



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Unidad Zacatenco

Departamento de Computación

**Sistema automático de inspección de deformaciones
residuales de PCB usando un sensor láser**

Tesis que presenta

M. en C. Arturo Redondo Galván

para obtener el Grado de

Doctor en Ciencias en Computación

Director de Tesis

Dr. Adriano de Luca Pennacchia

México, D.F.

Enero 2013

Agradecimientos

A mis Padres y hermanos por todo lo que me han dado.

A mi director de tesis el Dr. Adriano de Luca Pennacchia por todo su apoyo.

A los Doctores Sonia G. Mendoza Chapa, Dominique Decouchant, Arnoldo Díaz Ramírez, Amilcar Meneses Viveros y Luis Gerardo de la Fraga por sus valiosos comentarios en la revisión de esta tesis.

A quienes de alguna manera formaron parte de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado a partir de su programa de becas .

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN) por permitirme ser parte de esta institución.

Resumen

Las tarjetas de circuito impreso (PCB) son un medio para proporcionar soporte mecánico e interconexión eléctrica a componentes electrónicos. Éstas son fundamentales en los equipos electrónicos debido a que disminuyen los costos, reducen su peso, facilitan el mantenimiento e inspección y, en general, mejoran su calidad. Por esta razón y debido al rápido desarrollo de componentes, miniaturización y complejidad es necesario realizar una inspección y detección temprana de defectos en las tarjetas. En este documento se presenta el diseño e implementación de un sistema automático de inspección de PCB usando un sensor laser. El sistema fue realizado con la empresa SONY con sede en Tijuana México, a través de un convenio de colaboración, debido a que el equipo de inspección que utilizan actualmente para la detección de defectos en las PCB, con procesamiento de imágenes, no permite hacer una detección 100 % confiable sobre su calidad y es necesario, en muchos casos, realizar una inspección visual posterior. Uno de los defectos importantes en las tarjetas son las deformaciones residuales debidas al proceso de reflujo. El sistema implementado permite detectar este tipo de deformaciones, basado en la medición de la superficie de una PCB. Su aplicación en una etapa inicial puede mejorar y optimizar el proceso de ensamblado, así como detectar regiones de alta concentración de cobre, donde el calor puede deformar principalmente la tarjeta. El diseño está basado en un modelo de arquitectura abierta para máquinas inteligentes, escalable y modular, que permite ser flexible y que pueda implementarse en diferentes sistemas de inspección y controles de movimiento. Este mismo enfoque, puede ser utilizado en otros procesos de control de calidad de la PCB.

Abstract

Printed circuit boards (PCB) are a means to provide mechanical support and electrical interconnection for electronic components. These are essential in electronic equipment due to its lower cost, reduce its weight, easy maintenance and inspection, and generally improve its quality. For these reasons and the fast development of components, miniaturization and complexity is necessary to perform an inspection and early detection of defects on the board. This document presents the design and implementation of an automated PCB inspection system using a laser sensor. The system was made with SONY company at Tijuana Mexico, through a collaboration agreement, because the inspection equipment that currently used for the detection of defects on PCB's, with image processing, not allow detection 100 % reliable on its quality and it is necessary, in many cases, to realize a subsequent visual inspection. One of the major defects on the boards are the residual deformations due to reflow process. The implemented system allows to detect this kind of deformations, based on the measurement of the surface of a PCB. Its application in an early stage can improve and optimize the assembly process as well as detecting regions with high concentrations of copper, where heat can deform mainly the board. The design is based on an open architecture for intelligent machines, scalable and modular, allowing flexibility and can be implemented in different inspection systems and motion control. This same approach can be used for other quality control processes of the PCB.

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
1 Introducción	1
Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Contribuciones	2
1.5 Organización del documento	3
2 Tarjetas de circuito impreso	5
2.1 Ventajas de las PCB	6
2.2 Componentes de una PCB	6
2.3 Clasificación de las PCB	6
2.3.1 De una capa	7
2.3.2 De doble capa	7
2.3.3 Multicapa	8
2.4 Materiales de las PCB	8
2.5 Manufactura de una PCB	10
2.5.1 PCB de una capa	10
2.5.2 PCB de doble capa	11
2.5.3 PCB multicapa	12
2.6 Soldadura	12
2.6.1 Aleaciones de soldadura	13

2.7	Proceso de ensamblado de una PCB	14
2.8	Áreas de inspección en las PCB	14
2.8.1	Inspección de pasta de soldadura	15
2.8.2	Inspección de puesta de componentes	15
2.8.3	Inspección final	15
2.8.4	Inspección de deformaciones residuales	15
3	Sistemas de inspección	19
3.1	Sistemas basados en cámaras (cromáticos)	19
3.2	Sistemas basados en láser (monocromáticos)	20
3.3	Estado del arte	20
3.4	Láser	22
3.4.1	Principio de funcionamiento	22
3.4.2	Tipos de láser	23
3.5	Sensores láser	24
3.5.1	Principio de operación	24
3.5.2	Métodos de medición	24
3.5.3	Especificaciones del sensor láser ZS-LD50 de OMRON	25
4	Diseño del sistema de inspección de deformaciones	29
4.1	Modelo teórico de máquinas inteligentes	29
4.2	Arquitectura general del sistema	31
4.3	Control de movimiento	32
4.4	Interfaz entre la PC y la tarjeta de control de movimiento	36
5	Resultados	41
5.1	Estrategias de inspección	41
5.2	Impacto económico	43
5.3	Resultados experimentales	44
6	Conclusiones y trabajo futuro	49
6.1	Conclusiones	49
6.2	Trabajo futuro	50
	Referencias	51

Índice de figuras

2.1	Tarjeta de circuito impreso.	5
2.2	Tarjeta de circuito impreso de una capa.	7
2.3	Tarjeta de circuito impreso de doble capa.	7
2.4	Corte transversal de una tarjeta multicapa con cuatro capas.	8
2.5	Ejemplo de cómo una deformación térmica de un componente SMD, con terminales debajo del encapsulado, puede afectar su conexión.	16
2.6	Ejemplo de cómo una deformación térmica total y una local de la PCB puede evitar que un componente SMD tenga contacto.	17
3.1	Escáner láser.	21
3.2	Operación de un sensor láser.	25
3.3	Métodos de medición por reflexión difusa y regular.	26
3.4	Sensor láser serie ZS inspeccionando una PCB.	26
3.5	Sensor láser serie ZG.	27
4.1	Modelo de máquinas inteligentes propuesto por Albus [1].	30
4.2	Diagrama a bloques del sistema de control de movimiento.	31
4.3	Vista de la tarjeta del sistema de control de movimiento.	32
4.4	Topología de conexión en cadena tipo Daisy entre las tarjetas de control de movimiento.	33
4.5	Diagrama esquemático de la tarjeta de control de movimiento.	34
4.6	Diagrama de flujo del control de movimiento.	35
4.7	Perfil de velocidad	35
4.8	Gráficas de la generación de pulsos para un perfil de velocidad y su posición.	37
4.9	Módulos de la interfaz entre la PC y el control de movimiento.	38
4.10	Interfaz de usuario para el control de movimiento de dos ejes.	39
5.1	Prototipo del sistema automático de detección de deformaciones.	42

5.2	Diferentes estrategias de inspección. (a) Inspección total usando un sensor láser de punto, (b) Inspección total usando un sensor laser de segmento, (c) Inspección de un área usando un sensor láser de punto y (d) Inspección de un área usando un sensor laser de segmento.	43
5.3	Regiones de prueba seleccionadas. (a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.	45
5.4	Alturas de la región 1 de la tarjeta de referencia.	46
5.5	Alturas de la región 1 de la tarjeta que paso por el proceso de calentamiento.	46
5.6	Curvas normalizadas representando diferentes alturas de las regiones seleccionadas. (a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.	47
5.7	Deformaciones de las regiones de prueba seleccionadas. a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.	48

Índice de tablas

3.1	Especificaciones del sensor láser ZS-LD50 de OMRON.	26
4.1	Especificaciones del control de movimiento.	31
4.2	Descripción de la trama usada para la comunicación entre la PC y la tarjeta de control de movimiento.	33
5.1	Resultados de la inspección de una tarjeta de 200×250 <i>mm</i> usando un sensor láser de punto.	44
5.2	Resultados de la inspección de una tarjeta de 200×250 <i>mm</i> usando tres sensores láser de segmento de 70 <i>mm</i>	44
5.3	Resumen del procesamiento de las mediciones de las tres regiones analizadas.	47

Capítulo 1

Introducción

Actualmente las empresas relacionadas con la manufactura de productos electrónicos, saben de la importancia de la producción de artículos a un costo competitivo, cumpliendo con las políticas de calidad y la satisfacción de los clientes. La inspección y detección temprana de defectos de las PCB's, durante el proceso de ensamblado de componentes de tecnología de montaje superficial (SMT), es un requerimiento para asegurar la calidad de los productos electrónicos, así como para reducir costo de manufactura, correcciones y desperdicio [2, 4, 32]. Esta inspección, debido al rápido desarrollo de componentes, miniaturización, complejidad y velocidad de las etapas de manufactura y ensamblado de las PCB's, debe utilizar técnicas más efectivas y automatizadas.

Los defectos de las PCB son tradicionalmente inspeccionados por operadores humanos y sistemas de visión artificial; sin embargo, la complejidad intrínseca y las desventajas de las personas, puede conducir a procesos lentos, costosos y errados. Las técnicas de inspección ópticas, han sido ampliamente adoptadas en la industria para la detección de defectos. Estas técnicas incluyen el sensado a través de visión, sensores láser, imágenes de rayos X, entre otras.

Los sistemas de procesamiento de imágenes, que son los más utilizados, no garantizan un 100 % de efectividad, por lo que requieren etapas adicionales con operadores humanos. Además, estos sistemas dependen de las condiciones de luz, cambios en los materiales, complejidad de las tarjetas y son costosos computacionalmente. Los sistemas basados en mediciones reales, como el láser, permiten detecciones más precisas y por ende reducción en costos, correcciones y desperdicios, lo que garantiza una mayor calidad en el proceso.

1.1. Planteamiento del problema

El proceso de ensamblado de una PCB consta de varios pasos de producción como son: manufactura, colocación de soldadura y de componentes, reflujo y prueba de la tarjeta. En el proceso de reflujo, la PCB es calentada hasta poco más de $235^{\circ}C$ [20], este calentamiento puede crear tensiones entre los dispositivos de montaje superficial

(SMD) y la tarjeta. También, debido a la alta concentración de cobre en algunas áreas, se pueden crear deformaciones residuales sobre la superficie de la PCB, a causa de la diferencia del coeficiente de expansión térmica, entre el cobre y el sustrato.

Los problemas antes mencionados pueden reducir el tiempo de vida de las tarjetas por lo que es de suma importancia conocer su comportamiento durante el proceso de reflujo. SONY-Tijuana, entre otras empresas, realiza una detección de deformaciones residuales de ciertas tarjetas, seleccionadas al azar de los diferentes lotes, por medio de procesamiento de imágenes, lo que de acuerdo a su experiencia no le permite obtener una detección 100 % confiable sobre la calidad de las mismas.

1.2. Motivación

La motivación para el desarrollo de este proyecto es aportar una solución a un problema real, así como fortalecer la relación con la industria. Implementar un sistema de inspección de deformaciones residuales implica la solución de varios retos de investigación como son: el diseño de un sistema de control de movimiento, la adquisición de datos por medio de un sensor láser y la sincronización del control de movimiento con la adquisición de datos escaneados.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo, es diseñar un sistema automatizado de detección de deformaciones residuales usando un sensor laser. El propósito es que, previo al proceso de ensamblado, la tarjeta sea sometida a las mismas temperaturas que será expuesta en la etapa de reflujo con la finalidad de evaluar su comportamiento. Por lo tanto, el sistema debe detectar desigualdades, globales y locales, en una PCB, producidas por deformaciones térmicas residuales.

1.4. Contribuciones

Las principales contribuciones de este trabajo de tesis se listan a continuación:

- Un sistema automático de inspección de las PCB que detecta deformaciones residuales globales y locales, por medio de un sensor láser, resultantes de la fase de reflujo durante el proceso de ensamblado.
- Un método de inspección más confiable debido a que es menos sensible a las condiciones de luz, reflexiones, cambio en los materiales, complejidad de la tarjeta, entre otras.

- Un sistema de control de movimiento modular y escalable que puede implementarse en diferentes sistemas de inspección.
- Una herramienta efectiva para asegurar la calidad de las PCB, lo que permite reducir reducir costos y asegurar un mayor tiempo de vida de los equipos.
- Esta tesis también permite fortalecer la relación con la industria, lo cual es una parte importante en la formación de los estudiantes.

1.5. Organización del documento

La tesis consta de 6 capítulos. El resto de los capítulos están organizado como se describe a continuación.

En el capítulo 2 analizamos las características de las tarjetas de circuito impreso y su proceso de manufactura y ensamblado, se definen a las PCB's, se enumeran sus ventajas, se hace una clasificación y análisis de los diferentes tipos, se describen los materiales utilizados en su construcción, se mencionan las aleaciones de soldadura y sus características y, por último, se especifican los defectos que se pueden encontrar en cada etapa de dicho proceso.

En el capítulo 3 son tratados los sistemas basados en cámaras, los sistemas basados en láser y se realiza un breve análisis del estado del arte. También, una vez analizados los sistemas antes mencionados, se presenta el sensor láser utilizado, su principio de operación, el método de medición y las características generales del sensor.

En el capítulo 4, se muestra la arquitectura general del sistema y el desarrollo de cada uno de los bloques que la componen. Se presenta el modelo teórico de máquinas inteligentes, el diseño del control de movimiento y la interfaz de usuario.

En el capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas a las tarjetas y las estrategias de medición.

Finalmente, en el capítulo 6, son presentadas las conclusiones y el trabajo futuro.

Capítulo 2

Tarjetas de circuito impreso

Los equipos electrónicos son una combinación de componentes eléctricos y electrónicos conectados para realizar ciertas funciones. Éstos en su gran mayoría cuentan con al menos una tarjeta de circuito impreso debido a las grandes ventajas que les ofrecen. Las PCB proporcionan soporte mecánico e interconexión eléctrica para los dispositivos electrónicos tal como los dispositivos de montaje superficial (SMD), dispositivos convencionales (*through hole*), conectores, entre otros. La conexión de los componentes se realiza a través de pistas de material conductor, grabadas en hojas de cobre laminadas sobre el sustrato. Las tarjetas están compuestas de una o más capas de metal pegadas dentro de un sustrato aislante, el cual es fabricado de resina térmica de fibra de vidrio [15]. En la figura 2.1 se muestra una de las caras de la PCB, en ésta se pueden observar las pistas conductoras y los puntos de contacto (*pads*) de los componentes SMD.

