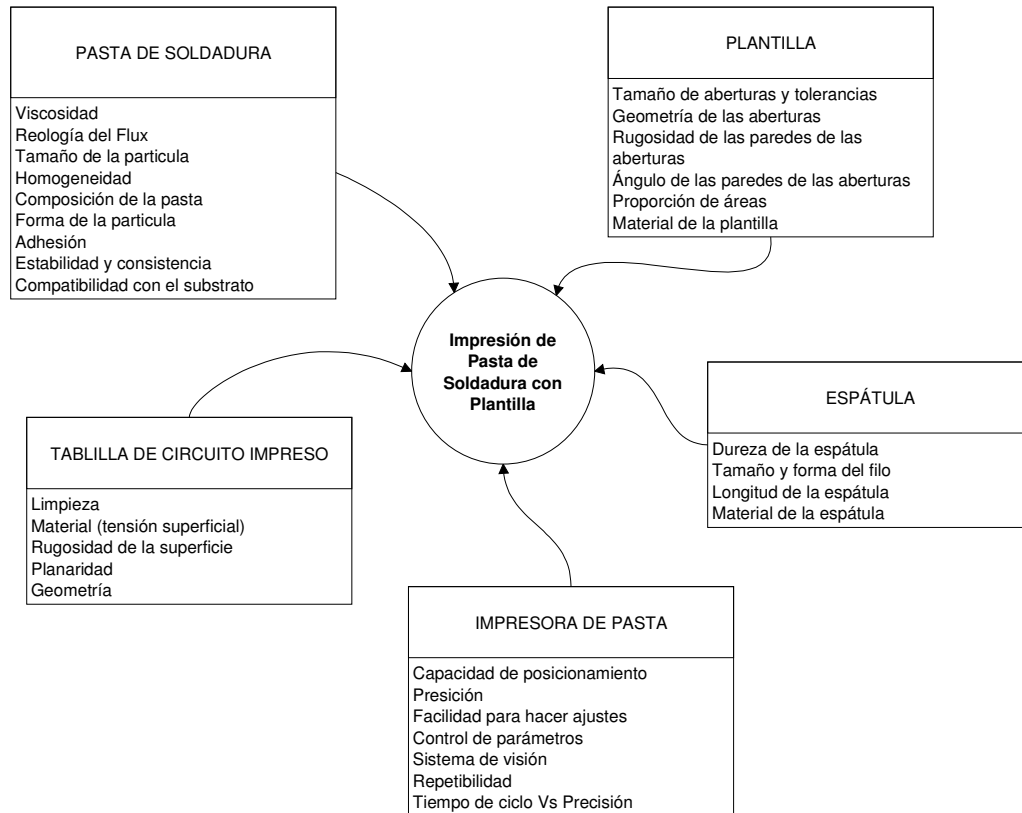


Figura 3.1. Factores que afectan el proceso de impresión de pasta de soldadura.

3.2 Problemas de SMT con origen en el proceso de impresión de pasta

En el proceso de impresión de pasta, los defectos son causados comúnmente por una pobre alineación entre el sustrato y la plantilla, por la selección incorrecta de materiales (sustratos, tipo de pasta y diseño de la plantilla) o variaciones en la cantidad de pasta depositada. La eliminación de los defectos depende en la capacidad de identificar los efectos de estos factores para corregirlos y en el adecuado monitoreo del proceso. (Belmonte, et al, 2005)

3.2.1 Separación del fundente

Idealmente, la pasta de soldadura debe ser una mezcla homogénea de fundente y partículas de soldadura. Sin embargo, algunas veces puede aparecer separación del fundente al abrir un contenedor de pasta. El síntoma típicamente consiste de una capa amarilla de fundente encima de la pasta de color gris, ya sea el contenedor un tarro o una

jeringa. Una separación pequeña de fundente es aceptable, sin embargo, una separación severa puede resultar en corrimiento de la pasta o colapso, así como también, impresiones no homogéneas, por lo tanto, esto tiene que ser corregido.

Las posibles causas de la separación del fundente incluyen: temperaturas demasiado elevadas de transporte o almacenamiento, pasta que permanece por tiempos prolongados en los estantes, pasta con viscosidad demasiado baja y pasta con su propiedad tixotrópica muy baja.

Las soluciones para eliminar la separación del fundente pueden ser categorizadas en proceso y material. Por el lado del proceso, las soluciones incluyen: usar la pasta dentro de su tiempo de vida en estante, almacenar la pasta en un contenedor giratorio, almacenar la pasta a una baja temperatura, usualmente -10 C a 5 C – será considerado adecuado, aunque una temperatura más baja es usualmente más benéfica, y revolver la pasta previo a su uso, ya sea manualmente o mediante el uso de alguna máquina.

Por el lado de materiales, las soluciones incluyen: usar pastas con niveles adecuados de viscosidad y pastas con propiedad tixotrópicas adecuadas. (N. C. Lee, 2002).

3.2.2 Endurecimiento de la pasta de soldadura

La pasta sin usar en un contenedor puede endurecerse o volverse muy viscosa. Esto puede observarse inclusive en la pasta de soldadura bien empacada. Las causas de este problema pueden estar asociadas al factor de los materiales. El fundente puede ser demasiado reactivo bajo las condiciones de almacenamiento. El fundente reacciona con los óxidos de los metales y forma sales metálicas las cuales son más viscosas que el fundente por si mismo. Esta reacción puede ocurrir con o sin la presencia de oxígeno y humedad. Idealmente, esta reacción del fundente ocurrirá a la temperatura de reflujo. De cualquier forma, si la reacción ocurre repetidamente a la temperatura en la que es almacenada, la pasta de soldadura puede contener demasiadas sales metálicas y por lo tanto puede volverse demasiado viscosa. Además, las partículas de soldadura sin la protección de una capa de óxido tienden a causar soldaduras frías, factor que agrava aún más el problema.

Soluciones efectivas incluyen: temperaturas bajas y controladas de embarque y almacenamiento y el empleo de fundentes de baja actividad a estas temperaturas. También, el uso de partículas de soldadura con un mayor contenido de óxidos puede ayudar a aliviar el problema. (N. C. Lee, 2002).

3.2.3 Tiempo de vida de la pasta sobre la plantilla.

Durante la impresión con plantilla, la calidad de las impresiones iniciales puede ser buena. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo de impresión, la calidad de la impresión puede comenzar a degradarse. El síntoma encontrado más comúnmente es el de pasta que comienza a tornarse más viscosa con sus resultantes faltantes de soldadura, pobres depósitos de pasta, pobre liberación de las espátulas y tapado de aberturas. Para algunos tipos de pastas, los síntomas podrían ser opuestos. La pasta podría adelgazarse gradualmente a medida que incrementa el número de impresiones dando como resultando corrimiento de pasta y escurrimiento del fundente. Ambos casos comprometen la vida de la pasta sobre la plantilla.

Para impresión con plantilla convencional, el espesamiento de la pasta de soldadura puede ser el resultado de partículas de soldadura degradadas debido a una gran actividad del fundente a temperatura ambiente, pasta de soldadura secándose demasiado rápido debido al uso de solventes volátiles en el fundente, tasas bajas de consumo e intercambio de pasta, elevadas temperaturas en el ambiente de trabajo, humedad elevada, demasiadas corrientes de aire sobre la plantilla.

El efecto de la humedad sobre la viscosidad de la pasta de soldadura sobre la plantilla puede ser doble para pasta de soldadura No Lavable o de “Resina Medianamente Activada”. La viscosidad de la pasta normalmente incrementa en condiciones de humedad elevada, tal como 80% de humedad relativa, debido a una aumentada reacción química entre el fundente y el metal bajo la presencia de humedad. Por otro lado, la baja humedad -tal como un 20% o menos- podría también causar problemas. Para pastas de soldadura “No Lavables” y de “Resinas Medianamente Activadas” con un sistema de solventes volátil, la viscosidad normalmente incrementa a medida que aumenta el tiempo de exposición de esta a bajos niveles de humedad relativa, principalmente debido a la pérdida de solvente.

Para aliviar el problema de la vida de la pasta sobre la plantilla para aplicaciones de impresión convencional, por el lado de materiales, será deseable contar con pastas no corrosivas con un bajo contenido de metales y con un sistema de solventes no volátiles. Por el lado del proceso, lo más conveniente será minimizar las corrientes de aire sobre la plantilla y mantener una temperatura y humedad moderadas en la impresora.

Para impresión de pasta mediante el uso de cámaras cerradas, tales como los diseños RheoPump® o ProFlow®, la vida de la pasta sobre la plantilla puede ser también un problema (ver figura 3.2). La eliminación de la exposición de la pasta al ambiente evita problemas asociados con secado, oxidación y absorción de humedad, y por lo tanto resulta en una vida prolongada sobre la plantilla. Sin embargo, existen algunos efectos colaterales para algunas pastas de soldadura que funcionan apropiadamente en impresoras convencionales. Algunas pastas de soldadura tienden a espesarse en la cámara a medida que aumenta el número de impresiones, en tanto que otras tienden a adelgazarse y escurrirse fuera de la cámara.

Una impresora convencional arrastra la pasta de soldadura a través del contacto de la pasta con una cabeza de espátula convencional y la plantilla. Hay una cantidad substancial de pasta que se encuentra libre de este arrastre. En cambio, para una impresora de cámara cerrada, tal como la bomba reométrica, la pasta de soldadura es arrastrada excesivamente a través del contacto con la cámara y la plantilla. Dependiendo en la química de la pasta, el excesivo arrastre de la pasta puede causar adelgazamiento o espesamiento. Por otro lado, tipos de fundente que son reactivos o corrosivos a temperatura ambiente romperán la capa de protección contra óxidos dando como resultado soldaduras frías o espesamiento de la pasta debido al arrastre excesivo. El síntoma puede aparecer tan pronto como sucedan las primeras 50-60 impresiones, o tan tarde como cerca de las 1000 impresiones. (N. C. Lee, 2002).

Por el lado de los materiales, las soluciones para lograr una mejor vida de la pasta sobre la plantilla para impresión con cámara cerrada incluyen: baja reactividad del fundente y corrosividad a temperatura ambiente, bajo contenido de metales, tales como 89 o 88%. En tanto que por el lado del proceso, las soluciones incluyen: una baja velocidad de impresión, una baja presión en la pasta de soldadura, y un calendarización más frecuente de mantenimientos preventivos.

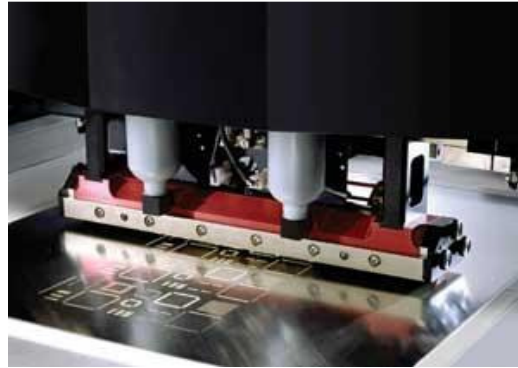


Figura 3.2. Sistema de impresión con cámara cerrada

3.2.4 Altura de pasta inadecuada

Un estudio de los defectos de SMT mostró que muchos de ellos son debidos a la falta de coplanaridad de las terminales, partes faltantes, puentes de soldadura, circuitos abiertos, partes desalineadas y falta de soldadura. Entre los defectos relacionados al proceso de ensamble de 100 tableros de SMT con componentes, las causas fueron categorizadas como proceso de impresión de pasta de soldadura (63.8%), colocación de componentes (15.3%), soldadura de reflujo y limpieza (15.2%) y recibimiento de componentes (5.7%). Obviamente, la calidad de la impresión es la más crítica variable del proceso de ensamble de SMT. Ya que la altura de la pasta de soldadura refleja el volumen de soldadura depositado, el cual de buena manera gobierna defectos como circuitos abiertos, componentes girados, puentes de soldadura, uniones con exceso de soldadura, entre otros; es muy importante tener una altura de pasta consistente y bien controlada en la impresión. Desafortunadamente, la altura de pasta comúnmente se desvía del espesor objetivo, estando demasiado arriba, o demasiado abajo o inconsistente.

Factores que afectan la altura de la pasta , además del espesor de la plantilla, incluyen: el tamaño de las partículas de soldadura, el acabado de la superficie de las islas, el espesor de la mascara de soldadura, proximidad de etiquetas, contaminación o virutas en el fondo de la plantilla o encima del PCB, la nivelación de las espátulas, la velocidad de las espátulas, la presión de las espátulas, dureza de las espátulas, el desgaste de las espátulas, el nivelado de la plantilla con relación a la superficie del PCB, pandeo de las aberturas, el tamaño de las aberturas y la orientación de estas. (N. C. Lee, 2002).

3.2.5 Corrimiento de pasta de soldadura

El corrimiento de pasta consiste en la deposición de pasta de soldadura más allá del área objetivo después de separar la plantilla durante la impresión. Puede aparecer como manchas de soldadura alrededor de las islas o como puentes de soldadura entre islas adyacentes. El corrimiento está comúnmente asociado a la acumulación de pasta de soldadura alrededor de las aberturas en el fondo de la plantilla. Esta masa de pasta de soldadura acumulada alrededor de la abertura es transferida al sustrato durante una siguiente impresión, ocasionando el defecto.

Entre los factores que contribuyen a la aparición del corrimiento se encuentran: el espesor de la plantilla, la orientación de las aberturas, el tamaño de las partículas de soldadura, la presión de las espátulas, y la acumulación de pasta en el fondo de la plantilla. (N. C. Lee, 2002).

3.2.6 Insuficiencia de pasta de soldadura

Un problema común en el proceso de impresión de pasta de soldadura es la insuficiencia. En este caso, la pasta de soldadura depositada en las islas es menor que el volumen objetivo, principalmente debido a la obstrucción o tapado de las aberturas. Los síntomas presentados incluyen la impresión parcial de soldadura o una pobre altura de la pasta de soldadura.

Las causas de la insuficiencia de pasta incluyen: el espesor de la plantilla, orientación de las aberturas, el tamaño de partículas de soldadura, el diseño inadecuado de aberturas, la pobre calidad de las aberturas, falta de presión en las espátulas y la reología inadecuada de la pasta.

3.2.7 Colapso de la pasta de soldadura

El colapso o hundimiento de la pasta de soldadura sucede a temperatura ambiente. Después del proceso de impresión de pasta, esta se extiende y el depósito cambia de tener la forma de un bloque a la de un domo, y esto ocurre a temperatura ambiente.

Las causas del colapso incluyen: bajas propiedades tixotrópicas de la pasta de soldadura, baja viscosidad, bajo contenido de metales, tamaño pequeño de partículas de soldadura, baja tensión superficial del fundente, altos niveles de humedad, pastas de soldadura higroscópicas y una presión inadecuada de posicionamiento de componentes.

El colapso de la pasta de soldadura es un fenómeno donde la viscosidad de la pasta no es suficiente para resistir la fuerza de empuje ejercida por la gravedad, lo que en consecuencia resulta en un extendimiento de la pasta de soldadura más allá del área objetivo. (N. C. Lee, 2002).

3.3 Parámetros de impresión de pasta de soldadura

La principal razón para imprimir pasta de soldadura en una tablilla de circuito impreso es para proveer una aleación de metales para la formación de las uniones de soldadura permanentes. Para lograr este objetivo, la pasta de soldadura debe ser alineada correctamente para cada unión de soldadura que deba formarse y la impresión resultante debe ser una capa uniforme de pasta que permita la perfecta colocación de componentes.

Varios factores son importantes para lograr un buen resultado cuando se imprime pasta de soldadura en un PCB. Parámetros críticos son: Tope bajo de espátula, presión de la espátula, velocidad de impresión, separación, velocidad de separación, área de impresión y limpieza de la plantilla. (Bentzen, 2000)

3.3.1 Tope bajo de espátula

El tope bajo de espátula es un límite mecánico que previene que las espátulas bajen más de lo debido. Este parámetro debe ser ajustado de manera que estas solamente toquen la superficie de la plantilla. Sin embargo, si el eje de las espátulas y la plantilla no están perfectamente paralelos, puede ser necesario hacer algunos ajustes a este parámetro para poder compensar. Pero, si el tope bajo es ajustado inadecuadamente tanto la plantilla como las espátulas se desgastaran más rápidamente.

Algunos equipos no tienen este tope mecánico sino un punto de origen para las espátulas; usualmente donde estos tocan a la plantilla. (Bentzen, 2000)

3.3.2 Presión de la espátula

La presión de la espátula debe ser tan pequeña como sea posible buscando asegurar que la plantilla queda libre de partículas de soldadura después de la impresión. La cantidad de presión es determinada por la velocidad de impresión y el tipo de plantilla.