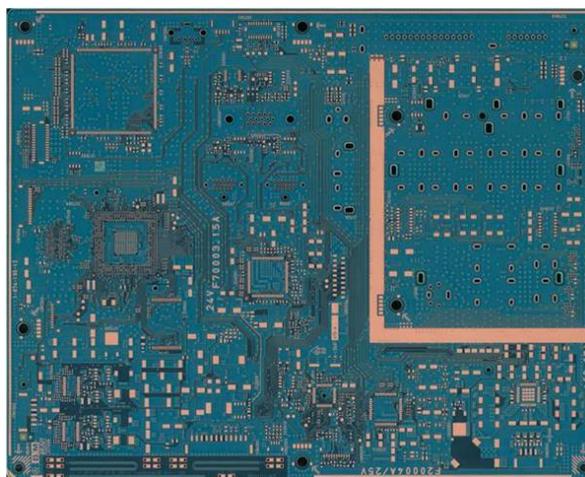


Figura 2.1: Tarjeta de circuito impreso.

2.1. Ventajas de las PCB

Hay varias razones para utilizar las tarjetas de circuito impreso, algunas de éstas se enumeran a continuación:

1. El tamaño de los componentes ensamblados se reduce decrementando el peso de los equipos.
2. La producción es de mejor calidad a costos bajos.
3. El ensamblado y conexión de los componentes puede ser mecanizado.
4. Las características eléctricas de los circuitos se mantienen entre las tarjetas.
5. Se facilita la identificación y mantenimiento puesto que los componentes están fijos.
6. El tiempo de inspección es menor debido a que puede ser automatizado y con menor probabilidad de error.
7. El personal de ensamblado requiere conocimientos y capacitación mínimos.

2.2. Componentes de una PCB

Los componentes esenciales de una tarjeta de circuito impreso son:

- **Base:** es una tarjeta delgada de material aislante, rígida o flexible, la cual proporciona soporte mecánico a las pistas y a los componentes fijados al cobre. Las propiedades dieléctricas del material utilizado en su fabricación deben ser conocidas y controladas apropiadamente puesto que de éstas dependen las propiedades eléctricas del circuito.
- **Conductores:** son pistas muy delgadas, normalmente de cobre y pegadas firmemente a la base, que conectan eléctricamente a los componentes y los mantienen fijos por medio de puntos de soldadura.

2.3. Clasificación de las PCB

Las PCB son clasificadas de acuerdo a la cantidad de capas con pistas conductoras con las que cuentan. Éstas pueden ser de una capa, de doble capa o multicapa.

2.3.1. De una capa

Las tarjetas de una capa son el tipo más elemental de PCB y son ampliamente usadas en circuitos sencillos. Éstas tienen las pistas conductoras de un solo lado del sustrato, por lo que todos los componentes SMD se sueldan sobre esa misma superficie. En el caso de los componentes convencionales, éstos son colocados sobre la cara opuesta a las pistas y se sueldan sobre los *pads* del lado contrario. La figura 2.2 muestra el montaje de un componente convencional en una tarjeta de una capa.

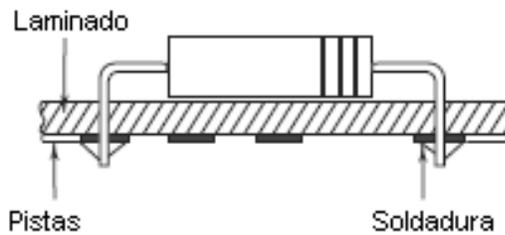


Figura 2.2: Tarjeta de circuito impreso de una capa.

2.3.2. De doble capa

En este tipo las pistas se encuentran sobre ambas superficies de la tarjeta. Éstas pueden ser consideradas como dos tarjetas de una capa unidas por el lado opuesto a sus pistas. Los componentes, tanto SMD como convencionales, pueden ser colocados por ambos lados, lo que aumenta su densidad significativamente. En la figura 2.3 se aprecian las pistas conductoras sobre ambas superficies de la PCB. Las pistas, de las dos caras, pueden ser conectadas a través de las terminales de los componentes convencionales (ver figura 2.3 a) o por medio de vías metalizadas (ver figura 2.3 b).

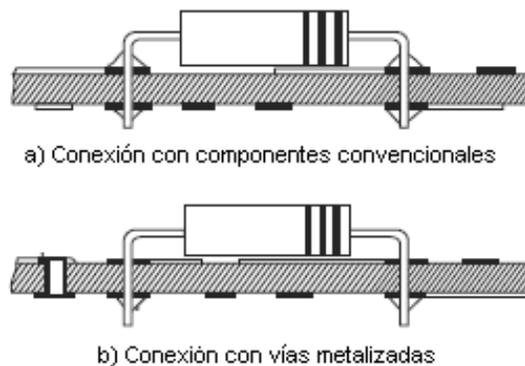


Figura 2.3: Tarjeta de circuito impreso de doble capa.

2.3.3. Multicapa

Las tarjetas multicapa son el tipo más complejo de PCB. Éstas son una extensión de las tarjetas de doble capa puesto que cuentan con pistas sobre ambas caras, pero además tienen una o varias capas de pistas internas como se muestra en la figura 2.4. Las pistas internadas están superpuestas una sobre otra, separadas por capas de fibra de vidrio impregnadas de resina (prepreg) y estableciendo un conjunto predeterminado de interconexiones entre ellas. Estas interconexiones son realizadas por medio de vías metalizadas (*plated through-hole*, PTH), vías enterradas (*buried via*) o de vías ciegas (*blind vias*).

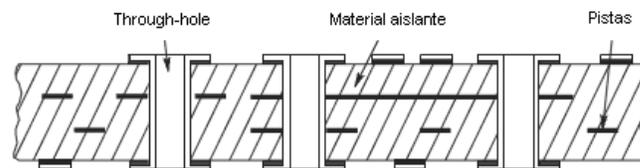


Figura 2.4: Corte transversal de una tarjeta multicapa con cuatro capas.

Las vías metalizadas convencionales son la técnica de interconexión más común y menos cara. Esta técnica consiste en hacer perforaciones metalizadas que conectan ambas caras de la tarjeta y las pistas internas con las que tienen contacto, independientemente del número de capas. Las vías enterradas se utilizan para conectar dos o más capas de pistas internas de la tarjeta, es decir, este tipo de conexión no es visible en la superficie de la misma. Finalmente, las vías ciegas son usadas para realizar conexiones entre las capas internas con una de las capas exteriores de la tarjeta.

2.4. Materiales de las PCB

En una PCB las pistas conductoras son típicamente hechas de cobre mientras que los sustratos pueden ser elaborados de diferentes materiales. Los materiales comúnmente utilizados en las PCB son los siguientes:

- **Pértinax:** este tipo de tarjeta se hace de papel impregnado de resina fenólica o Pertinax. El material es de bajo costo, fácil de manejar y ocasiona un menor desgaste en las herramientas de manipulación que los sustratos de fibra de vidrio reforzados. Se utiliza en la fabricación de PCB para la electrónica de consumo de bajo costo.
- **Fibra de Vidrio:** estas PCB son hechas de fibra de vidrio impregnadas con una resina epóxica. Este tipo de tarjetas son de las más utilizadas ya que ofrecen

buena resistencia mecánica y aislamiento. Los materiales más conocidos son FR-2, FR-3, FR-4, FR-5, FR-6, FR-8, G-10, CEM-1, CEM-2, CEM-3, CM-4 y CEM-5. En la actualidad el material más utilizado es el FR-4. FR significa resistente a las llamas (*Flame Resistance*) y el 4 indica fibra de vidrio reforzada con resina epóxica. Debido al reforzamiento de la fibra de vidrio requiere de herramientas hechas de carburo de tungsteno y, a la vez, exhibe una resistencia a la flexión y a las trizaduras, de alrededor de 5 veces más alta que el Pertinax.

- **Sustratos para Radiofrecuencia:** estos sustratos usan plásticos con una baja constante dieléctrica, tales como Rogers[®] 4000, Rogers[®] Duroid, DuPont[®] Teflón[®] (tipos GT y GX), poliamida, poliestireno y poliestireno entrecruzado. Típicamente tienen propiedades mecánicas más pobres, pero se considera que es un compromiso de ingeniería aceptable, en vista de su desempeño eléctrico superior.
- **Sustratos Flexibles:** este tipo de sustrato es ligero y con una alta flexibilidad. Los materiales utilizados son DuPont's[®], Kapton[®] film de poliamida, entre otros. Su aplicación es en equipos con espacios limitados.

En general, la elección adecuada del sustrato depende de la calidad final requerida así como del tipo de aplicación que vaya a darse a la PCB. Otro aspecto muy importante a considerar es el coeficiente de expansión térmica. Las características básicas que debe tener el sustrato son:

- Suficiente rigidez para mantener los componentes.
- Fácil de taladrar.
- Sin problemas de laminado.
- Retardante de las llamas.
- No absorber demasiada humedad.
- Disipar bien el calor.
- Coeficiente de expansión térmica bajo.
- Capaz de soportar diferentes ciclos de temperatura.
- Constante dieléctrica baja.
- Punto de ruptura dieléctrico alto.

2.5. Manufactura de una PCB

En la actualidad existen varios procesos para manufacturar una PCB. Sin embargo, muchos de estos procesos tienen pasos básicos similares.

El proceso más popular es el método de impresión y grabado (*print and etch*), el cual es una técnica sustractiva únicamente. En este procedimiento, el material base es una lámina con recubrimiento de cobre sobre la que todos los componentes se sueldan, con una o más capas de pistas conductoras.

2.5.1. PCB de una capa

Los pasos para el proceso de diseño y fabricación de una PCB de una cara son los siguientes:

1. **Diagrama esquemático:** el diagrama esquemático o diagrama lógico es la representación gráfica de los componentes electrónicos y conexiones entre los mismos. Éste se desarrolla considerando las especificaciones de los componentes, sus conexiones, empaquetado y distribución de terminales. El diagrama se inicia en papel y se finaliza utilizando las herramientas CAD (Diseño Asistido por Computadora). Incluye toda la información esencial para entender la operación del circuito, por lo que es el documento principal para el diseño.
2. **Diseño:** este paso incluye la ubicación óptima de los componentes en la tarjeta y el ruteo de las pistas que los conectan. También es considerado el tamaño final que se desea de la tarjeta y su manufacturabilidad.
3. **Preparación del panel:** la materia prima utilizada en la manufactura de una PCB es una lámina con recubrimiento de cobre en una de sus caras y, como material base, la fibra de vidrio debido a sus propiedades eléctricas y mecánicas. En esta etapa la tarjeta es cortada al tamaño requerido y limpiada de impurezas y de óxido sobre la superficie del cobre.
4. **Transferencia de imagen:** esta fase del proceso consiste en transferir el patrón de diseño de las pistas a la superficie del cobre de la tarjeta. Lo anterior se realiza con la finalidad de que todas las áreas conductoras queden cubiertas por un protector para la fase de grabado.
5. **Grabado:** el proceso de grabado está basada en el método sustractivo, el cual consiste en remover el cobre de las áreas indeseables para obtener las pistas esperadas del circuito. Algunos de los métodos utilizados son: inmersión, espray, chorro o burbuja. Estos métodos utilizan el cloruro férrico, persulfato de amonio, ácido crómico, cloruro cúprico y amoniaco alcalino, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas. En particular el cloruro férrico, que es de los más antiguos, oxida

el cobre de las áreas que no están protegidas, pero es corrosivo y no puede ser regenerado.

6. **Perforación:** consiste en realizar las perforaciones de la tarjeta. En la producción masiva se utilizan máquinas de control numérico con varias cabezas. Las cabezas usadas para fibra de vidrio son de carburo de tungsteno o diamante.
7. **Recubrimiento:** el material comúnmente utilizado para las pistas conductoras de las PCB es el cobre. Su selección se debe principalmente a sus propiedades como conductor de electricidad y calor. Sin embargo, este conductor rápidamente se oxida en presencia de aire y agua por lo que lo debe ser cubierto. Este paso consiste precisamente en cubrir las pistas y los puntos de contacto con un protector para que los componentes se suelden posteriormente sin ningún problema.
8. **Pruebas:** debido al incremento en la complejidad del proceso de manufactura de las PCB es mayor la necesidad de verificarlas una vez finalizado dicho proceso. Esta verificación permite evitar fallas en etapas posteriores donde su costo de reparación se incrementa considerablemente, principalmente en tarjetas multicapa. En [30] que la tasa de fallas en el proceso de manufactura puede ser tan alto como el 20 %. Dentro de las pruebas que deben ser realizadas está la detección de cortocircuitos y de continuidad, así como el análisis de defectos de manufactura y funcionalidad.

2.5.2. PCB de doble capa

El proceso para producir una tarjeta de doble capa es más complejo que el método de impresión y grabado usado para las de una capa. Las variaciones existentes entre los dos tipos de tarjetas se explican en los pasos siguientes:

- **Preparación del panel:** las láminas con revestimiento de cobre son cortadas de acuerdo a los requerimientos. El tamaño de la tarjeta depende de la complejidad del circuito.
- **Perforado:** las tarjetas de doble cara son primero perforadas y en seguida limpiadas con la finalidad de remover trozos de fibra de vidrio y resina. La limpieza se realiza con agua a alta presión.
- **Recubrimiento de las perforaciones:** la tarjeta es primero sensibilizada sumergiéndola en una solución de cloruro de estaño. Los iones de estaño se impregnan en la superficie de la tarjeta, particularmente sobre la resina expuesta de las paredes de los orificios. Ésto es seguido por la inmersión de la tarjeta en una solución ácida de cloruro de paladio. Los iones de paladio se reducen a un estado coloidal y forman una capa delgada la cual deposita cobre.

- **Transferencia de imagen:** ambos lados de la tarjeta son cubiertos con una pequeña capa fotosensible, sólida o líquida y positiva o negativa. El proceso de transferencia de imagen ocurre con la eliminación de la capa de las pistas. Este es el proceso inverso de impresión y grabado. Las áreas de cobre que serán conservadas al final del proceso de manufactura quedan sin protección y el resto de las áreas cubiertas por la capa fotosensible.
- **Recubrimiento estaño-plomo:** las áreas conductoras expuestas son cubiertas con una aleación de estaño-plomo. Este recubrimiento les sirve como protección en el proceso de grabado.
- **Grabado:** el proceso de grabado es similar al descrito previamente excepto que la solución empleada no ataca la aleación de estaño-plomo.

2.5.3. PCB multicapa

El método más ampliamente usado para el proceso de manufactura de tarjetas multicapa es por laminado. Esto es, las tarjetas multicapa se producen uniendo capas internas y externas con prepreg. Las capas individuales, las cuales pueden ser hasta 50, son ordenadas en una herramienta de presión para prevenir desalineamientos. La pila de capas es laminada para formar una tarjeta en una prensa hidráulica o autoclave. Después del laminado, el proceso de manufactura subsecuente es similar al de las tarjetas de doble capa.