3.3.3 Velocidad de impresión

Usualmente el proveedor de la pasta de soldadura puntualiza cual es la ventana de trabajo para su pasta de soldadura en relación con este parámetro. Típicamente se usan entre 20 y 80 mm/s. La velocidad de impresión posible es determinada por el comportamiento tixotrópico de las pastas de soldadura. La pasta de soldadura debe ser suave y fluida cuando es impresa, pero debe tener una consistencia más espesa y estable una vez que se encuentra depositada en las islas de la tablilla de circuito impreso. Entre más fluida este la pasta mientras es movida y rolada, más alta es la velocidad de impresión que puede emplearse. La velocidad de impresión es un factor de peso en el tiempo de ciclo, por lo tanto, es necesario encontrar cual es la máxima velocidad posible que puede lograrse sin comprometer la calidad de la impresión. (Bentzen, 2000)

3.3.4 Separación

La separación es la distancia entre la parte baja de la plantilla y el PCB colocado en posición de impresión pero sin que la espátula se encuentre tocando la plantilla. Para impresión usando plantilla metálica la separación debe ser cero. Esta es la tan llamada impresión en contacto. Para impresión con malla, la separación debe fijarse entre 0.5 y 0.3 mm. Aquí este factor juega un papel importante en la cantidad de pasta de soldadura que es impresa en las islas del tablero. Una separación grande resultará en una altura de pasta mayor.

3.3.5 Velocidad de separación

La velocidad de separación entre plantilla y el PCB después de la impresión es importante. Una separación demasiado rápida cuando la aplicación ha sido para espaciamiento fino resultará en aberturas de la plantilla obstruidas; además, puede

resultar en la formación de picos o deformación de los depósitos de soldadura. La velocidad de separación ideal depende de la pasta de soldadura y de la suavidad de las paredes de las aberturas de la plantilla. Por otro lado, una separación demasiado lenta aumentará el tiempo de ciclo de la impresión.

3.4 Área de impresión

Para asegurar que la pasta de soldadura esta rolando correctamente antes de que el patrón de aberturas sea alcanzado, el movimiento de las espátulas debe comenzar 80 a 100 mm fuera del área de aberturas. A los lados, la espátula debe rebasar al menos 20 mm esta área. (Bentzen, 2000)

3.5 Limpieza de la plantilla

La limpieza de la plantilla es crucial para mantener las aberturas libres de pasta entre impresiones permitiendo así una máxima eficiencia en la transferencia de pasta de soldadura durante la impresión. La limpieza puede hacerse manual o automáticamente. Se prefieren los sistemas automáticos de limpieza que hacen uso de sistemas de vacío.

Capítulo IV

Experimentación

Ya en el capítulo anterior veíamos que son varios los factores o variables que pueden afectar el proceso de impresión de pasta de soldadura. Sabemos también, que de entre todos estos factores existen algunos realmente críticos y otros que no lo son; esto de acuerdo a la variable de salida del proceso que este siendo estudiada.

El objeto del presente capítulo es el de lograr identificar los factores que tienen un efecto significativo sobre la o las respuestas de interés del proceso bajo estudio. De igual forma, se desea identificar los niveles a los que dichos factores deben ser operados de manera que sea posible lograr los objetivos planteados al comienzo de este trabajo de tesis.

4.1 Metodología propuesta

El reto que representa la comprobación de la hipótesis planteada en el presente trabajo de tesis, lo es también en la definición de la metodología adecuada para lograrlo.

El proceso de definición de la metodología en esta situación se basó en el hecho de que la herramienta clave en el trabajo de comprobación de la hipótesis consistiría del diseño de experimentos (DOE, Design of Experiments por sus siglas en inglés). La metodología fue planteada entonces como una secuencia lógica e indispensable de pre-requisitos a la experimentación cuando se hace uso de esta herramienta. La idea detrás, es que cada uno de los pasos listados en la metodología propuesta, permitiría que la experimentación fuera realizada de la manera más eficiente posible en relación a los recursos materiales y financieros requeridos para llevarlo a cabo, y al mismo tiempo, buscando maximizar las posibilidades de éxito.

La siguiente lista consiste de los pasos concebidos como la metodología adecuada –bajo la óptica de los parámetros antes mencionados- para llevar a cabo el proceso de experimentación.

- a) Selección del vehículo especial de pruebas
- b) Validación del sistema de medición a emplearse
- c) Estudio de estabilidad del equipo de impresión
- d) Estudio de escrutinio de variables y optimización
- e) Validación de los resultados de la optimización

4.1.1 Selección del vehículo de pruebas

El vehículo de pruebas consiste de la selección de un modelo de tablero de circuito impreso o substrato, mismo que será utilizado durante todo el proceso de experimentación. La adecuada selección de dicho vehículo, es un punto clave dentro de la metodología de experimentación propuesta en este capítulo. Es por esta razón, que fue necesario definir los criterios bajo los cuales habría de seleccionarse el substrato más adecuado para llevar a cabo los trabajos de experimentación y optimización ya antes planteados.

Los criterios que fueron empleados en la selección final del vehículo de pruebas son como se listan a continuación:

1. Las dimensiones físicas del substrato son iguales a 186 x 60 mm.
2. El espesor máximo del substrato es igual a 0.5 mm.
3. El substrato cuenta con una cantidad mayor o igual a 4,000 locaciones para componentes 0201 (0.6 x 0.3 x 0.3 mm). Esto es una cantidad mínima de 8,000 islas.
4. Las islas de dicho substrato deberán estar definidos por la mascara de soldadura.
5. El substrato deberá encontrarse libre de cualesquier tipo de defectos de fabricación.
6. Deberá encontrarse libre de cualesquier marca en relieve sobre la superficie de impresión del mismo.
7. Los archivos de fabricación del substrato deben encontrarse disponibles.

De acuerdo con los criterios aquí listados, el vehículo de pruebas seleccionado fue un modelo conocido como CX77105-11 (ver figura 4.1). Este modelo de substrato contiene 396 módulos individuales, cada uno de ellos ensamblados con 7 componentes de montaje superficial 0201; estos módulos, se encuentran distribuidos de manera equitativa a lo largo de 4 islas o grupos, dentro de un área de 186 x 60 mm (ver figura 4.2).

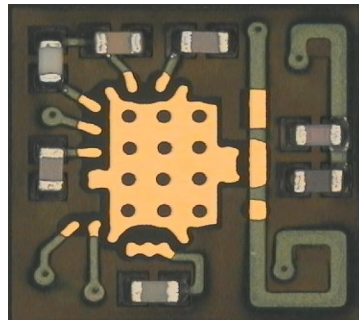


Figura 4.1. Módulo individual correspondiente a un substrato de CX77105-11

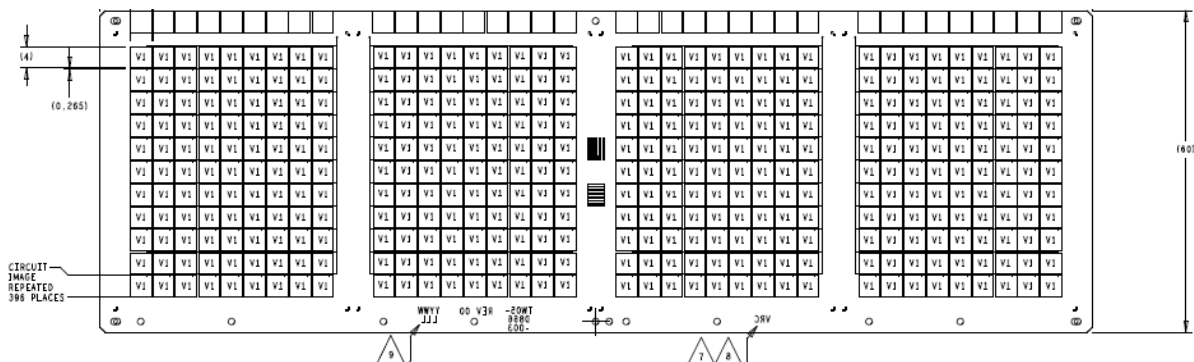


Figura 4.2. Substrato CX77105-11.

4.1.2 Validación del sistema de medición a emplearse

4.1.2.1 Equipo de medición

El equipo que se usará para la medición de la(s) característica(s) de interés (variables de salida) del diseño de experimentos, será un equipo de inspección óptica automático (AOI) especialmente diseñado para la inspección de pasta de soldadura. Dicho equipo es fabricado por la compañía norteamericana CyberOptics. El modelo que se empleará es el SE-300, este es capaz de reportar información relacionada al posicionamiento, altura, área y volumen de la deposición de pasta sobre un sustrato.