2.6. Soldadura

La soldadura es el proceso mediante el cual una aleación es fundida para unir dos piezas de metal. Esta unión o conexión entre los metales asegura la continuidad entre los mismos. En el proceso de soldadura hay un número importante de variables que necesitan ser controladas para asegurar un resultado adecuado. Este proceso puede ser clasificado como soldadura blanda, la cual tiene un punto de fusión inferior a los $450^{\circ}C$, o soldadura fuerte, que tienen un punto de fusión mayor a los $450^{\circ}C$. En ambos tipos la aleación utilizada se distribuye por acción capilar entre las superficies de los metales a unir. La soldadura blanda está muy asociada a uniones mecánicas que no están sometidas a esfuerzos ni temperaturas elevadas y a empalmes electrónicos. En este apartado nos enfocaremos a éste tipo, puesto que es la utilizada en el proceso de ensamblado de una PCB.

2.6.1. Aleaciones de soldadura

Las aleaciones son un producto homogéneo compuesto de un material base y la adición de al menos otro elemento con el fin de mejorar sus propiedades en el aspecto deseado. El estaño (Sn) es uno de los principales elementos usados en estas aleaciones. Ésto porque una vez fundido tiene la capacidad de disolver casi cualquier otro metal. La aleación estaño y plomo (Pb) es una de las más utilizadas en la industria de la electrónica. Ésta algunas veces puede contener cantidades variables de antimonio, bismuto, plata o cadmio. Algunas de las aleaciones utilizadas en el proceso de ensamblado de una PCB y sus características son analizadas a continuación.

- **Estaño-Plomo:** el estaño y el plomo son dos metales fáciles de trabajar puesto que ambos son suaves y flexibles. El estaño puro tiene un punto de fusión de $232^{\circ}C$ ($449^{\circ}F$), mientras que el del plomo puro es de $327^{\circ}C$ ($621^{\circ}F$). Sin embargo, cuando el estaño es combinado con el plomo en una razón de 63% y 37%, respectivamente, el punto de fusión resultante es menor que el de cada uno de ellos. A este tipo de aleación, usualmente escrita como Sn73Pb37, se le conoce como composición eutéctica ya que su temperatura de fusión es de $183^{\circ}C$ ($361^{\circ}F$), es decir menor a la individual. A esta temperatura, la aleación va de un estado sólido a uno líquido, lo cual la hace atractiva para su uso en PCB puesto que algunos materiales, por ejemplo FR-4 o similares, pueden ser procesados de manera segura. Otro de los beneficios es su bajo costo comparado con otras aleaciones.
- **Estaño-Bismuto-Plomo:** la adición de bismuto (Bi) a la aleación estaño-plomo reduce la temperatura de fusión significativamente, lo cual disminuye los problemas de reflujo. Una aleación típica es Sn43/Bi14/Pb43, la cual pasa a un estado líquido hasta que alcanza los $163^{\circ}C$ ($325^{\circ}F$).
- **Estaño-Plomo-Plata:** una aleación popular de plata es estaño-plata, Sn96Ag04, la cual tiene un punto de fusión de $221^{\circ}C$ ($430^{\circ}F$). Ésta es usada algunas veces para tarjetas de doble capa.
- **Soldadura libre de Plomo:** uno de los tópicos más discutidos a principios de los 90's fue el eliminar el plomo de la soldadura. Una de las familias de aleaciones más usadas es la de estaño-plata con algunas variaciones incorporando bismuto. Estas aleaciones tienen un costo similar a Sn63Pb37 pero una temperatura de fusión de $221^{\circ}C$ lo que significa que las PCB y los componentes electrónicos deben ser expuestos a temperaturas de hasta $240^{\circ}C$ para una soldadura efectiva. Otra aleación considerada es Sn91.8/Ag3.4/Bi4.8 la cual tiene un punto de fusión entre un rango $208^{\circ}C$ a $215^{\circ}C$.

2.7. Proceso de ensamblado de una PCB

En los años recientes, la tecnología de montaje superficial (SMT) se ha hecho muy popular debido a que permite una densidad de componentes mucho mayor (son más pequeños que los componentes convencionales), su costo es menor y puedan ser montados sobre ambos lados de las tarjetas. Una PCB terminada, donde los componentes utilizados son de montaje superficial, debe pasar por un proceso de ensamblado, el cual involucra diferentes pasos [18, 19], éstos se describen a continuación:

1. Manufactura de una PCB. Esta fase involucra varias actividades como son el diseño, eliminación del cobre, laminado, estañado, entre otras.
2. La pasta de soldar es aplicada sobre los *pads* de la PCB. Para ésto es usada una mascarilla perforada sobre cada uno de ellos, de tal manera que se pueda tener un control adicional sobre la aplicación de la soldadura.
3. Los componentes electrónicos son colocados sobre la PCB usando sistemas robóticos. Las terminales de los componentes son colocados en contacto directo con la pasta de soldadura previamente puesta sobre los *pads*.
4. La soldadura es calentada hasta su estado líquido (reflujo), para posteriormente dejar enfriar hasta que se endurece y cree interconexiones permanentes entre las terminales de los componentes y los *pads* de la PCB.
5. Una vez que se sueldan los componentes, la tarjeta es limpiada, probada y ensamblada en un producto final.

Durante el proceso de ensamblado pueden ocurrir diferentes tipos de defectos como son los relacionados con la pasta de soldadura, puesta de componentes y deformaciones residuales. Por esta razón es necesario tener mecanismos de inspección que permitan detectarlos y proporcionar una retroalimentación para corregir las posibles fallas de las etapas de manufactura.

2.8. Áreas de inspección en las PCB

La inspección es cada vez más popular debido a que el tamaño de los componentes continúa reduciéndose, las tarjetas se hacen más pequeñas y con más componentes, las velocidades de cada etapa del proceso de ensamblado son más rápidas y sus tiempos más cortos. Tres de las áreas primarias de inspección de tarjetas con componentes SMT son: inspección de pasta de soldar, inspección de puesta de componentes e inspección final [4, 22, 32]. Otra área también importante, debido a la alta temperatura a la que son sometidas las PCB durante el proceso de reflujo, es la inspección de deformaciones residuales en la tarjeta. Cada una de estas áreas de inspección son descritas a continuación.

2.8.1. Inspección de pasta de soldadura

La miniaturización de las tarjetas para producir pequeños equipos electrónicos, requiere muy pequeños depósitos de pasta de soldadura tales como 200×200 micrómetros [27]. Estos depósitos se hacen por medio de plantillas y un sistema robotizado. La plantilla tiene ciertas perforaciones que corresponden con las terminales de los circuitos impresos donde se sueldan los componentes, mientras que con el robot únicamente se va depositando la soldadura.

El uso de plantillas puede ocasionar que algunas veces la pasta se levante, lo que hace que ésta no quede en el sitio exacto o con el volumen adecuado. En el caso del volumen en [5, 9, 10] se menciona que es un pronóstico importante para determinar la calidad de la uniones entre la soldadura y los componentes.

Por las razones antes mencionadas muchos defectos son atribuidos a esta etapa del proceso de ensamblado [3, 5, 25, 27, 29]. Por lo que la inspección de la puesta de pasta de soldar es un proceso clave en el ensamblado de componentes SMT. El control de esta etapa es vital para asegurar la continuidad, sin problemas, del proceso de manufactura y el control de calidad del producto final [29].

2.8.2. Inspección de puesta de componentes

Después de que el sistema automático robotizado ha puesto la pasta de soldadura. Los componentes son depositados con cierta presión sobre dicha pasta, para que ésta pueda mantenerlos sobre la tarjeta y al mismo tiempo evitar que se deforme y haga contacto con la soldadura vecina. Una vez puestos los componentes (circuitos integrados, resistencias, capacitores, etc.), se inspecciona su colocación para verificar que estén dentro de las tolerancias permitidas. Algunos algoritmos para comprobar el desalineamiento de componentes son mostrados en [6, 16, 24, 26].

2.8.3. Inspección final

El proceso de soldadura de los componentes electrónicos con la tarjeta, se efectúa dentro del horno. La inspección final se realiza después de que la tarjeta ha salido del horno y ésta se ha enfriado. En la inspección final se verifican las deformaciones y la puesta de componentes. Además, se hace una inspección de los circuitos integrados, para asegurar que no hayan sufrido deformaciones que les impidan hacer contacto con la soldadura.

2.8.4. Inspección de deformaciones residuales

Durante el proceso de ensamblado una PCB es sometida a temperaturas de poco más de $235^{\circ}C$ en el proceso de reflujo [20, 31]. Este ciclo térmico crea tensiones y deformaciones en la tarjeta. Cuando un material sufre una expansión térmica bajo un gradiente de temperatura, su deformación puede ser caracterizada por un coeficiente de expansión

térmica volumétrico o lineal. Para un volumen V , su expansión volumétrica puede ser expresado como:

$$\Delta V = V\alpha_V\Delta T \quad (2.1)$$

Donde ΔV es el gradiente de expansión volumétrica debido al cambio de temperatura ΔT , V es el volumen inicial y α_V es el coeficiente de expansión volumétrica. Para el cobre $\alpha_V = 51 \times 10^{-6}C^{-1}$. Por ejemplo, si consideramos una barra de cobre de 5 mm de ancho, 50 mm de largo, 1 mm de espesor y la sometemos a un gradiente térmico de $200^\circ C$, entonces la expansión térmica será de aproximadamente 28 mm^3 . Si este metal está mecánicamente restringido de dos de sus lados y no es posible crecer en esas direcciones, entonces se creará una deformación.

En el caso de las PCB multicapa, donde dos o más materiales están en contacto, si son sometidas a temperaturas altas, la tensión mecánica interna aparecerá debido a sus diferentes coeficientes de expansión térmica. El cobre se expande mucho más que la fibra de vidrio debido a que el coeficiente térmico de esta última es bajo, similar al del vidrio. Si esta deformación es más alta que cierto límite geométrico, algunos de los componentes SMD no harán contacto con los *pads* de la tarjeta, esto puede observarse en la figura 2.5.



Figura 2.5: Ejemplo de cómo una deformación térmica de un componente SMD, con terminales debajo del encapsulado, puede afectar su conexión.

Principalmente hay dos deformaciones a considerar: la deformación total de la tarjeta y la de ciertas áreas. La deformación total se debe a las restricciones mecánicas de sus lados y puede llegar a ser grande en algunas regiones. La deformación por área, es debido a la alta concentración de cobre que crea pequeñas desigualdades sobre la superficie de la PCB. Si un componente electrónico coincide con una desigualdad local y un cambio en la curvatura de la tarjeta, como se muestra en la figura 2.6, entonces las terminales no harán contacto con los *pads*.

La inspección de las zonas potenciales de deformación, permitirá determinar si la PCB cumple con los parámetros de calidad requeridos para ser utilizada.

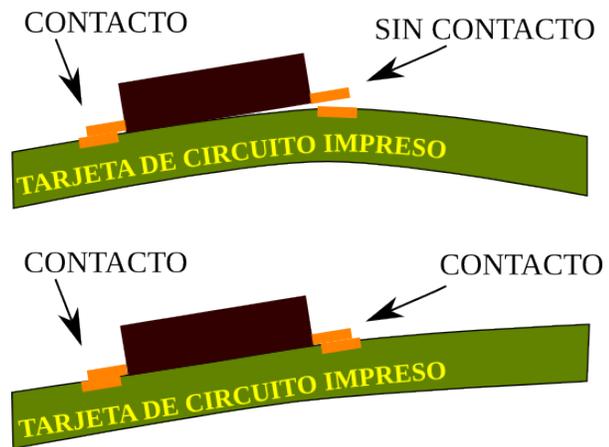


Figura 2.6: Ejemplo de cómo una deformación térmica total y una local de la PCB puede evitar que un componente SMD tenga contacto.

Capítulo 3

Sistemas de inspección

Los sistemas de inspección, en general, deben ayudar a identificar defectos en el proceso de manufactura o ensamblado de las PCB y, por lo tanto, aumentar la calidad de los productos. Por esta razón es importante primero definir y entender las necesidades de dichos procesos [22]. La complejidad de la tarjeta debe tener un alto impacto en la estrategia de selección [28].

Tradicionalmente y por muchos años los operadores humanos fueron empleados para inspeccionar y monitorear los procesos de manufactura y ensamblado de las PCB. Éstas normalmente contienen diseños complejos y muy detallados, por lo que la inspección visual es cansada y sujeta a errores. Además, la inspección manual es lenta, costosa y puede permitir altas tasas de desperdicio, por lo tanto, este sistema no asegura una alta calidad de inspección [23]. En la literatura se reporta que en la industria de semiconductores, la precisión en la inspección por expertos humanos es típicamente del 60 al 80 % [8].

Las técnicas de inspección óptica, han sido ampliamente utilizadas por la industria para la inspección de defectos. Estas técnicas incluyen el sensado usando visión artificial, sensado láser, rayos x, entre otros [28, 7]. Dos de los sistemas de inspección más importantes por los trabajos encontrados en la literatura son: basados en cámaras y basados en láser.

3.1. Sistemas basados en cámaras (cromáticos)

La mayoría de los sistemas de inspección en línea utilizan cámaras CCD (*Coupling Charge Detector*) con imágenes en escala de grises o color [22]. Las cámaras capturan imágenes de la PCB y son analizadas para determinar si hay defectos en cada área. Los sistemas basados en cámaras son rápidos pero dependen de la luminosidad de la luz reflejada de la PCB [32]. Estos sistemas son sensibles a variaciones de las condiciones de luz o cambios en los materiales.

Los sistemas que dependen de cámaras para la captura de imágenes, deben contar con luces programables para permitirle obtener imágenes óptimas de la PCB. Pero si la complejidad de la PCB se incrementa, es decir, se hacen más pequeñas o con un mayor número de componentes, los problemas con contrastes de luz o sombras pueden presentarse. También, al tener imágenes más complejas, el procesamiento es más costoso computacionalmente y por ende el tiempo de inspección se incrementa.

3.2. Sistemas basados en láser (monocromáticos)

Estos sistemas utilizan un escáner láser para crear una representación en 3D de la PCB. Los sistemas proyectan un láser de baja potencia sobre la PCB y miden la posición del haz reflejado usando detectores sensibles a la posición. El láser es movido sobre la superficie de la PCB midiendo las alturas, que son usadas para crear la representación en 3D. Esta imagen está basada en la altura de la superficie de la PCB, soldaduras y de los componentes. Los sistemas láser, por ser una luz monocromática, son menos sensibles a cambios en los colores o reflexiones de la PCB o componentes. También pueden obtener imágenes en escala de grises en 2D, similares a una cámara CCD. La imagen puede ser usada para identificar objetos o pequeños cambios de altura.