4.1.2.2 Análisis del sistema de medición

Dado a que el éxito del diseño de experimentos se verá grandemente influenciado por el desempeño del sistema de medición, la validación total de este, se torna indispensable previo al proceso de experimentación. Son dos las implicaciones principales de dicha validación:

- Asegurar que la calibración del equipo este vigente y correcta.
- Realizar un estudio de MSA (Análisis del Sistema de Medición)

4.1.2.2.1 Verificación de la calibración de la SE-300

El proveedor de este equipo recomienda realizar esta verificación anualmente. Para realizar dicha verificación, se hace uso de un conjunto ó “set” de bloques patrón, cuyas alturas, áreas y volúmenes son conocidas. De acuerdo a las especificaciones y recomendaciones del fabricante, basta con verificar que el equipo sea capaz de medir las características de estos bloques patrón dentro de unas especificaciones determinadas en un archivo de inspección especial creado con el objeto de validar la calibración de la máquina.

Esta verificación resulta imprescindible para asegurar la correcta validación y comprobación del sistema de medición a utilizarse en la etapa de experimentación para el proceso de recopilación de datos e información.

La verificación fue satisfactoria (ver figura 4.3); todas las mediciones se encontraron dentro de las especificaciones antes mencionadas.

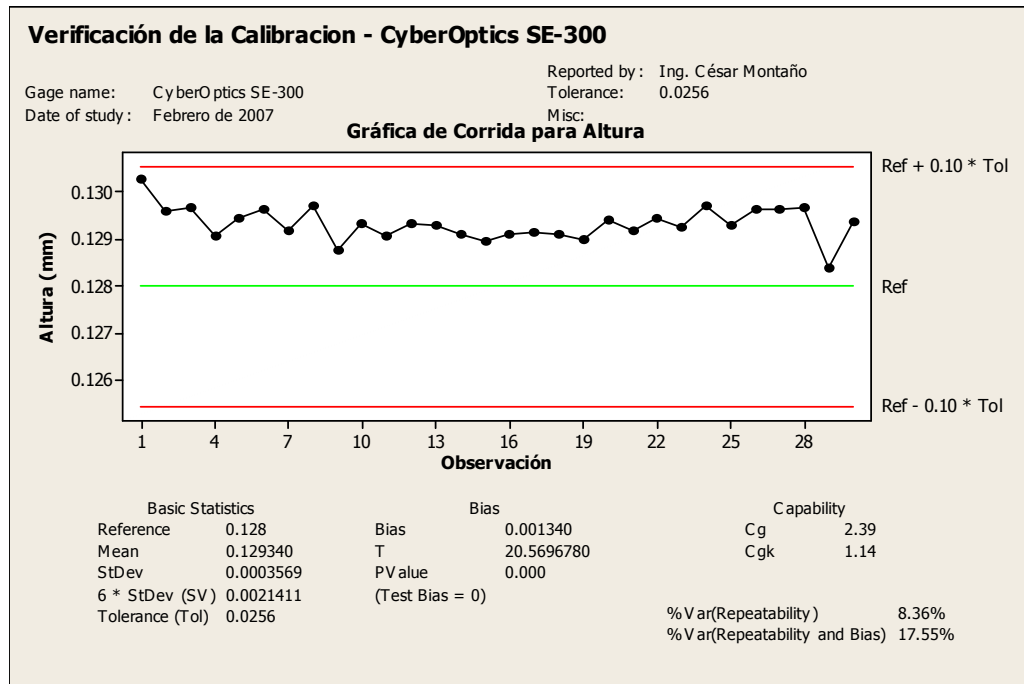


Figura 4.3. Gráfica para verificación de calibración de CyberOptics SE-300.

4.1.2.2.2 MSA para la CyberOptics SE-300

El procedimiento que se siguió para realizar el MSA para este equipo fue como se describe a continuación:

1. Se seleccionó un modelo de tablero de circuito impreso que pudiera ser usado para el análisis del sistema de medición (MSA). Se procuró que dicho producto tuviera la característica de ser total o mayoritariamente ensamblado con componentes 0201 (0.6 x 0.3 mm).
2. Se generó un programa de inspección para el equipo SE-300 que fuera capaz de verificar la totalidad de las locaciones que serian impresas con pasta de soldadura en el sustrato.
3. Se imprimió pasta de soldadura en 3 tableros de circuito impreso del modelo que fue elegido para el estudio de MSA. Cada uno de ellos fue identificado de manera particular usando las letras A, B y C.

4. Se realizó la inspección de los tableros un total de 3 veces cada uno; el orden en el que se realizó la inspección fue totalmente aleatorio. Los archivos individuales de resultados se identificaron cada uno con la letra correspondiente al tablero inspeccionado y un número del 1 al 3 indicando la inspección individual a la que correspondía.
5. De cada archivo individual se extrajeron 10 mediciones de pasta de soldadura; de tal forma que al final, se reunieron 30 datos individuales para cada tablero. Estos 30 datos individuales, son en realidad 10 locaciones diferentes, medidas 3 veces cada una. Estas 10 locaciones son diferentes para cada tablero.
6. Con estos 30 datos de cada tablero, se realizó el cómputo del MSA con la ayuda de **MINITAB®**. La figura 4.4 muestra el análisis gráfico hecho al sistema de medición.
7. El criterio de éxito fue el siguiente:
 - El porcentaje de variación con el que contribuye el sistema de medición de acuerdo al MSA debe ser igual o menor al 10%.
 - El número distinto de categorías debe ser igual o mayor a 4; Este parámetro nos deja ver si el sistema de medición que se estará usando es capaz de discriminar. En otras palabras, el sistema de medición es capaz de detectar las variaciones del proceso de impresión de pasta de soldadura.

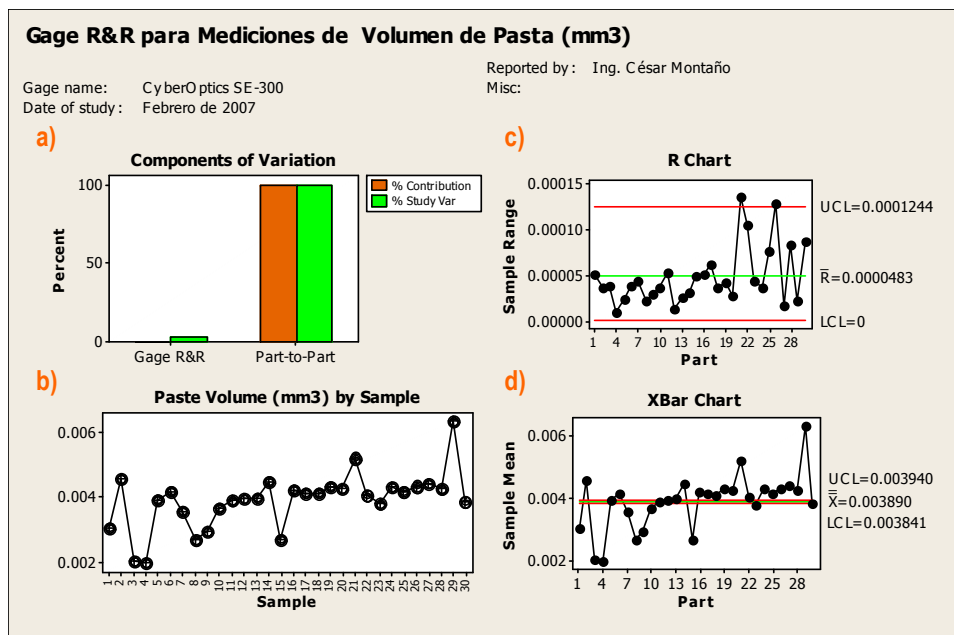


Figura 4.4. Análisis gráfico del sistema de medición.

La interpretación de la figura 4.4 es como sigue:

- a) El factor que contribuye con la mayor cantidad de variación dentro del sistema de medición es la variación que existe de *parte a parte*. Esto es positivo, ya que indica que la repetibilidad del equipo de medición es muy buena.
- b) Las mediciones individuales de una misma altura de pasta de soldadura son hechas de manera consistente por el sistema de medición. Las diferencias entre mediciones individuales es congruente con lo esperado, ya que las alturas de pasta medidas fueron seleccionadas al azar y representan la variación natural del proceso de impresión de pasta de soldadura.
- c) En este caso, la gráfica *R* nos indica –nuevamente- que el equipo esta midiendo de manera consistente la altura de pasta de soldadura. El hecho que la mayor parte de los puntos graficados se encuentren dentro de los límites de control de la gráfica, así lo confirma.
- d) Los puntos fuera de control en este gráfico \bar{X} nos dice que las alturas de pasta seleccionadas para hacer el estudio representan en buena medida parte de la variación natural del proceso de impresión de pasta de soldadura. Los puntos fuera de control son entonces deseables.