En general, los sistemas láser proporcionan medidas precisas de la PCB. Estas medidas son importantes para ayudar a reducir el número de falsas detecciones de defectos y obtener la información necesaria para un proceso de inspección óptimo. La figura 3.1 muestra un escáner láser, el cual se encarga de obtener las medidas de la superficie de la PCB.

3.3. Estado del arte

En esta sección se hace un pequeño análisis sobre los avances en los sistemas de inspección, los tipos, estrategias y algoritmos presentes en la literatura.

Stig Oresjo en [28] hace un estudio de las diferentes estrategias de inspección. Presenta datos de los estudios desarrollados, así como una corta discusión sobre modelos de prueba económicos, los cuales son importantes en la selección de una estrategia de inspección óptima. Algunas de las conclusiones presentadas son la importancia de tener un conocimiento del proceso de manufactura, para saber qué defectos pueden ser introducidos en cada etapa y cómo pueden detectarse inmediatamente. También muestra cuáles de ellos no pueden ser detectados en la etapa que son introducidos. Finalmente, hace referencia a la importancia de la complejidad de la PCB en la selección de la estrategia.

En [21] S. K. Jhonson muestra la importancia de realizar una inspección de la pasta de soldadura y cómo ésta ayuda a evitar futuros defectos. En este artículo se hace un análisis de los tipos de defectos que pueden presentarse con la pasta de soldadura y cómo algunos de éstos sólo pueden ser detectados por medio de una inspección en 3D.



Figura 3.1: Escáner láser.

T. Molamphy y T. Niermeyer [27] mencionan que la inspección de pasta de soldadura es un proceso vital para asegurar la calidad final del producto. Analizan los efectos que pueden tener las variables involucradas en esta etapa del proceso de manufactura. Hacen un estudio de las diferentes opciones disponibles para la inspección. Por último mencionan las ventajas que tiene el hacer una inspección en 3D.

En [17] T. Hidvegi y P. Szolgay presentan dos nuevos algoritmos de redes neuronales celulares (CNN) analógicos para detectar defectos. El primero de ellos sirve para detectar errores de alineamiento, mientras que el segundo es útil para detectar corto circuitos. También muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos. Sin embargo, este trabajo no analiza algunos de los problemas fundamentales en el control de calidad de las PCB's como son las deformaciones de las tarjetas y la inspección de la pasta de soldadura, los cuales son claves para no ocasionar defectos en las siguientes etapas.

Los artículos [4, 32] analizan la relevancia de los conocimientos de los procesos involucrados en la manufactura de un producto. Mencionan la importancia de conocer los tipos más comunes de defectos que se pueden presentar en cada etapa y los sistemas para identificarlos. Presentan también un estudio de dos de las tecnologías de inspección: sistemas basados en cámaras y sistemas basados en láser.

3.4. Láser

El láser, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (*light amplification by stimulated emission of radiation*), es un dispositivo que amplifica la luz al golpear con luz átomos excitados, induciendo la generación de fotones y provocando una reacción en cadena que resulta en la emisión de luz. El láser posee las siguientes propiedades especiales:

- **Monocromaticidad:** cuenta con una sola longitud de onda de luz, es decir, las ondas de luz de un rayo láser son todas del mismo color.
- **Direccionalidad:** las ondas componentes de la luz viajan en línea recta casi sin dispersión, se propagan en la misma dirección de manera ordenada en tiempo y espacio.
- **Coherencia:** significa que las amplitudes relativas de las ondas del rayo de luz que se emite están en fase, es decir, conforme viajan las ondas de luz sus picos y valles oscilan perfectamente sincronizados.

El láser debido a las propiedades con que cuenta, posee también una amplia variedad de aplicaciones, algunas de ellas son:

- **Manufactura:** se usan para cortar, taladrar, soldar, tratar superficies, alineamiento, etc.
- **Medicina:** esta aplicación está relacionada con el cuerpo humano, por ejemplo, corrección de la vista, cirugías, tratamientos dentales, dermatológicos y varios tipos de tratamientos cosméticos, entre otros.
- **Almacenamiento de datos:** esta aplicación se refiere al almacenamiento óptico de datos en CD's, DVD's y Blu-ray.
- **Comunicaciones:** ampliamente usados en comunicaciones con fibra óptica y comunicaciones intersatelitales.
- **Metrología:** se utilizan para realizar mediciones ópticas de muy alta precisión, mediciones de tiempo, temperatura, estrés, etc.

3.4.1. Principio de funcionamiento

El funcionamiento del láser se basa en el proceso de emisión estimulada descrito por primera vez por Albert Einstein en 1917 en uno de sus trece artículos sobre la teoría cuántica de la radiación [11]. El láser obliga a los átomos a almacenar luz y emitirla en forma coherente. Primero, fotones de una fuente de energía chocan con los electrones

de los átomos del láser haciéndolos pasar a un estado excitado. Después, se les estimula mediante fotones externos para que emitan la energía almacenada en forma de fotones, mediante un proceso conocido como emisión estimulada. Los fotones emitidos tienen una frecuencia que depende de los átomos en cuestión y se desplazan en fase con los fotones que los estimulan. Los fotones emitidos chocan a su vez con otros átomos excitados y liberan nuevos fotones. La luz se amplifica a medida que los fotones se desplazan hacia atrás y hacia adelante entre dos espejos paralelos desencadenando nuevas emisiones estimuladas. Al mismo tiempo, la luz láser se filtra por uno de los espejos, que es sólo parcialmente reflectante. Este proceso constituye el fundamento del láser.

3.4.2. Tipos de láser

Según el medio que emplean, el láser suele denominarse de estado sólido, de gas, de semiconductores, líquidos y de electrones libres.

- **Láser de estado sólido:** los medios más comunes en el láser de estado sólido son varillas de cristal de rubí o vidrios y cristales con impurezas de neodimio. Los extremos de la varilla se tallan de forma que sus superficies sean paralelas y se recubren con una capa reflectante no metálica. El láser de estado sólido proporciona las emisiones de mayor energía. Normalmente funcionan por pulsos, generando un destello de luz durante un tiempo breve. Se han logrado pulsos de sólo 1.210^{-14} segundos, los cuales son útiles para estudiar fenómenos físicos de duración muy corta. El bombeo se realiza mediante luz de tubos de destello de xenón, lámparas de arco o lámparas de vapor metálico. La gama de frecuencias se ha ampliado desde el infrarrojo (IR) hasta el ultravioleta (UV) al multiplicar la frecuencia original del láser con cristales de dihidrogenofosfato de potasio, y se han obtenido longitudes de onda aún más cortas, correspondientes a rayos X, enfocando el haz de un láser sobre blancos de itrio.
- **Láser de gas:** es un sistema de láser en el que se genera un arco de alta tensión a través de una mezcla de gases encerrados en el interior de un tubo, que posteriormente se descarga, lo que cambia el gas en plasma. El láser de gas es bombeado por luz ultravioleta, haz de electrones, corrientes eléctricas o reacciones químicas. Los gases de uso general incluyen el CO_2 (dióxido de carbono) y He-Ne (helio-neón). El láser de CO_2 es muy eficiente, y es el láser de onda continua más potente, se utiliza para el marcado y el procesamiento. El láser de helio-neón resalta por su elevada estabilidad de frecuencia, pureza de color y mínima dispersión del haz, se utiliza como fuentes de luz en la optoelectrónica.
- **Láser de semiconductores:** este láser es producido mediante material semiconductor. El láser de semiconductores es el más compacto, y suele estar formado

por una unión entre capas de semiconductores con diferentes propiedades de conducción eléctrica. El arseniuro de galio es el semiconductor más usado. Entre los usos más comunes del láser de semiconductores están los reproductores de discos compactos, comunicaciones y fuentes de excitación láser.

- **Láser de fibra:** están basados en fibras ópticas dopadas con iones de iterbio (Yb) u otros elementos. Este láser pueda alcanzar potencias de salida extremadamente altas, del orden de kilowatts.

3.5. Sensores láser

Muchos de los sistemas de inspección están basados en visión artificial, los cuales toman imágenes de la PCB y la analizan. Estos sistemas pueden ser muy rápidos pero dependen, entre otras cosas, de las condiciones de luz, cambios de color o terminación de la tarjeta y, en general, de las condiciones de prueba.

Por otro lado, los sistemas de inspección con sensores láser, no dependen de las condiciones de luz y del color de la superficie de la tarjeta, debido a las propiedades de la luz coherente. Con un sensor láser se puede crear una imagen en 3D de la superficie de la PCB, que se obtiene moviéndolo sobre la tarjeta y midiendo la altura de diferentes puntos. Estas mediciones proporcionan un valor real de la superficie de la tarjeta y, por lo tanto, detectan con mayor precisión cualquier defecto o deformación.

3.5.1. Principio de operación

El láser semiconductor está compuesto de un elemento emisor de luz y un detector sensible a la posición (PSD), como se muestra en la figura 3.2. Su principio de operación es: la luz coherente de la fuente emisora es condensada por medio de lentes y dirigida al objeto deseado. La luz reflejada desde el objeto es, nuevamente condensada por los lentes de recepción y dirigida al PSD. Si la distancia del objeto a sensar difiere, la imagen formada varía, por lo tanto, las dos salidas del PSD cambiarán. La razón de las dos salidas se encuentra y se convierte a una distancia.

3.5.2. Métodos de medición

La luz que se refleja desde la superficie del objeto a medir, consiste en una reflexión difusa o en una reflexión regular, como se muestra en la figura 3.3. La calidad de la luz reflejada difiere del material y condiciones de la superficie del objeto.

- **Método de reflexión difuso:** Este método colecta la luz reflejada desde el objeto a sensar. Proporciona medidas más estables que el de reflexión regular. Se puede

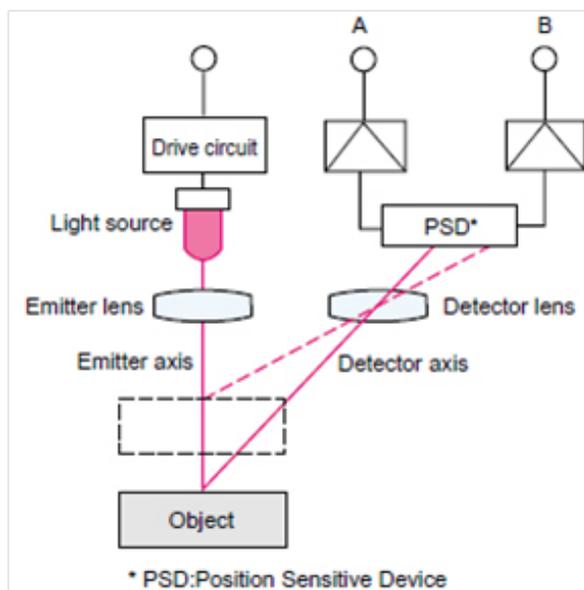


Figura 3.2: Operación de un sensor láser.

usar aun cuando la variación en el ángulo de reflexión sea grande. Si la superficie es brillante, la precisión disminuye y puede no dar la medición.

- **Método de reflexión regular:** Este método detecta el objeto usando reflexión regular. Se pueden hacer mediciones de superficies brillantes, pero no tiene una gran tolerancia a la variación de ángulos.

En nuestro caso, como la superficie de las PCB's no es brillante y puede haber variaciones de ángulos, el método utilizado es el de reflexión difusa.

3.5.3. Especificaciones del sensor láser ZS-LD50 de OMRON

El sensor usado en el sistema de inspección es el ZS-LD50 fabricado por OMRON, ver figura 3.4. Es un sensor láser de punto para todo tipo de superficies y puede ser aplicado en mediciones de las PCB, resinas y objetos metálicos. Algunas de sus características más importantes se muestran en la tabla 3.1. En este trabajo, también, se presenta un análisis usando un sensor láser de segmento de la serie ZG de OMRON, ver figura 3.5.

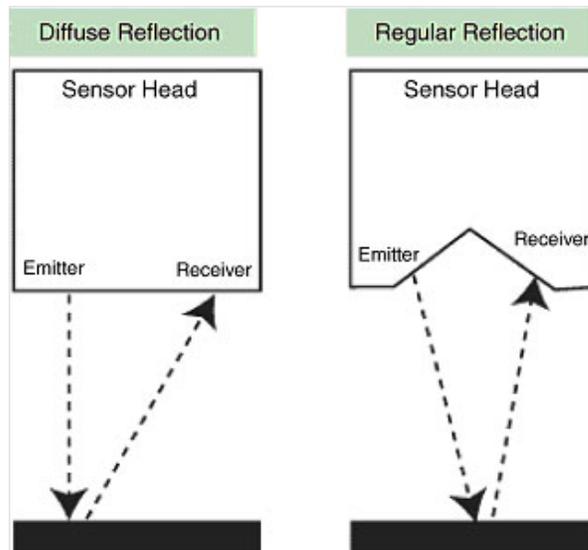


Figura 3.3: Métodos de medición por reflexión difusa y regular.

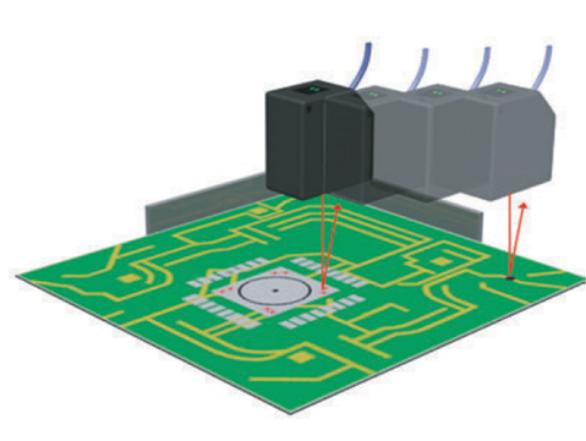


Figura 3.4: Sensor láser serie ZS inspeccionando una PCB.

Parámetro	Reflexión difusa	Reflexión regular
Distancia de medición	50 mm	47 mm
Rango de medición	± 5 mm	4 mm
Fuente de luz	Láser semiconductor visible	
Diámetro del rayo	900 × 600 μ m	
Resolución	0.8 μ m	

Tabla 3.1: Especificaciones del sensor láser ZS-LD50 de OMRON.



Figura 3.5: Sensor láser serie ZG.

Capítulo 4

Diseño del sistema de inspección de deformaciones

Cuando se diseña o selecciona un sistema de inspección, es importante definir y entender las necesidades y condiciones del proceso [28, 22]. Un sistema de inspección debe ayudar a identificar los defectos y mejorar la calidad del producto con un mínimo de tiempo y una eficiencia máxima. El ensamblado de las PCB necesita controles de calidad en cada una de las etapas del proceso, de tal manera que cuente con mecanismos de retroalimentación para un control de producción de lazo cerrado.

El sistema automático de inspección de tarjetas de circuito impreso, es un prototipo para detectar deformaciones residuales. La arquitectura del sistema está formada por una estación de trabajo (PC), una tarjeta de control de movimiento y un sensor láser. Ésta debe contar con un sistema de comunicación confiable y una sincronización entre sus bloques, que permitan generar un conjunto de datos, para su procesamiento y visualización.