Resultados del Estudio de MSA

| Fuente | Desv. Est. | Variación del Estudio (6 * SD) | % Variación del Estudio %SV |
|--------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Gage R&R Total | 0.0000298 | 0.0001785 | 3.44 |
| Repetibilidad | 0.0000298 | 0.0001785 | 3.44 |
| Var. Parte a Parte | 0.0008647 | 0.0051879 | 99.94 |
| Variación Total | 0.0008652 | 0.0051910 | 100.00 |

Numero de Distintas Categorías = 40

El resultado del MSA nos dice que aproximadamente un 3.44% del total de la variación encontrada en el sistema de medición es producto del equipo mismo. Por otro lado, el número distinto de categorías es 40. Estos resultados indican que el sistema de medición que será utilizado es más que adecuado y se encuentra en perfectas condiciones para realizar las mediciones necesarias durante el proceso de experimentación.

4.1.3 Estudio de estabilidad del equipo de impresión

El objetivo primario de llevar acabo este estudio de estabilidad consistió en determinar si el proceso de Impresión de pasta de soldadura se encontraba en un estado de control estadístico. Lo que se intenta validar es que el proceso se encuentre libre de los efectos de cualquier fuente de variación especial que ocasione que el proceso salga de control de forma recurrente.

La importancia de verificar y validar que el proceso se encuentra dentro de control estadístico, radica en que las mejoras obtenidas en el proceso de optimización podrán ser sostenidas en el tiempo y no estarán sujetas a fuentes especiales de variación.

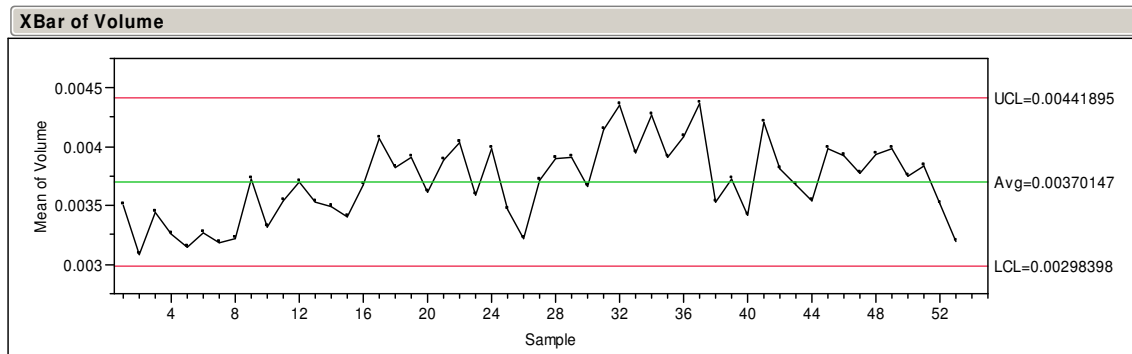
El procedimiento seguido para efectuar el presente estudio es como se describe a continuación:

- Se estableció un plan de muestreo para recopilar la información necesaria para realizar el estudio. El plan se definió de la siguiente manera:

| | |
|--------------------------|---|
| Frecuencia: | <i>Cada 4 h</i> |
| Tamaño de muestra: | <i>12 Lecturas por PCB</i> |
| Selección de la muestra: | <i>3 paquetes individuales por isla en el PCB</i> |
| Periodo de Evaluación: | <i>2 Semanas (14 días); 336 h</i> |

- Las lecturas individuales fueron registradas usando un **JMP®**; junto a las mediciones individuales, se registraron fecha y hora a la que fueron tomadas.
- Se construyó el gráfico $\bar{X} - R$ usando los datos de fecha y hora como factores de agrupamiento de información; cada punto en la gráfica corresponde al cómputo de 12 lecturas individuales registradas con una misma fecha y hora (Ver figura 4.5).

\bar{X} (Volumen de Pasta)



Note: The sigma was calculated using the range.

R (Volumen de Pasta)

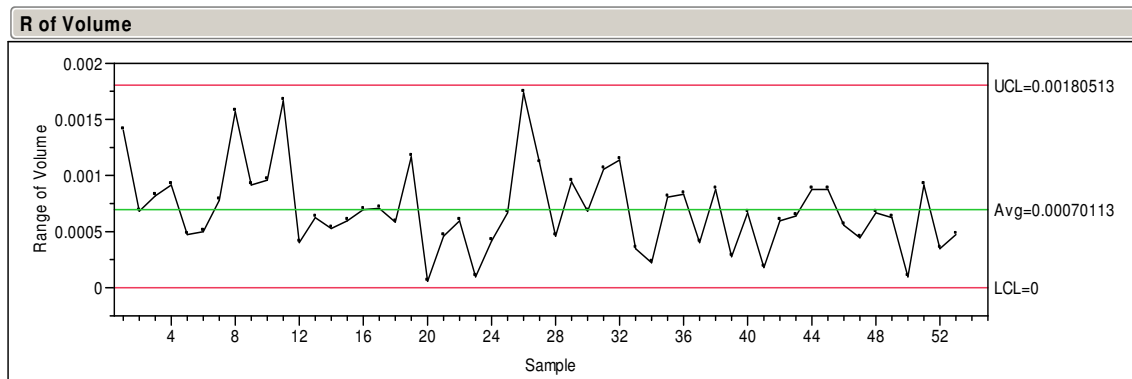


Figura 4.5. Gráfico $\bar{X} - R$ construido para el estudio de estabilidad del equipo de impresión.

Las conclusiones del estudio son:

- El proceso fue encontrado libre de efectos de causas especiales que pudieran ocasionar que este se encuentre fuera de control estadístico de manera recurrente; lo anterior, puede ser verificado fácilmente si observamos que la totalidad de los puntos graficados se encuentran dentro de los límites de control. Nótese que el proceso fue estadísticamente estable a todo lo largo del periodo en el que se realizó el estudio (14 días).
- Es factible concluir que las mejoras producto de algún estudio de optimización posterior puedan ser sostenidas en el tiempo.

4.1.4 Estudio de escrutinio y optimización de variables

El estudio de escrutinio de variables tiene como finalidad la identificación de aquellos factores o variables que son entradas para el modelo del sistema bajo estudio, que tienen realmente un efecto significativo sobre la respuesta o salida del mismo. Los factores que aquí se logren identificar, deben ser considerados para un posterior estudio de optimización.

Son dos las respuestas de interés:

1. El volumen promedio de pasta de soldadura depositado en las tablillas de circuito impreso y
2. La desviación estándar de las mediciones de dichos volúmenes.

El objetivo de los estudios de escrutinio y optimización consiste entonces en identificar los factores significativos, así como los niveles a los que estos deben fijarse, de tal forma que el volumen de pasta de soldadura depositado sea máximo y la desviación estándar de sus lecturas o mediciones sea mínima.

El primer paso para llevar a cabo el estudio de escrutinio consistió del listado y posterior clasificación de las variables experimentales que podrían ser consideradas en esta etapa (ver tabla 4.1). Dichas variables o factores fueron clasificados dentro de tres diferentes categorías:

- a. **Constante.** Es deseable mantener estos factores en un nivel constante ya conocido, lo anterior por motivos económicos, limitantes físicas, limitantes tecnológicos, etc.
- b. **Ruido.** Los factores de este tipo resultan demasiado costosos o difíciles de controlar.
- c. **Experimental.** Estas variables resultan ser candidatos idóneos para la experimentación dado que no existe aún un indicio claro de que estas se encuentren trabajando en niveles óptimos.

Con base a la clasificación anterior de las variables involucradas en el proceso de impresión de pasta, se procedió a la selección final de aquellas que habrían de ser incluidas en este experimento. De igual forma, se identificaron los rangos de operación

(magnitudes y unidades) para cada una de ellas, lo anterior con miras a determinar los niveles de cada variable que debían ser verificados en el experimento diseñado.

Las variables (factores) involucradas, así como los niveles asociados a cada una de ellas se encuentran listados en la tabla 4.2.

Tabla 4.1. Clasificación de variables experimentales.

| Variable | Unidad de Medida | Tipo de Variable |
|--|------------------|------------------|
| Medio Ambiente | | |
| Humedad | % RH | Ruido |
| Temperatura | Grados Celsius | Ruido |
| Parámetros de Equipo | | |
| Distancia de Separación | mils | Constante |
| Fuerza de Impresión | Lbf | Experimental |
| Presión de Pasta de Soldadura | PSI | Experimental |
| Separación | mils | Experimental |
| Velocidad de Impresión | Inch/sec | Experimental |
| Velocidad de Separación | Inch/sec | Experimental |
| Tope bajo de Espátula | mils | Experimental |
| PID – Proporcional-Integral-Derivativo | n/a | Experimental |
| Tipo de Impresión | | Experimental |
| Plantilla | | |
| Tecnología de la Plantilla | n/a | Constante |
| Soldadura | | |
| Tamaño de Partícula de Soldadura | µm | Constante |

Tabla 4.2. Factores y niveles a incluirse en el diseño final del experimento.

| Factores | Código | Unidad de Medida | Niveles de Operación | | Dificultad de Cambio |
|--|--------|------------------|----------------------|-------|----------------------|
| | | | Bajo | Alto | |
| Presión de Pasta de Soldadura | A | PSI | 1.2 | 2.4 | **Difícil** |
| Fuerza de Impresión | B | Lbf | 12 | 16 | Fácil |
| Velocidad de Impresión | C | Inch/sec | 2 | 3.5 | Fácil |
| Velocidad de Separación (Snap Off Speed) | D | Inch/sec | 0.01 | 2 | Fácil |
| Control Proporcional Integral Derivativo (PID) | E | Atributo | 4 | 6 | Fácil |
| Tipo de Impresión (Stroke Type) | F | Atributo | Altern | Mult2 | Fácil |

En cuanto al diseño del experimento, se decidió emplear un diseño del tipo Parcelas Divididas. Lo anterior, dado a que existe un factor experimental cuyos niveles resultan más difíciles de cambiar cuando se comparan con los factores restantes y sus respectivos niveles.

Las parcelas completas (PC) se definieron en base al factor “Presión de Pasta de Soldadura”. Se trabajó con un total de 2 PC uno para cada nivel (alto y bajo) de este factor. Dentro de cada una de estas PC se trabajaron un total de 16 subparcelas. En total, se realizaron un total de 32 corridas, mismas que permitirían que todos los efectos principales e interacciones dobles se encontrasen libres de confusión.

Con miras a la planeación y ejecución del experimento, se hizo uso nuevamente de **JMP®**. De igual forma, el análisis de los datos recopilados durante las corridas experimentales fue también realizado usando este programa.

El siguiente es el listado de las principales consideraciones observadas en el proceso de diseñar y planear la ejecución del experimento:

1. Las parcelas completas se definieron en base al factor “Presión de Pasta de Soldadura”.
2. El diseño se estructuró de manera que todos los factores principales y dobles se encuentren libres de confusión.
3. Se efectuó una sola réplica con el único objetivo de optimizar recursos (tiempo y materiales).
4. Se emplearon dos respuestas: Volumen de pasta depositado y la desviación estándar de estos volúmenes.

El orden y los niveles a los que se verificaron cada una de las corridas del experimento se listan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Matriz de experimentación para el diseño de parcelas divididas.

| Corrida | Parcela | A | B | C | D | E | F | Volumen | "s" |
|---------|---------|-----|----|-----|------|---|--------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1.2 | 12 | 2 | 0.01 | 6 | Mult2 | 0.003785 | 0.000572 |
| 2 | 1 | 1.2 | 12 | 2 | 2 | 6 | Mult2 | 0.005132 | 0.001051 |
| 3 | 1 | 1.2 | 12 | 2 | 0.01 | 4 | Altern | 0.002844 | 0.000608 |
| 4 | 1 | 1.2 | 16 | 2 | 2 | 4 | Mult2 | 0.005168 | 0.001023 |
| 5 | 1 | 1.2 | 16 | 2 | 2 | 6 | Altern | 0.004596 | 0.000634 |
| 6 | 1 | 1.2 | 12 | 3.5 | 2 | 4 | Mult2 | 0.004553 | 0.000995 |
| 7 | 1 | 1.2 | 16 | 3.5 | 2 | 4 | Altern | 0.004412 | 0.000664 |
| 8 | 1 | 1.2 | 16 | 3.5 | 0.01 | 6 | Mult2 | 0.003577 | 0.000576 |
| 9 | 1 | 1.2 | 16 | 3.5 | 0.01 | 4 | Altern | 0.00282 | 0.000522 |
| 10 | 1 | 1.2 | 16 | 2 | 0.01 | 4 | Mult2 | 0.003799 | 0.000574 |
| 11 | 1 | 1.2 | 12 | 3.5 | 2 | 6 | Altern | 0.003726 | 0.000546 |
| 12 | 1 | 1.2 | 16 | 2 | 0.01 | 6 | Altern | 0.003038 | 0.000635 |
| 13 | 1 | 1.2 | 16 | 3.5 | 2 | 6 | Mult2 | 0.004988 | 0.000695 |
| 14 | 1 | 1.2 | 12 | 2 | 2 | 4 | Altern | 0.004199 | 0.000541 |
| 15 | 1 | 1.2 | 12 | 3.5 | 0.01 | 6 | Altern | 0.002527 | 0.000597 |
| 16 | 1 | 1.2 | 12 | 3.5 | 0.01 | 4 | Mult2 | 0.004544 | 0.000784 |
| 17 | 2 | 2.4 | 16 | 3.5 | 2 | 4 | Mult2 | 0.005678 | 0.001038 |
| 18 | 2 | 2.4 | 12 | 2 | 0.01 | 6 | Altern | 0.003101 | 0.0005 |
| 19 | 2 | 2.4 | 12 | 3.5 | 2 | 6 | Mult2 | 0.005133 | 0.001076 |
| 20 | 2 | 2.4 | 16 | 2 | 0.01 | 4 | Altern | 0.003289 | 0.000507 |
| 21 | 2 | 2.4 | 16 | 2 | 0.01 | 6 | Mult2 | 0.0052 | 0.000665 |
| 22 | 2 | 2.4 | 12 | 2 | 2 | 4 | Mult2 | 0.006156 | 0.001431 |
| 23 | 2 | 2.4 | 16 | 3.5 | 2 | 6 | Altern | 0.004582 | 0.00061 |
| 24 | 2 | 2.4 | 12 | 3.5 | 0.01 | 4 | Altern | 0.002927 | 0.000469 |
| 25 | 2 | 2.4 | 12 | 2 | 2 | 6 | Altern | 0.003991 | 0.000702 |
| 26 | 2 | 2.4 | 12 | 2 | 0.01 | 4 | Mult2 | 0.004392 | 0.00087 |
| 27 | 2 | 2.4 | 16 | 3.5 | 0.01 | 6 | Altern | 0.003126 | 0.000563 |
| 28 | 2 | 2.4 | 16 | 2 | 2 | 4 | Altern | 0.004031 | 0.000618 |
| 29 | 2 | 2.4 | 16 | 3.5 | 0.01 | 4 | Mult2 | 0.003804 | 0.000507 |
| 30 | 2 | 2.4 | 16 | 2 | 2 | 6 | Mult2 | 0.005647 | 0.000853 |
| 31 | 2 | 2.4 | 12 | 3.5 | 2 | 4 | Altern | 0.004396 | 0.00056 |
| 32 | 2 | 2.4 | 12 | 3.5 | 0.01 | 6 | Mult2 | 0.003541 | 0.000663 |

Se analizaron ambas respuestas de manera simultánea. El objetivo se planteó de la siguiente manera: maximizar el volumen de pasta de soldadura depositado en las tablillas de circuito impreso y reducir la desviación estándar de este volumen –haciendo más uniforme la impresión a lo largo de las tablillas.

El análisis del diseño nos permitió identificar cuatro de los seis factores incluidos en el diseño como variables críticas para las respuestas de interés.

Tabla 4.4. Análisis del diseño, factores significativos y medidas de ajuste del modelo.

| Términos del Modelo | Valor P < 0.05 | |
|-------------------------------------|----------------|-----------|
| | Volumen | Des. Est. |
| Efectos Principales | | |
| Fuerza de Impresión | | ✓ |
| Velocidad de Separación | ✓ | ✓ |
| PID | | |
| Tipo de Impresión | ✓ | ✓ |
| Interacciones Dobles | | |
| Fuerza T. * Tipo de Impresión | | ✓ |
| V. Separación * Tipo de Impresión | | ✓ |
| PID*Tipo de Impresión | | ✓ |
| Medidas de Ajuste del Modelo | | |
| R ² | 0.88 | 0.83 |
| R ² Ajustada | 0.84 | 0.80 |

La tabla 4.4 resume grosso modo el análisis hecho para el diseño de experimentos usando ambas respuestas de salida. Como se puede observar, el modelo de predicción tiene un muy buen ajuste para cualquiera de las dos repuestas de interés.

Respuesta del DOE: Volumen de Pasta de Soldadura

De acuerdo a la figura 4.6, los dos factores que modifican de manera significativa al volumen de pasta de soldadura que es depositado en los PCBs durante el proceso de impresión son: *Velocidad de Separación* y *Tipo de Impresión*. Estos pueden ser fácilmente identificados como las dos variables que poseen las pendientes positivas más pronunciadas. Estas pendientes positivas indican que a medida que se incrementa el valor de las variables, la respuesta también aumenta o reacciona de forma positiva, es decir, el volumen de pasta de soldadura depositado se incrementa.