En este capítulo se presenta el modelo teórico de máquinas inteligentes y la arquitectura general del sistema. La importancia del modelo radica en que presenta una visión integral de los niveles involucrados en un proceso de manufactura y constituye una forma valiosa de entender sistemas complejos. A partir de esta visión se plantea la arquitectura del sistema de inspección, prestando especial atención al diseño del sistema de control de movimientos y la interfaz entre la PC y la tarjeta de control.

4.1. Modelo teórico de máquinas inteligentes

El modelo teórico de máquinas y procesos, usado en este trabajo, fue desarrollado por Albus [1]. Este modelo, define los componentes de un sistema inteligente de máquinas y expone una visión jerárquica de la organización, recursos y componentes en un sistema de manufactura. El modelo es aplicable a cualquier tipo de organización de manufactura

y su implementación depende de los objetivos propios del sistema a desarrollar. La figura 4.1 muestra la estructura jerárquica de control y monitoreo de una máquina generalizada e inteligente. En dicho esquema, se propone que cada unidad de la máquina se pueda dividir en módulos internos que son el Procesamiento Sensorial (PS), el Modelo del Mundo (MM), la Generación de Comportamiento (GC) y un Juicio de Valor (JV), no incluido en la figura 4.1.

El Procesamiento Sensorial se refiere, a la capacidad de adquirir información del mundo exterior a partir de los sensores disponibles y adaptar la señal obtenida a un formato procesable por cada unidad. El Modelo del Mundo toma dichas mediciones y las adapta a un modelo matemático, el cual es tomado por un Juicio de Valor, para ser procesadas y enviadas a la Generación del Comportamiento, que genera la señal a los actuadores o módulos esclavos para su acción en el mecanismo. El modelo de Albus es genérico, modular y escalable a máquinas inteligentes y, propone la comunicación entre diferentes módulos de Modelos del Mundo entre sí. El sistema es bastante intuitivo y su jerarquía conecta los sensores y actuadores al control, la generación de trayectoria y los ejes asociados con una máquina a la línea de producción y a nivel de planta.

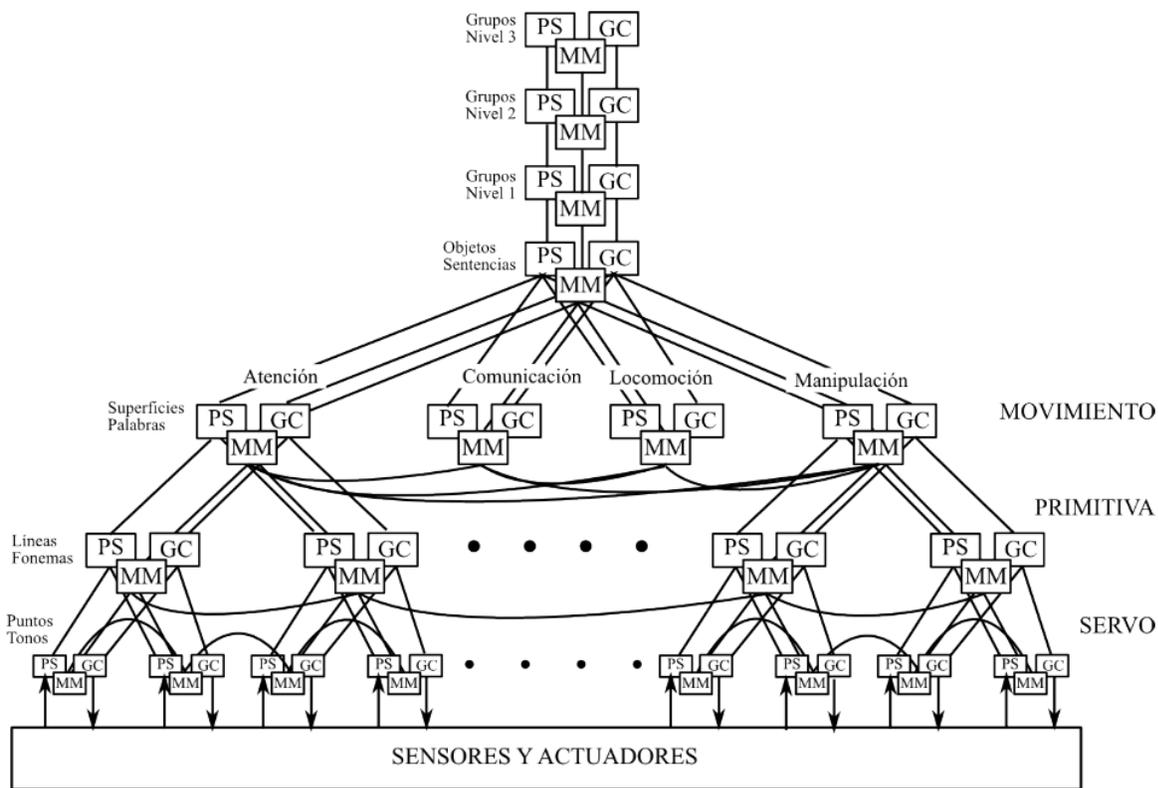


Figura 4.1: Modelo de máquinas inteligentes propuesto por Albus [1].

4.2. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema de inspección implementado es modular, escalable y flexible, de tal forma que permita fácilmente ser modificada, tanto en hardware como en software. Los bloques que la componen se muestran en la figura 4.2. En esta figura se observan dos de los módulos principales que la conforman que son: sistema de control de movimiento e interfaz de usuario. El sistema de control de movimiento comprende los bloques de control de movimiento, secuencia de control de motores y potencia. Estos componentes se encargan de mover al sensor láser y la PCB. Una vista de la tarjeta del sistema de control de movimiento es mostrada en la figura 4.3. La interfaz de usuario permite al mismo tiempo configurar ciertos parámetros del sistema como son: posición de los ejes X y Y, velocidad y áreas a inspeccionar. Los valores máximos y mínimos a considerar en la configuración están dados en la tabla 4.1.

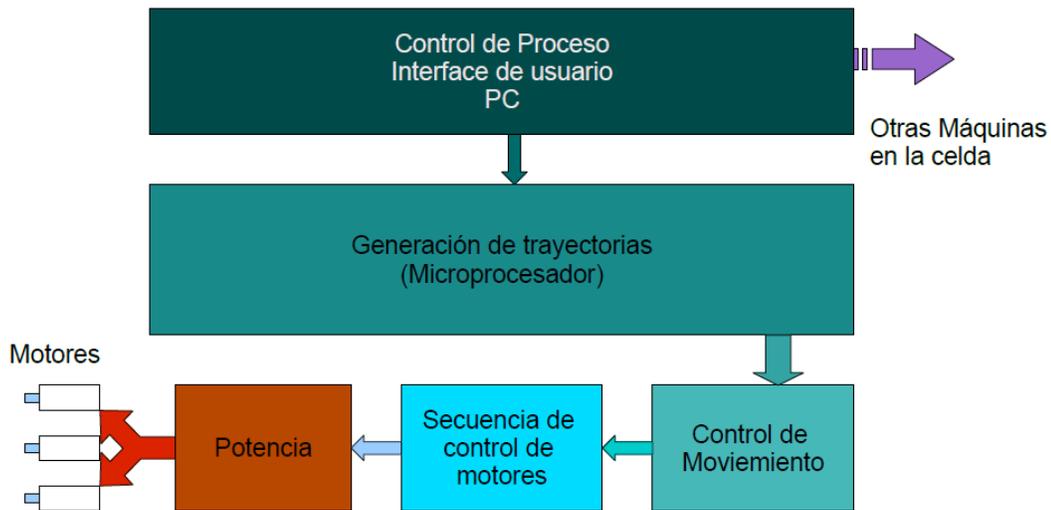


Figura 4.2: Diagrama a bloques del sistema de control de movimiento.

Parámetro	Valor
Desplazamiento máximo	300 mm por eje
Velocidad máxima	300 mm/s
Aceleración	1000 mm/s ²
Resolución de desplazamiento mínimo	50 μm
Motor a pasos	200 pulsos por vuelta

Tabla 4.1: Especificaciones del control de movimiento.



Figura 4.3: Vista de la tarjeta del sistema de control de movimiento.

4.3. Control de movimiento

La arquitectura del control de movimiento propuesto es modular, escalable y cumple con los requerimientos mínimos del sistema, ver tabla 4.1. Este control es independiente del sistema de adquisición de datos del sensor láser, pero necesita estar sincronizado puesto que es indispensable saber a qué posición corresponde cada lectura. La estrategia de diseño del control de movimiento consiste en desarrollar un sistema de bajo costo, escalable y eficiente, dejando las tareas más pesadas, computacionalmente, a la PC.

Las tarjetas de control están conectadas en cadena tipo Daisy, es decir, todas están conectadas al mismo bus serial, como se muestra en la figura 4.4. Esta topología permite una fácil expansión del número de ejes del sistema. Cada tarjeta de control es capaz de controlar uno o dos ejes de movimiento independientes y generar las señales para los motores a pasos. Las tarjetas mencionadas, utilizan el microcontrolador PIC16F458A, el cual tiene una memoria de programa de 4 KB y es económico. El diagrama esquemático de la tarjeta de control es mostrado en la figura 4.5.

La comunicación entre la PC y las tarjetas de control se realiza por medio de un protocolo de comunicación serial de 6 bytes, mostrado en la tabla 4.2. Los comandos básicos para su control, son enviados a cada uno de sus ejes por medio del protocolo de comunicación. El bloque de comunicación recibe la trama de la PC y lo interpreta. Las tramas especifican el número de controlador y su eje, número de comando, opción y un byte de verificación. En la figura 4.6 se presenta el diagrama de flujo de los bloques

Byte	Descripción
ACK	Reconocimiento. $0xFF$
ID AXIS	Número de identificación del controlador y número de eje que recibe el comando.
CMD	Número de comando.
OPT1	Opción uno del comando. $0xFF$ por default.
OPT2	Opción dos de comando. $0xFF$ por default.
CRC	Verificación del CRC. se utiliza la función XOR.

Tabla 4.2: Descripción de la trama usada para la comunicación entre la PC y la tarjeta de control de movimiento.

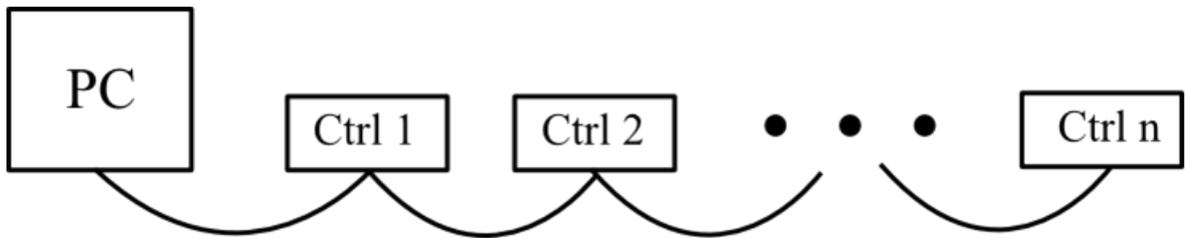


Figura 4.4: Topología de conexión en cadena tipo Daisy entre las tarjetas de control de movimiento.

involucrados en el sistema de comunicación.

La trayectoria del movimiento se hace en un solo eje y es una interpolación lineal básica la que se calcula, es decir, un movimiento de punto a punto con un perfil de velocidad dado. El perfil de velocidad es de tipo trapezoidal, con la finalidad de suavizar la trayectoria y disminuir el riesgo de pérdida de pulsos de los motores a pasos, cuando éstos cambian de dirección. Debido a este perfil, el arranque y paro de los motores es suave. La figura 4.7 muestra un perfil de velocidad para un movimiento punto a punto con una velocidad constante. Es posible usar perfiles de velocidad aún más suaves, pero implica resolver ecuaciones más complejas lo que incrementaría los tiempos de reacción del control.

La generación de pulsos de los motores a pasos es tomada de un análisis del perfil de velocidad fuera de línea. De acuerdo a la figura 4.7, N representa el número total de pasos requeridos para la fase de movimiento, N_1 son los pasos en la etapa de aceleración, N_2 en la etapa de velocidad constante y N_3 en la desaceleración. Por lo tanto N estará dado por la suma de todos los pasos en cada una de las etapas del movimiento, esto es:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (4.1)$$

El número de pasos requeridos en cada etapa está dado por:

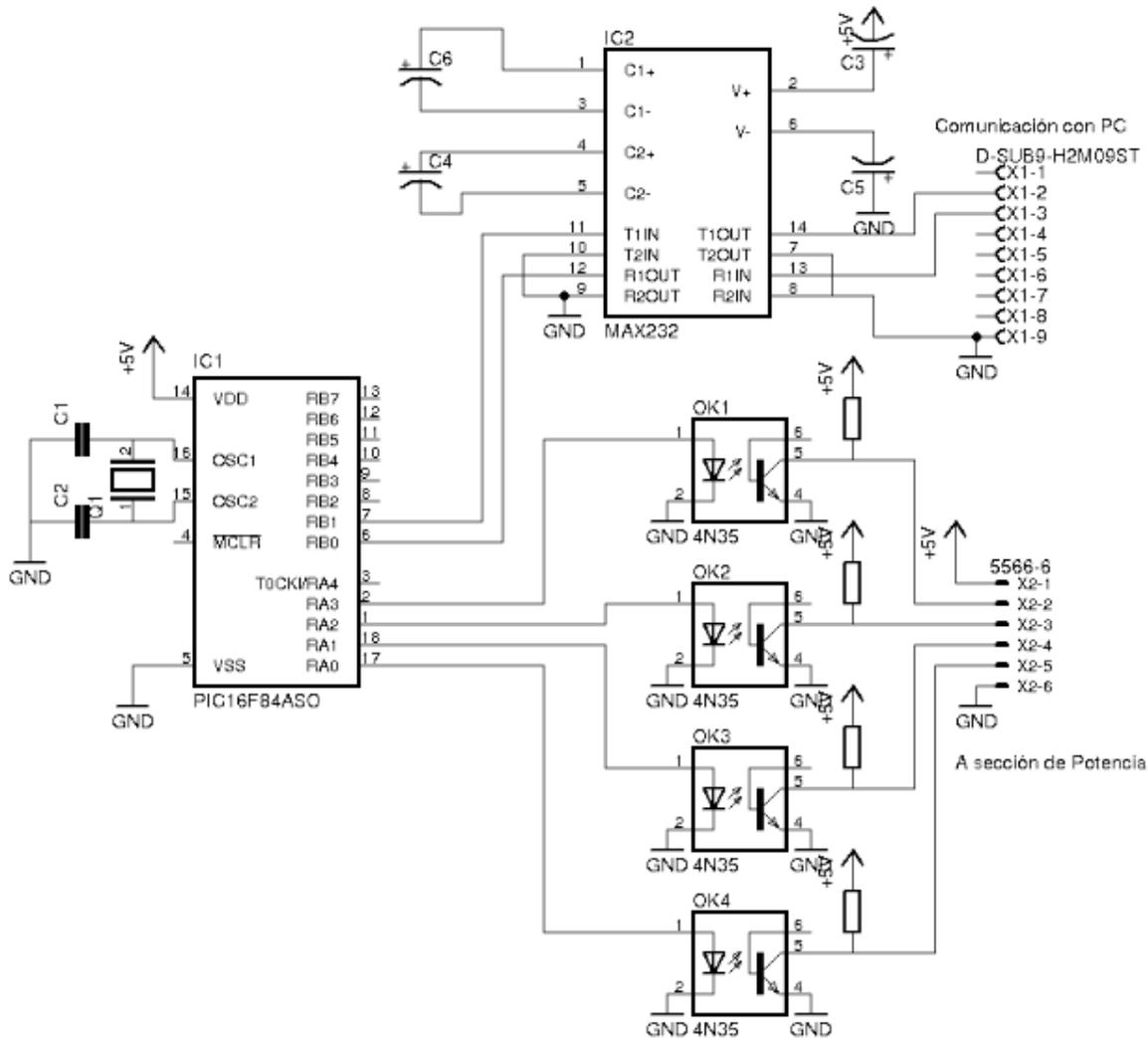


Figura 4.5: Diagrama esquemático de la tarjeta de control de movimiento.

$$N_1 = \frac{l_1}{\Delta u} = \frac{v_n^2}{2A\Delta u} \quad (4.2)$$

$$N_2 = \frac{l_2}{\Delta u} \quad (4.3)$$

$$N_3 = \frac{v_n^2}{2D\Delta u} \quad (4.4)$$

donde A es la aceleración, v_n es la velocidad nominal, D es la desaceleración y Δu es el desplazamiento lineal por cada paso del motor.