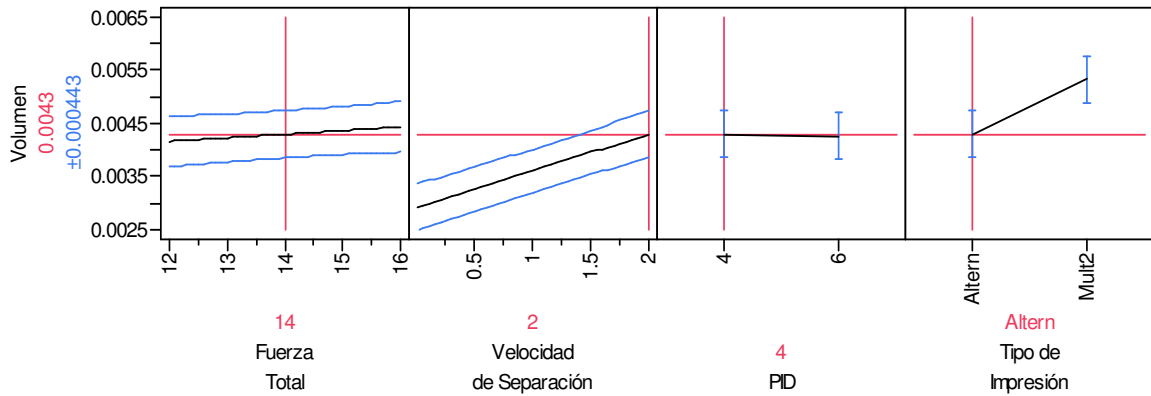


Figura 4.6. Gráfica de efectos promedio para el volumen de pasta de soldadura.

Respuesta del DOE: Desviación Estándar - Volumen de Pasta

En el caso de la segunda respuesta analizada –desviación estándar de las mediciones de volumen de pasta, el factor que posee un efecto significativo es el de *Tipo de Impresión*. Tal y como se observa en la figura 4.7, la pendiente para este factor es muy positiva, lo que indica que un cambio de nivel –bajo a alto- representaría un aumento significativo en la magnitud de la desviación estándar observada.

Dado que los resultados predichos por el modelo construido en base al análisis del diseño son significativamente mejores que los arrojados por el proceso actual, se ha decidido limitar aquí el alcance del presente trabajo de investigación; sin embargo, estos factores podrían ser usados para una experimentación más fina haciendo uso de herramientas de diseño de experimentos más avanzadas.

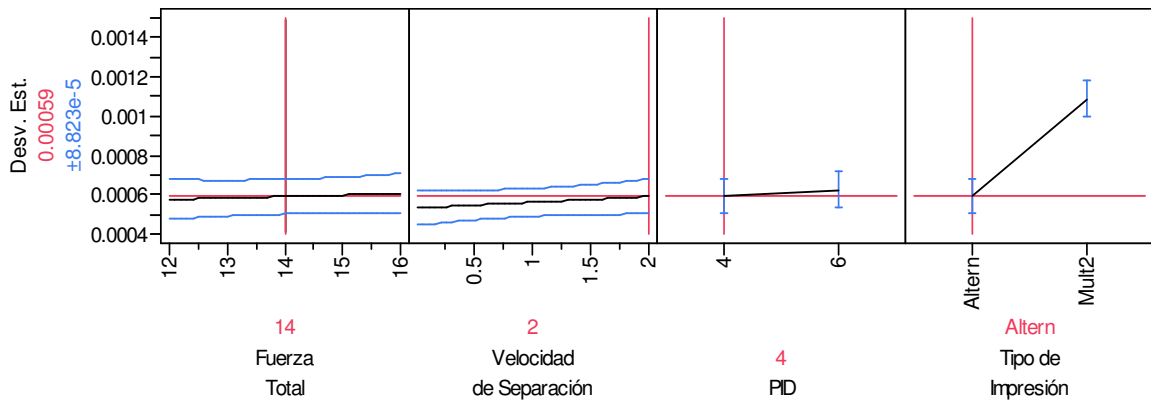


Figura 4.7. Gráfica de efectos promedio para la desviación estándar del volumen de pasta.

4.1.5 Recomendaciones de operación

Habiendo concluido la fase de estudio de escrutinio de variables, los resultados indican con claridad que son 4 las variables que deben controlarse de tal manera que el volumen depositado de pasta de soldadura se maximice y la desviación estándar de las lecturas de estos volúmenes sea mínima, haciendo del proceso de impresión de pasta uno más confiable y estable.

La tabla 4.5 muestra el resumen de los factores y niveles en los cuales deben de ser controlados cada uno de ellos.

4.2 Conclusiones

4.2.1 Corridas de confirmación

Las corridas de confirmación tuvieron como principal objetivo verificar la validez de los resultados obtenidos en el DOE para la optimización del proceso de impresión de pasta de soldadura. Este paso dentro de la metodología resulta fundamental para comprobar la consistencia de los resultados logrados a través del tiempo.

En este caso particular, se decidió monitorear el proceso optimizado –haciendo uso de los resultados del DOE de optimización- por un periodo igual o mayor a 15 días, lo anterior bajo el concepto de una línea modelo o piloto.

| Factores | Unidad de Medida | Nivel de Operación |
|--|------------------|--------------------|
| Fuerza de Impresión | Lbf | 14 |
| Tipo de Impresión (Stroke Type) | Atributo | Altern |
| Velocidad de Separación (Snap Off Speed) | Inch/sec | 2 |
| Control Proporcional Integral Derivativo (PID) | Atributo | 4 |
| | | |

Tabla 4.5. Resumen de las recomendaciones de operación para el proceso de Impresión de pasta.

Fueron dos las herramientas estadísticas que se emplearon para evaluar la validez de los resultados: Gráfica de control estadístico de procesos (Gráfico XS) e índices de capacidad de proceso (CP y CPk).

La contundencia de los resultados obtenidos mediante los estudios anteriores queda de manifiesto en el gráfico anterior. Tal y como se puede observar, el volumen de pasta que estaba siendo depositado en la tablillas de circuito impreso incrementó una vez que las recomendaciones de operación del sistema fueron adoptadas – figura 4.8. De igual manera, la desviación estándar de las mediciones de volumen de pasta disminuyó, lo que significa impresiones más uniformes – figura 4.9.

\bar{X} (Volumen de Pasta)

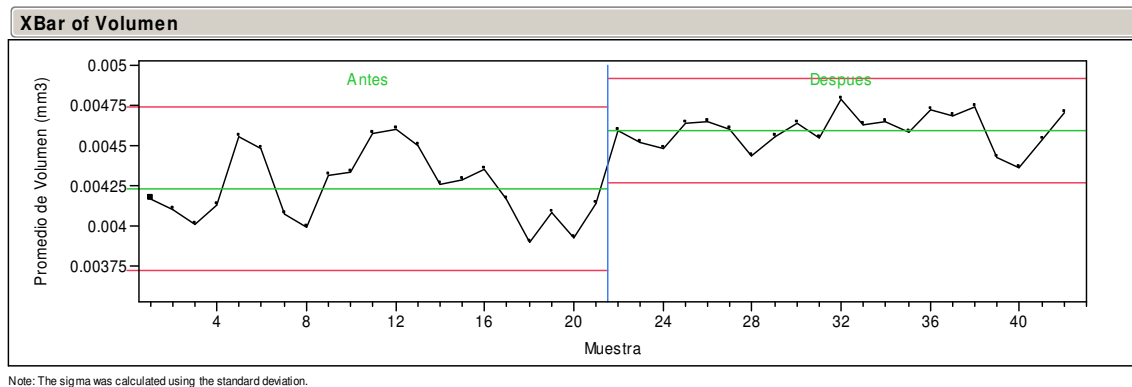


Figura 4.8. Gráfica \bar{X} antes y después de la optimización con DOE.

S (Volumen de Pasta)

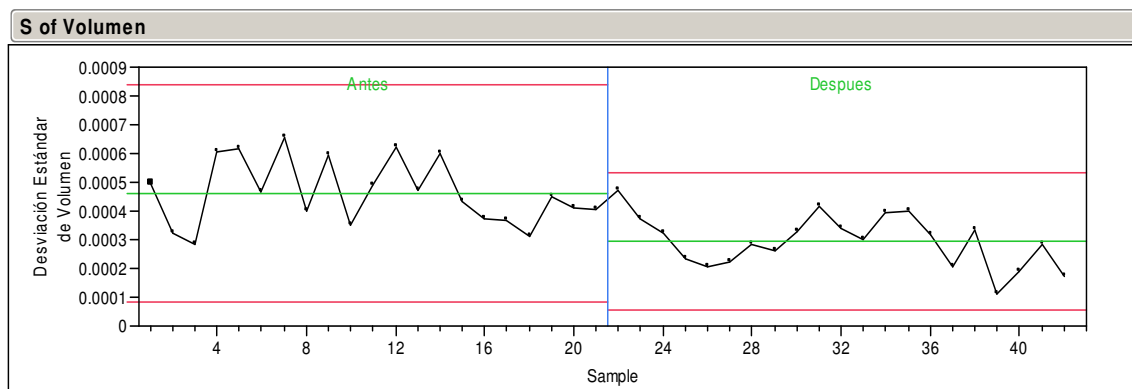


Figura 4.9. Gráfica S antes y después de la optimización con DOE.

Los índices de capacidad de proceso – Cp y CpK – constituyen otro barómetro importante para calificar el impacto del cambio en el proceso de impresión de pasta de soldadura. Tal y como se muestra en la tabla 4.6, el proceso paso de ser uno no capaz (CpK < 1) a uno totalmente capaz (CpK > 1.5).

4.3 Despliegue de los resultados

Una vez que los resultados fueron verificados y comprobados como alcanzables, el siguiente paso lógico es el despliegue de estos. Este paso consiste en la implementación a nivel macro de los resultados obtenidos y posteriormente verificados producto de la experimentación.

4.4 Correlación con defectos de SMT

Desde un principio se planteaba la posibilidad de una reducción de hasta 1,500 PPMs en la tasa de defectos originados en el área de montaje superficial, lo anterior, producto de una disminución significativa de los defectos asociados a la impresión de pasta de soldadura como resultado de la optimización de dicho proceso.

Fue en hasta el mes de Junio que se comenzó con el despliegue de los resultados del diseño de experimentos. Nótese que los PPMs se han reducido cerca de un 70% - ver figura 4.10.

Tabla 4.6. Índices de capacidad del proceso antes y después de DOE.

| Proceso | Cp | CpK |
|---------|-------|-------|
| ANTES | 1.012 | 0.833 |
| DESPUES | 1.629 | 1.526 |

Defectos Relacionados a Proceso de Impresión de Pasta de Soldadura

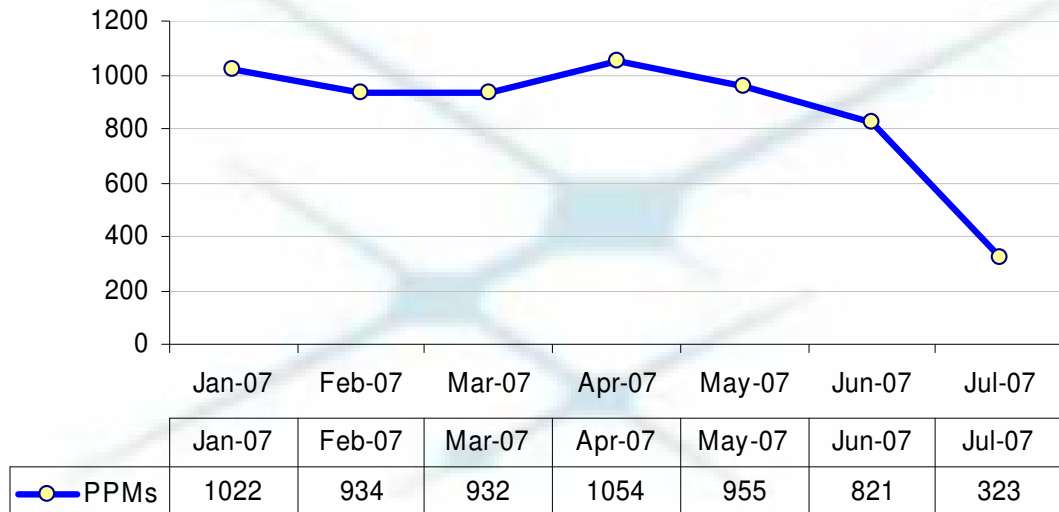


Figura 4.10. Gráfica de tendencia de los defectos relacionados al proceso de impresión de pasta de soldadura

4.5 Conclusiones finales

La hipótesis planteada al inicio de este trabajo ha podido ser verificada de manera positiva. La metodología y la herramienta de diseño de experimentos fueron el método y el instrumento que hicieron posible el análisis detallado del proceso de impresión de pasta, mismo que posteriormente condujo a la identificación de los factores o variables clave para llevar a cabo la tarea de optimización de dicho proceso; entendiéndose por optimización la reducción de la variabilidad.

Por otro lado, resulta también interesante observar algunos otros efectos “colaterales” positivos obtenidos como resultado del despliegue de los resultados derivados del proceso de experimentación:

1. La cantidad de variables de control de proceso es justamente la necesaria; no se incluyen variables de más o de menos. Este hecho puede contribuir a abatir costos en los que la compañía pudiera incurrir para mantener estas variables controladas u observadas.

2. El conocimiento del proceso de manufactura se vuelve más profundo. Este es, a mi parecer, uno de los beneficios más importantes del proceso de experimentación. Gracias a este conocimiento, es posible que los responsables de los procesos puedan atender de manera pronta, oportuna y efectiva problemas futuros que pudieran presentarse en el proceso estudiado.
3. El proceso iterativo de la mejora continua de los procesos se torna cada vez más fino, lo que desde mi punto de vista hace necesario el uso de herramientas de mejora más sofisticadas, más “potentes”. Para el presente problema, el método de superficie de respuesta – Response Surface Method, RSM por sus siglas en inglés- es un ejemplo de una de estas herramientas.
4. Lograr desempeños de calidad en el proceso de manufactura de nivel “clase mundial”. Costos menores de operación, más competitividad y mayor satisfacción de los clientes

La metodología expuesta se presenta como una respuesta eficiente al reto de optimizar el proceso de impresión de pasta de soldadura, y esto, de manera general; es decir, de ninguna forma se establece que los métodos y herramientas que para ese fin se emplearon, sean de aplicación particular al dominio del proceso de impresión de pasta de la empresa en la que se llevaron a cabo los estudios y experimentos, sino que también podrían ser usados para llevar a cabo esta misma tarea de optimización en otros procesos de la misma especie.

Bibliografía

- Belmonte, 2005 Belmonte, Joe, 2005. "**Trends in the Stencil Printing Process**". Revista: *Surface Mount Technology (SMT)* Volume 19, Issue 11, Noviembre 2005.
- Belmonte, et al, 2005 Belmonte, Joe, et al, 2005. "**Step 4: Printing**". Revista: *Surface Mount Technology (SMT)* Volume 19, Issue 4, Abril 2005.
- Bentzen, 2000 Bentzen, B.S, 2000. "Solder paste printing", Reporte Técnico elaborado para SMT In Focus; pp 1-5.
- Bergeron, 1990 Bergeron, Bryan, 1990. "A Surface-Mount Technology Primer – Part1", Revista: *QST*, Diciembre 1990, pp. 48-51.
- Coleman(1), 2001 Coleman, W, 2001. "Stencil Technology and Stencil Design Guidelines for Print Performance", Reporte Técnico elaborado para PhotoStencil, Enero 2001.
- Coleman(2), 2001 Coleman, W, 2001. "Stencil Print Performance Studies", Reporte Técnico elaborado para PhotoStencil, Julio 2001.
- Coleman, 2002 Coleman, W, 2002. "SMT Step by Step, Step 4:Printing", Revista: *SMT Magazine*, Abril 2002.
- Escarcega, 2003 Escarcega, O, 2003. "Comparative study between electroformed stencil vs. laser cut stencil". Reporte Técnico elaborado para Motorola de México S.A.; pp 1-6.
- Hollander, 1987 Hollander, David, 1987. "The Mystique Behind Miniaturization - Surface Mount Technology.", Revista: *QST*, Octubre 1987, pp. 15-18.
- Montgomery, 1991 Montgomery, Douglas C., 1991. "Diseno y Analisis de Experimentos", Grupo Editorial Iberoamerica, pp 1-10.
- MSA, 2002 Automotive Industry Action Group (AIAG), 2002. "Measurement System Analysis; Reference Manual 3rd Edition", AIAG, pp. 3-4.
- N. C. Lee, 2002 N. C. Lee, 2002. "Reflow Soldering Processes and Troubleshooting SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies", Editorial Newness, pp 1-105.
- Pan, 2004 Pan, Jianbiao, et al, 2004. "Critical Variables of Solder Paste Stencil Printing for Micro-BGA and Fine-Pitch QFP", Publicación: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, VOL. 27, NO. 2, APRIL 2004, pp. 125-132.
- SMT In Focus <http://www.smtinfocus.com/dictionary.html>, Nov 01, 2005.