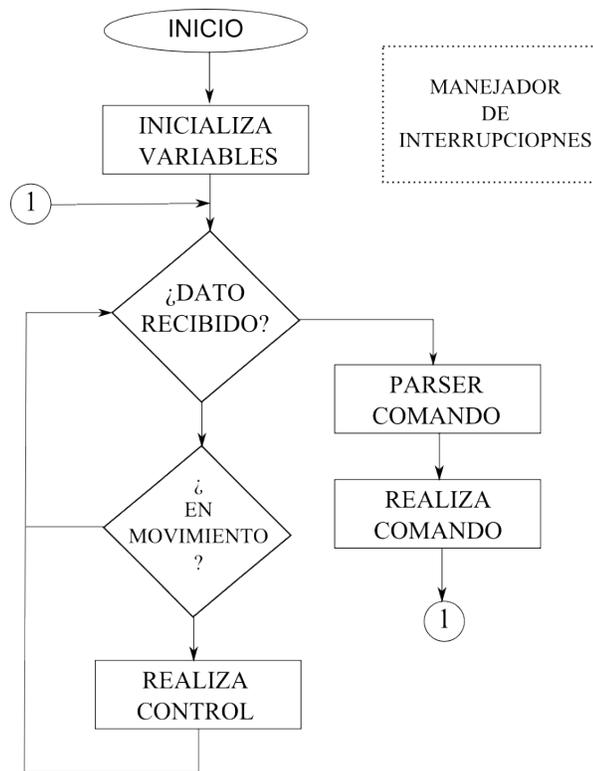


Figura 4.6: Diagrama de flujo del control de movimiento.

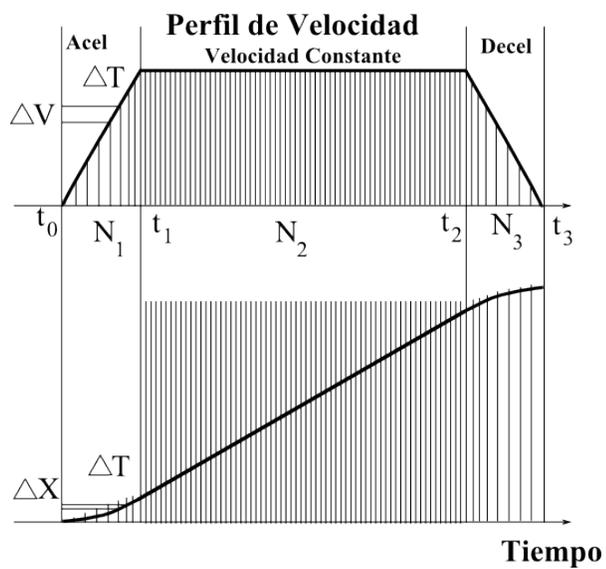


Figura 4.7: Perfil de velocidad

Para estimar el tiempo entre cada uno de los pasos (k), en cada etapa del movimiento, usamos las siguientes ecuaciones.

Aceleración:

para $k = 1, N_1$

$$v(k) = \sqrt{v_0^2 + 2kA\Delta u} \quad (4.5)$$

$$T_i(k) = \frac{2\Delta u}{v(k) + v(k+1)} \quad (4.6)$$

siguiente k .

Velocidad constante:

para k, N_2

$$T_i = \frac{\Delta u}{v_n} \quad (4.7)$$

Desaceleración:

para $k = 1, N_3$

$$v(k) = \sqrt{v^2 + 2kD\Delta u} \quad (4.8)$$

$$T_i(k) = \frac{2\Delta u}{v(k) + v(k+1)} \quad (4.9)$$

siguiente k .

Este algoritmo genera los tiempos entre cada paso, lo que se utilizará para la generación del movimiento de un punto a otro moviéndose a una velocidad deseada. La figura 4.8 (a) muestra el cálculo fuera de línea de los pasos y la trayectoria de un movimiento del origen a 150 *mm*. El eje secundario de la figura 4.8 (b) muestra la generación de los pasos del motor relacionado con el tiempo en que cada paso se genera.

Este valor de tiempo se traduce a un valor del temporizador de 16-bits del microcontrolador PIC16F648A, el cual tiene un reloj base a 20 Mhz., es decir que cada pulso de reloj corresponde a 50 *ns*.

4.4. Interfaz entre la PC y la tarjeta de control de movimiento

Los módulos del programa de control entre la PC y el control de movimiento está compuesta de los módulos mostrados en la figura 4.9, éstos son: comunicaciones, generación

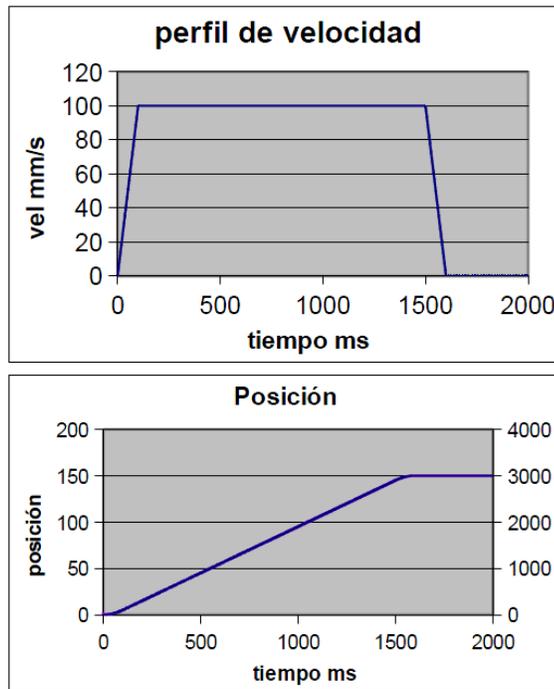


Figura 4.8: Gráficas de la generación de pulsos para un perfil de velocidad y su posición.

del comando, cálculo de la trayectoria e interfaz de usuario. Cada módulo es independiente y su implementación está hecha en lenguaje java utilizando múltiples hilos de programación para cada módulo.

El protocolo de comunicación es relativamente simple, utiliza los comandos descritos en la tabla 4.2 para enviar las instrucciones a la tarjeta de control de movimiento específica y para recibir la información de esta última. Los paquetes están compuestos por: la información de quien lo envía, a qué comando se refiere y el valor que corresponde a la instrucción requerida. Los comandos básicos se dividen en instrucciones para escribir un dato en la tarjeta, instrucciones para leer algún valor de la tarjeta de control, e instrucciones de comando de algún evento en la tarjeta; por ejemplo iniciar el movimiento, paro de emergencia o reinicio del proceso.

El cálculo de la velocidad se hace en la PC y se traduce a un valor del temporizador interno del microprocesador, el cual va a ser activado en una interrupción que maneja la palabra de control de los pasos del motor correspondiente. Actualmente, una tarjeta de control manipula un solo eje, pero se pretende que una tarjeta pueda manejar hasta dos ejes, dependiendo de la necesidad de puertos libres.

En esta configuración, la tarjeta de control de movimiento se centra en los cálculos para generar la secuencia de palabras de control al puerto, que es donde está conectado el motor a pasos, el cual parte de una posición inicial a una final. En la PC se genera la trayectoria, los cálculos de definición de área de inspección en la tarjeta de prueba y

las operaciones de interface de usuario, así como, el manejo y procesamiento de datos posterior a la adquisición. Cada operación tiene un hilo de programación y se corre independiente, esto permite poder definir prioridades entre cada uno de los hilos de programación de tal forma que los procesos más importantes, que impliquen control en tiempo real, puedan ser realizados con mayor frecuencia que aquellos que no son tan relevantes.

El programa, debido a su arquitectura de diseño modular y abierta, puede ser cambiado y actualizado a conveniencia. Esto es, en caso de que se desee cambiar el protocolo serial a algún otro, por ejemplo, firewire o ethernet, sólo se requerirá actualizar las clases que definen los objetos instanciados, para tal efecto, se mantienen las llamadas a rutinas de servicio con el mismo nombre y funcionamiento.

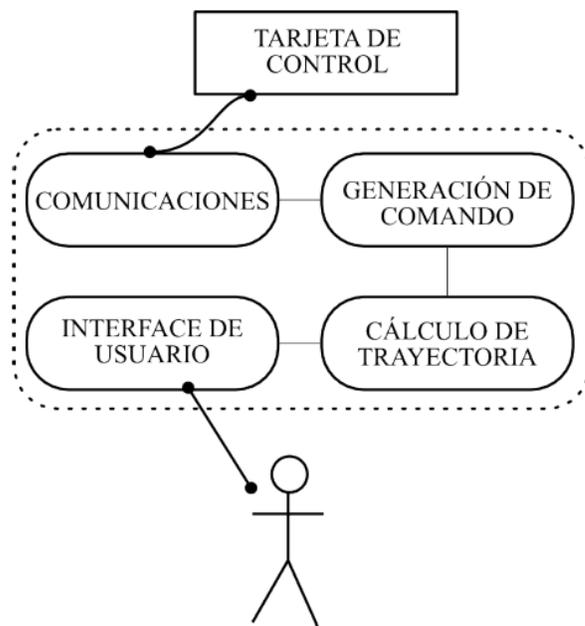


Figura 4.9: Módulos de la interfaz entre la PC y el control de movimiento.

El programa de control de movimiento en la PC debe de generar la estrategia de captura de datos dependiendo de la operación en particular que se desee realizar. También se cuenta con una estrategia de sincronización, para relacionar los datos de entrada a la PC, resultado de las mediciones del sensor láser, y su posición en la PCB. Lo que garantiza saber exactamente a qué posición corresponde cada lectura.

El software de control en la computadora está basado en una combinación de Java y Python. Java se utiliza para el control de bajo nivel y comunicación con el hardware, mientras que Python se usa para el cálculo de las trayectorias de alto nivel, la manipulación de los datos y la generación de salidas y presentación en la pantalla de los resultados. La figura 4.10 muestra la interfaz de control del usuario, la cual le permite

configurar la posición de los ejes X y Y, velocidad y áreas a inspeccionar.

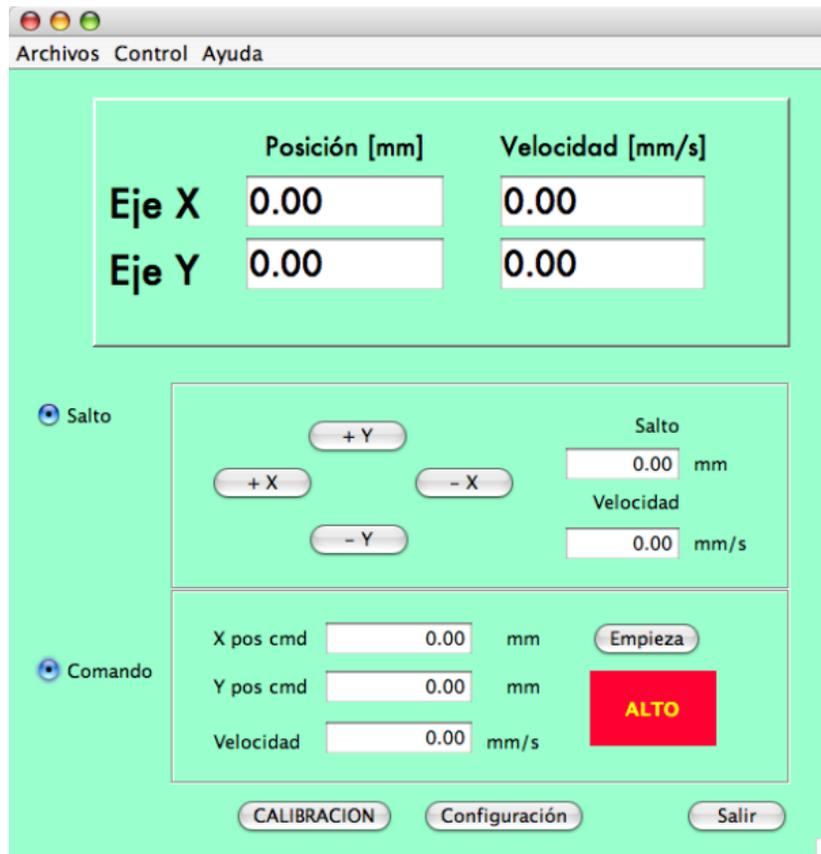


Figura 4.10: Interfaz de usuario para el control de movimiento de dos ejes.

Capítulo 5

Resultados

En el presente trabajo se implemento un sistema automático para detectar pequeñas deformaciones residuales en tarjetas electrónicas. Para ello, como se describió en el capítulo anterior, se desarrolló un sistema de control de movimiento, el cual se muestra en la figura 5.1. Éste prototipo cuenta con dos ejes, con bandas dentadas y motores a pasos, para mover el sensor láser y la tarjeta de circuito impreso. También incluye, una comunicación confiable con la estación de trabajo, una computadora personal, y un módulo de sincronización para el control de movimiento y el sensor láser. Esto último con la finalidad de permitir correlacionar los datos obtenidos para su visualización y procesamiento.

Los resultados obtenidos con este trabajo fueron presentados en [13] y [14]. También en el reporte técnico enviado a SONY-Tijuana mostrado en [12].

En este capítulo, se realiza un análisis de las diferentes estrategias de inspección, usando un sensor láser de punto y sensores láser de segmento. Asimismo se hace una comparación del rendimiento e impacto económico y se muestran algunos resultados experimentales de tres áreas evaluadas de la PCB.

5.1. Estrategias de inspección

El diseño del prototipo está basado en un modelo de arquitectura abierta para máquinas inteligentes, escalable y modular, que permite ser flexible y que pueda implementarse en diferentes sistemas de inspección y controles de movimiento. El sistema de inspección permite, analizar toda la tarjeta o un área en específico, y puede usar un sensor láser de punto o de segmento. Dependiendo del área a analizar y del sensor láser utilizado, el usuario puede definir la estrategia de inspección deseada, lo cual resulta muy importante puesto que si se requiere una mayor rapidez es posible evaluar únicamente las áreas con mayor concentración de cobre.

Los pasos para configurar una estrategia de inspección requieren definir las tareas específicas y los casos de uso del sistema. Lo anterior, definirá el comportamiento del

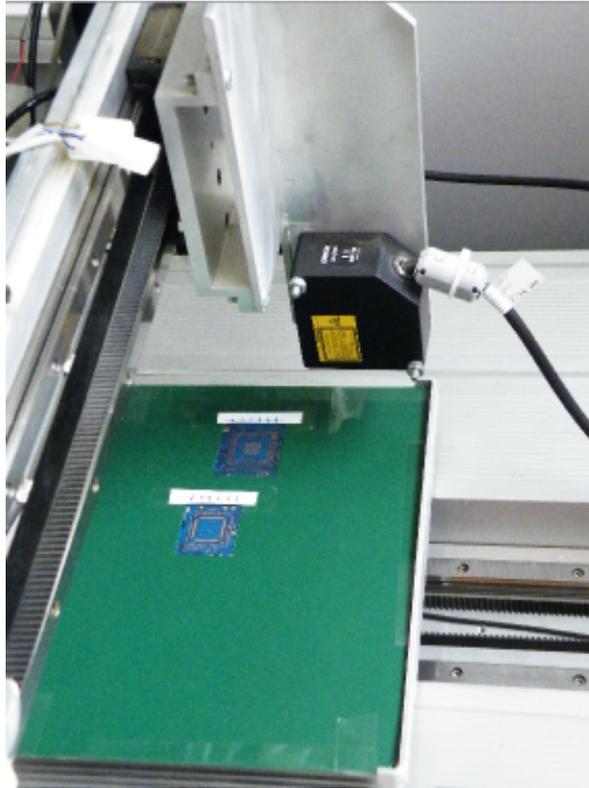


Figura 5.1: Prototipo del sistema automático de detección de deformaciones.

control de movimiento y el procesamiento de los datos. En este contexto, se pueden definir cuatro tipos de inspección:

1. Inspección total de la tarjeta usando un sensor láser de punto, ver figura 5.2 (a).
2. Inspección total de la tarjeta usando un sensor láser de segmento, ver figura 5.2 (b).
3. Inspección de un área usando un láser de punto, ver figura 5.2 (c).
4. Inspección de un área usando un sensor láser de segmento, ver figura 5.2 (d).

Comparando dos de las estrategias de inspección y su rendimiento tenemos lo siguiente:

- Si usamos un sensor láser de punto con una tasa de muestreo de 0.11 ms , una velocidad de 300 mm/s , una aceleración de 1000 mm/s^2 y un área de inspección de $200 \times 250\text{ mm}$, el tiempo requerido para completar esta tarea es de aproximadamente 105.42 ms y la cantidad de mediciones de $681,750$ muestras. Esta cantidad

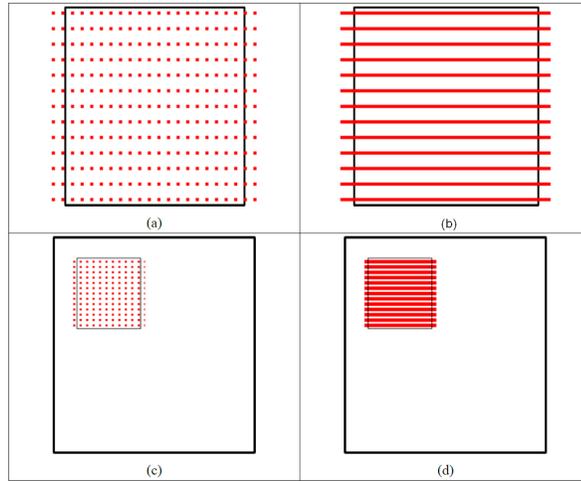


Figura 5.2: Diferentes estrategias de inspección. (a) Inspección total usando un sensor láser de punto, (b) Inspección total usando un sensor laser de segmento, (c) Inspección de un área usando un sensor láser de punto y (d) Inspección de un área usando un sensor laser de segmento.

de información representa 3.5 MB de memoria que el sistema de procesamiento deberá analizar y manipular. La información obtenida de este ejemplo es mostrada en la tabla 5.1.

- Por otro lado, si hacemos el mismo análisis pero usamos tres sensores láser de segmento de 70 mm, el rendimiento es notoriamente mejorado; en un orden de aproximadamente 150 veces. El motivo de usar tres sensores láser, es cubrir el ancho de la tarjeta en una sola inspección. La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos.

5.2. Impacto económico

Como se ha mencionado, el sistema puede utilizar un sensor láser de punto o segmento, lo cual impacta en el tiempo de inspección de cada tarjeta, procesamiento de los datos y, por supuesto, en el costo económico. Comparando los costos y el rendimiento de las dos estrategias analizadas en el punto anterior tenemos que:

- El costo del sensor láser de punto es de US 6,000.00. La inspección completa de una PCB es de aproximadamente 150 s, lo que da una tasa de 24 por hora y un total de 576 en 24 horas.
- El costo del sensor láser de segmento es de US 21,000.00. La inspección completa de una PCB es de 5 s, lo que da una tasa de 720 por hora y un total de 17,280 en 24 horas.

Parámetro	Valor	Unidades
Velocidad	300	mm/s
Ancho	200	mm
Largo	250	mm
Tiempo de inspección de una línea	0.77	s
Tiempo total del desplazamiento	0.84	s
Distancia entre líneas	2	mm
Total de líneas inspeccionadas	125	líneas
Tiempo total de inspección	105.42	s
Tiempo de muestreo	11	ms
Muestras por línea	6,969	muestras
Total de muestras	871,125	muestras
Distancia entre muestras	28.7	μm
Memoria	3,484,500	bytes
Distancia entre pasos	50	μm
Tiempo entre pasos	0.17	s

Tabla 5.1: Resultados de la inspección de una tarjeta de $200 \times 250 mm$ usando un sensor láser de punto.

Parámetro	Valor	Unidades
Velocidad	300	mm/s
Ancho	200	mm
Largo	250	mm
Tiempo total de inspección	0.77	s
Total de muestras	0.84	s
Memoria	3,484,500	bytes

Tabla 5.2: Resultados de la inspección de una tarjeta de $200 \times 250 mm$ usando tres sensores láser de segmento de $70 mm$.

La comparación de los sensores láser da un factor de rendimiento de 30 para el de segmento, pero a un costo mucho mayor. Si este factor justifica una inversión adicional, entonces la tecnología propuesta es viable y se puede utilizar un sensor láser de segmento.

5.3. Resultados experimentales

En la medición de distancia, el sensor láser envía un haz de luz sobre la superficie de la PCB con una tasa de muestreo de $11 ms$ por muestra, con una resolución de $0.5 \mu m$. Los dos ejes del control de movimiento se mueven a una velocidad de $100 mm/s$, con

un desplazamiento mínimo de $50 \mu m$.

Los resultados experimentales mostrados fueron realizados utilizando dos tarjetas de circuito impreso proporcionadas por la empresa SONY-Tijuana. La primera de ellas, tarjeta a analizar, ya pasó por el proceso de calentamiento, mientras que la segunda, tarjeta de referencia, no ha pasado por éste. En el análisis de deformaciones locales se seleccionaron tres áreas de la PCB donde se cuenta con una alta densidad de cobre, puesto que en éstas la posibilidad de que existan deformaciones es mayor. Además, en las tres áreas se colocarán, durante el proceso de ensamblado, diferentes circuito integrados, que también podrían sufrir deformaciones, y aunado a la deformación global de la tarjeta aumentaría la probabilidad de que sus terminales no hicieran contacto con los *pads*. Las áreas seleccionadas se muestran en la figura 5.3 (a), (b) y (c).

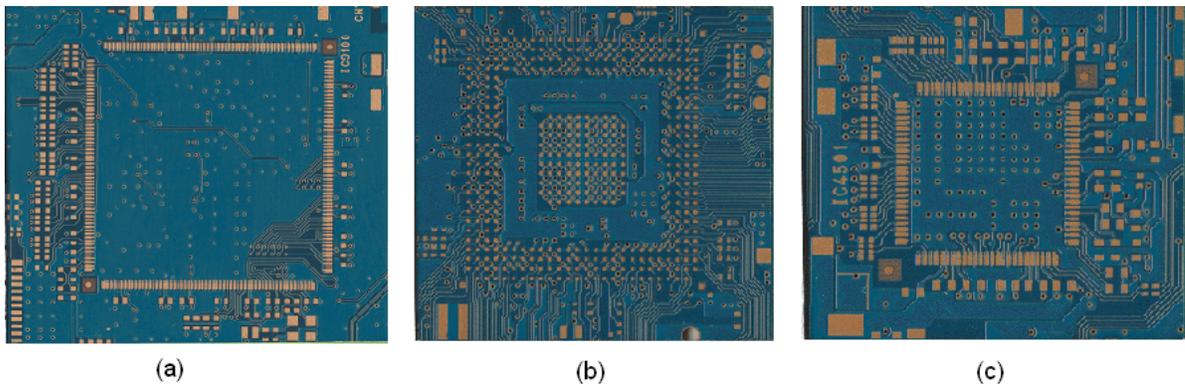


Figura 5.3: Regiones de prueba seleccionadas. (a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.

En el análisis de deformaciones el primer paso es obtener las mediciones de la tarjeta de referencia, es decir la que no a pasado por ningún proceso. La medición incluye todas las distancias relativas del sensor láser a la superficie de la PCB. Esto significa que los desalineamientos mecánicos y errores de paralelismo, también son incluidos. Posteriormente, la tarjeta a analizar es medida en la misma región, por lo que también incluye errores similares a la primera medición. Finalmente, se realiza una compensación punto a punto para eliminar los errores y encontrar la deformación del área seleccionada de la PCB. Los resultados obtenidos de estas mediciones de la región 1 para ambas tarjetas, la que no ha pasado por el proceso de calentamiento y la que paso por dicho proceso, se muestran en las figuras 5.4 y 5.5.

En las figuras 5.6 (a), (b) y (c), se muestran los resultados de las deformaciones globales y locales, y del análisis realizado a las regiones 1, 2 y 3 de la PCB. En las figuras 5.6 (a) y (c) destacan dos regiones con deformaciones locales, las cuales coinciden con los *pads* donde se conectarán las terminales de un circuito SMD.

En la figura 5.7 se muestra una representación en 3D de las mismas regiones. En la región 2, figura 5.7 (b), se observa una deformación mayor, lo cual se debe a que en esta

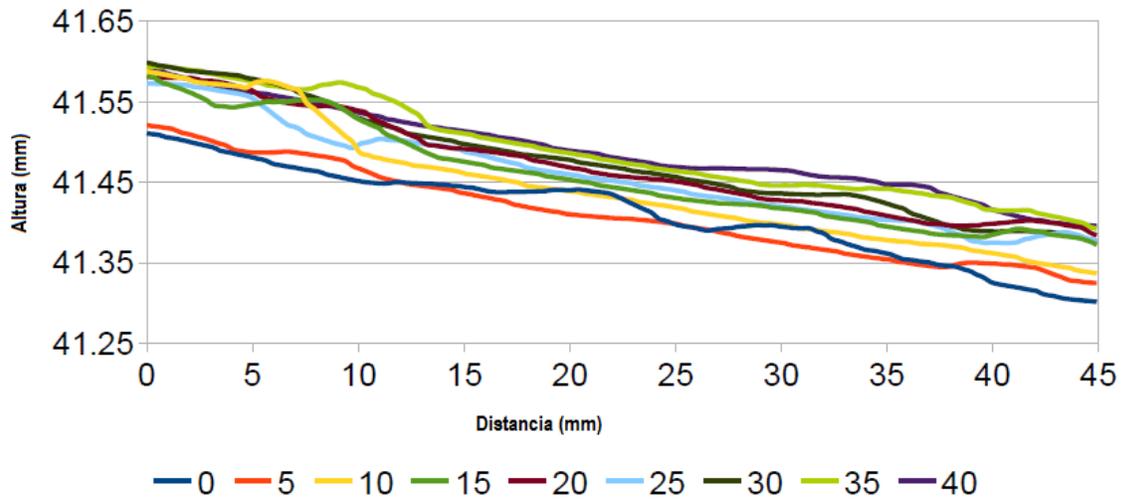


Figura 5.4: Alturas de la región 1 de la tarjeta de referencia.

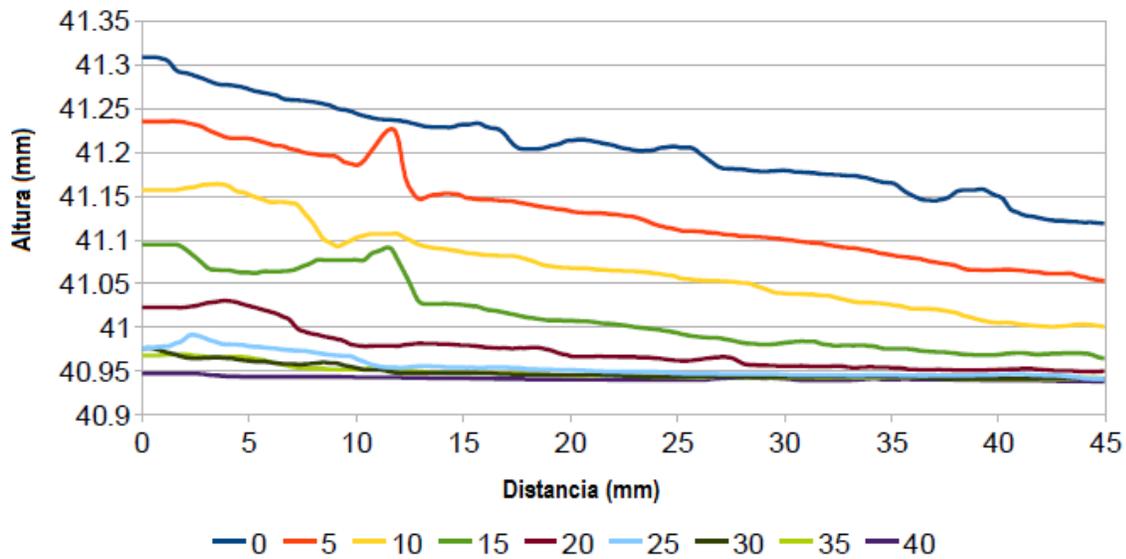


Figura 5.5: Alturas de la región 1 de la tarjeta que paso por el proceso de calentamiento.

área hay una concentración mayor de cobre, como se puede constatar en la figura 5.3 (b). También, de estas imágenes se puede concluir que las mayores deformaciones ocurren en una de las esquinas, lo que puede afectar las conexiones de los circuitos integrados, puesto que estos últimos también sufrirán una pequeña deformación.

En la tabla 5.3, se muestra un análisis del procesamiento de los datos obtenidos en las mediciones de las tres regiones. Esta información, también, nos permite saber lo que

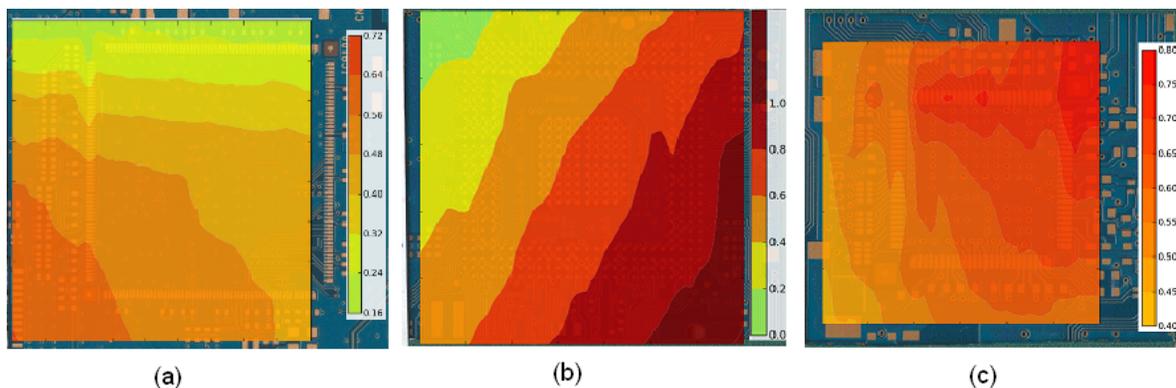
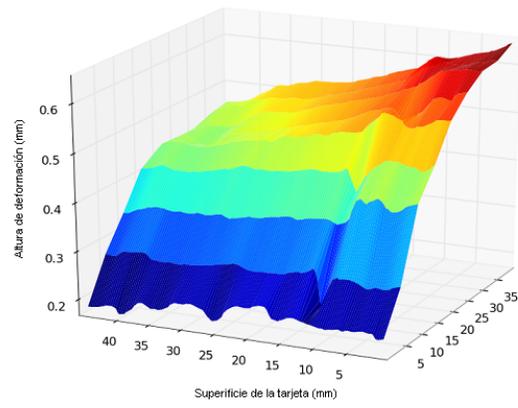


Figura 5.6: Curvas normalizadas representando diferentes alturas de las regiones seleccionadas. (a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.

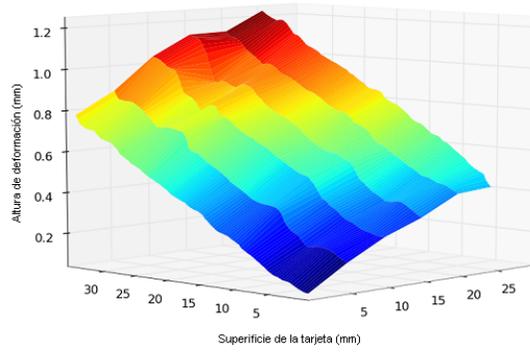
ha ocurrido con cada región después del proceso de calentamiento de la PCB.

Parámetro	Región 1 (mm)	Región 2 (mm)	Región 3 (mm)
Diferencia máxima	0.6461	2.1441	0.7869
Diferencia mínima	0.1759	0.0606	0.1565
Diferencia promedio	0.4351	0.7212	0.6146
Deformación máxima	0.0263	0.0891	0.0825

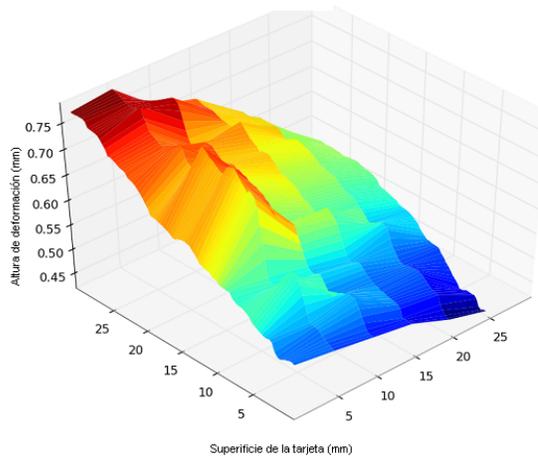
Tabla 5.3: Resumen del procesamiento de las mediciones de las tres regiones analizadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7: Deformaciones de las regiones de prueba seleccionadas. a) Región 1, (b) Región 2 y (c) Región 3.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

Las PCB's son un medio de conexión de componentes que se encuentran en cualquier equipo electrónico. La detección temprana de los defectos sobre las mismas puede reducir costos y asegurar un mayor tiempo de vida de los equipos. Durante el proceso de ensamblado la PCB pasa por varias etapas de producción como son: manufactura, colocación de soldadura y de componentes, reflujo y prueba de la tarjeta. En el proceso de reflujo, la PCB es calentada hasta poco más de $235^{\circ}C$, este calentamiento, debido a la alta concentración de cobre en algunas áreas, puede crear deformaciones residuales sobre la superficie de la PCB, a causa de la diferencia del coeficiente de expansión térmica entre el cobre y el sustrato. Lo anterior ocasionaría que no existiera un contacto adecuado entre los dispositivos de SMD y los *pads*. También, se crearían tensiones entre los componentes y la tarjeta, reduciendo su tiempo de vida. Debido a los problemas mencionados es muy importante contar con una herramienta de control de calidad que permita determinar las deformaciones que sufre una PCB.

6.1. Conclusiones

En este trabajo mostramos el diseño de un sistema de inspección automatizado para detectar deformaciones residuales de tarjetas de circuito impreso, el cual es una herramienta efectiva para asegurar la calidad y reducir los defectos ocurridos durante el proceso de ensamblado de una PCB. La metodología usada permite un diseño modular y un sistema de control electrónico abierto, por lo que es fácil de adaptar a diversos conjuntos de condiciones así como a diferentes tipos de sensores, mecanismos de control de movimiento y estrategias de procesamiento de datos.

Aplicar este sistema de inspección, en una etapa inicial del proceso de ensamblado de una PCB, puede mejorar el rendimiento al detectar regiones de alta concentración de cobre, donde el calor podría deformar principalmente la tarjeta. Esta detección permitiría evitar, con el uso, futuras tensiones entre los componentes SMD y la tarjeta. También, el sistema puede ser utilizado para la inspección de puesta de componentes,

de la pasta de soldadura y algunas otras tareas de inspección. El método es más confiable debido al hecho de que no depende de las condiciones ambientales, como los sistemas de inspección convencionales basados en visión artificial.

Los resultados presentados, muestran que es posible detectar deformaciones globales y locales en una PCB producidas por deformaciones térmicas residuales. Estas deformaciones pueden ser obtenidas al procesar un conjunto de datos de la tarjeta de prueba y un conjunto de datos de la tarjeta de referencia. Lo anterior se realiza al inspeccionar índices como el máximo y mínimo de las distancias medidas en micrómetros, así como las deformaciones promedio. La velocidad de obtención de los datos, puede ser incrementada si se utiliza un sensor láser de línea, lo cual reduciría considerablemente el tiempo de inspección.

Finalmente, este sistema, además de prevenir posibles defectos de las siguientes etapas del proceso de ensamblado de las PCB's, puede aplicarse, también, a otras etapas para la inspección de dicho proceso.

6.2. Trabajo futuro

El Sistema automático de inspección permite obtener una imagen en 3D de la superficie de las tarjetas de circuito impreso. Sin embargo, éste tiene un potencial mayor en la detección de defectos durante el proceso de ensamblado por lo que es necesario implementar los algoritmos que permitan su detección y realizar las pruebas correspondientes, por lo que se considera lo siguiente como trabajo futuro.

1. El sistema permite obtener una representación en 3D de la tarjeta analizada con lo que se puede observar si sufrió deformaciones en las áreas de inspección. No obstante, es importante implementar algoritmos que permitan, con la información obtenida, tomar decisiones sobre si la tarjeta deberá ser rediseñada para evitar posibles fallas en el proceso de ensamblado o a futuro.
2. Durante el proceso de ensamblado se pueden tener problemas en la puesta de soldadura, volumen y área de la misma; así como también en la puesta de componentes, dentro de los más importantes. El sistema de inspección permite hacer estas detecciones pero es necesario realizar las pruebas correspondientes e implementar los algoritmos pertinentes para ello.
3. El sensor láser utilizado es de punto, es decir, se obtiene una lectura por cada muestreo. En este trabajo se hace un análisis utilizando un sensor láser de segmento y se obtiene el impacto que tendría en costo, procesamiento de los datos y tiempo de inspección total, pero es necesario realizar las pruebas reales. Aquí es pertinente señalar que fue aprobado este proyecto ante CONACYT y sólo resta hacer las pruebas correspondientes.

Referencias

- [1] J. S. Albus. A theory of intelligent machine systems. In *IEEE/RSJ International workshop on intelligent robots and systems IROS'91*, pages 3–5, Osaka, Japan, November 1991.
- [2] J. Benson. Defect-detection strategies. *Circuits Assembly*, May 2007.
- [3] S. Bentzen. Solder Paste Printing. In *STM in focus*, October 2000.
- [4] H. Bhat and D. Clark. Using in-line inspection PCB assembly yields. *Electronics Engineer*, December 1999.
- [5] D. Burr. Printing Guidelines for BGA and CPS Assemblies. In *SMT'98*, pages 417–424, 1998.
- [6] R. T. Chin and C. A. Harlow. Automated Visual Inspection: A survey. *IEEE Transacion on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4:557–573, November 1982.
- [7] H. Cho and W. S. Park. Neural Network Applications in Automated Optical Inspection: State of the art. *SPIE*, 4789:224–236, 2002.
- [8] P. B. Chou, A. R. Rao, M. C. Struzenbecker, F. Y. Wu, and V. H. Brecher. Automatic defect classification for semiconductor manufacturing. *Machine Vision and Applications*, 4(4):201–214, 1997.
- [9] D. Clark. 3-D Solder Paste Inspection. In *SMT*, January 2001.
- [10] J. Clech. Flip-Chip/CPS Solder Paste Inspection Strategy and Solder Volume Effects. In *SMT'98*, pages 315–323, 1998.
- [11] Narendra B. Dahotre and Sandip P. Harimkar. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Springer, 2008.

- [12] A. de Luca, A. Redondo, and H. Dominguez. Report for sony mexico on the design of an automatic electronic board inspection system using a laser sensor. Cinvestav, Mexico city, Mexico, March 2010.
- [13] Hector Dominguez, Adriano de Luca, and Arturo Redondo. Laser sensor setup for pcbs automatic inspection system. October 8 2011.
- [14] Hector Dominguez, Adriano de Luca, and Arturo Redondo. Novel automatic inspection technique for detecting thermal residual deformation on pcbs using a laser sensor. In *The 9th International Conference on Computing, Communications and Control Technologies: CCT 2011*, Orlando, Florida USA, March 27-30 2011.
- [15] L. Han, A. Voloshin, and I. Emri. Study of the multilayer PCB CTEs by moiré interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 42:613–626, 2004.
- [16] Y. Hara, H. Doi, K. Karasaki, and T. Lida. A System for PCB Automated Inspection Using Fusorescent Light. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10:69–78, January 1998.
- [17] T. Hidvégi and P. Szolgay. Some New Analogic CNN Algorithms for PCB Quality Control. In *European Conference on Circuit Theory and Design*, August 2001.
- [18] T. W. Hui and G. K. H. Pang. Solder paste inspection using region-based defect detection. *International journal of advanced manufacturing technology*, 42:725–734, 2009.
- [19] Z. Ibrahim, S. A. R. Al-Attas, Z. Aspar, and R. Ghazali. Performance evaluation of wavelet-based PCB algorithm for printed circuit board (PCB) inspection. *Journal Technology*, 35:39–54, 2001.
- [20] Research International. Solder Reflow Technology Handbook. Research international. www.research-intl.com.
- [21] S. K. Johnson. 3D Inline Solder Paste Inspection. In *Benefit Realized*. Agilent, October 2003.
- [22] B. Kelley and J. Weisgerber. Inline Component Placement Inspection: Lowering PCB Assembly Costs with Continuous Quality Improvement. Technical report, GSI Lumonics, 2002.
- [23] N. Khafifah Khalid, Z. Ibrahim, and M. Shukri Zainal Abidin. An algorithm to group defects on printed circuit board for automated visual inspection. *IJSSST*, 9, May 2008.

- [24] E. B. D. Lees and P. D. Hensshaw. Printed Circuit Board Inspection - A Novel Approach. In *SPIE Automatic Inspection Measurements*, 1986.
- [25] D. Mendez. An Integrated Test and Inspection Strategy. In *Apex 2000*, 2000.
- [26] M. Moganti, F. Ercal, C. H. Dagli, and S. Tsunekawa. Automatic PCB Inspection Algorithms: A Survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 70:287–313, March 1995.
- [27] T. Molamphy and T. Niermeyer. Solder paste inspection for the SMT line: 3D In-line systems come of age. In *Electronic Production and Test*, May 2003.
- [28] S. Oresjo. What consider when selecting the optimal test strategy. Technical report, Agilent Technologies, 2004.
- [29] M. Owen and J. Hawthorne. Process Control for Solder Paste Deposition. In *SMTA '99*, pages 488–493, 1999.
- [30] Khandpur R. S. *Printed Circuit Board, Desing, Fabrication, Assembly and Testing*. Electronic Engineering, 2006.
- [31] J. Weisgerber and D. Tan. The Science Behind Conveyor Oven Thermal Profiling. KIC Thermal Profiling. www.kicthermal.com.
- [32] J. Weisgerber and D. Tan. Pre-Reflow, Inline, 3-D inspection. *Circuits Assembly*, November 2003.