

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Reducción de fuentes de error en la medición de la colocación de dispositivos de montaje superficial”

T E S I S

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA

Ing. Jose Juan Mijares Chan

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Miguel Bravo Zanogera**

MEXICALI, B. C.

MAYO DE 2008

RESUMEN de la Tesis del Ing. Jose Juan Mijares Chan, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA. Mexicali, Baja California, México. Enero de 2008.

“Reducción de fuentes de error en la medición de la colocación de dispositivos de montaje superficial”

Resumen aprobado por:

Dr. Miguel Bravo Zanogera

Director de tesis

En la actualidad, la medición de la precisión de la colocación de dispositivos de montaje superficial se ve comprometida con la miniaturización del empaque de los dispositivos, el costo de las pruebas y la diversidad de equipos de medición y montaje. Asimismo, los estándares de medición y las implementaciones en la industria no contemplan la reducción de error en la metodología de medición. Por ello, este documento plantea no solo una metodología general contemplando la reducción del error y la resolución óptica del sistema, sino también su uso en combinación con el mantenimiento preventivo de los equipos de montaje y el impacto en la calidad en la empresa Sony Baja California en Mexicali, Baja California, México.

Palabras clave: IPC-9850, SMT, defectos de Montaje, MTF, fiduciales, error de desplazamiento, IMATEST, CMM.

ABSTRACT of the thesis, presented by Jose Juan Mijares Chan, in order to obtain the MASTER of ENGINEERING DEGREE. Mexicali, Baja California, México. January, 2008.

“Reducing the sources of error in the measurement of Surface Mount Devices placement”

Approved by:

PhD. Miguel Bravo Zanogera

Thesis Advisor

Actually, the measurement accuracy of surface mount device placement is challenged by the package miniaturization, the cost of testing, and the diversity of measurement and placement machines. Additionally, the current measurement standards and the industry implementations do not intend to reduce the errors in the measurement methodology. Therefore, this document presents not only a general methodology that considers the error reduction and the system optical resolution, but also its combination with the preventive maintenance for placement machines and its impact on Sony Baja California located in Mexicali, Baja California, Mexico.

Keywords: IPC-9850, SMT, Mount defects, MTF, fiducials, displacement error, IMATEST, CMM.

Agradecimientos

Lograr esta meta requirió del apoyo de numerosas personas a quien quisiera agradecer su tiempo, dedicación, orientación, comentarios y asesorías aportadas en diferentes etapas del proyecto de investigación. Tal es el caso de mi comité de tesis integrado por el Dr. Miguel Bravo, M.I. Maximiliano Vera, Dr. Ángel Gabriel Andrade, M.C. Guillermo Galaviz y Dr. Marco Antonio Reyna Carranza. De la misma forma agradezco a mis compañeros de trabajo en Sony Baja California, por apoyarme con este proyecto, tal es el caso de Horman Millán, Rogelio Ruiz, Judith Amaral, Karitina Sosa, Carlos Meza, Armando Valenzuela, Francisco Velázquez, Edgar Sanchez, Ismael Gutiérrez, Ricardo González, Erendida Alapizco, Joel Torres y Alejandra Erbe.

También quisiera agradecer a mi familia y amigos cercanos por el apoyo y comprensión de este esfuerzo.

Índice de contenido

	<u>Página</u>
Índice de figuras.....	iii
Índice de tablas.....	vi
Introducción	1
1 Antecedentes.....	5
1.1 Tecnología SMT en la Industria electrónica	5
1.2 La calidad en los ensambles de PCBs	9
1.3 Fundamentos de 6σ	9
1.4 Defectos causados por equipos de posicionamiento de SMDs	15
1.4.1 Componentes mal posicionados o desalineados.....	16
1.4.2 Componentes con efecto Manhattan o tombstones	18
1.4.3 Componentes caídos o faltantes	19
1.5 Método para caracterizar equipos de posicionamiento de SMDs, IPC-9850.....	20
1.5.1 Justificación del IPC-9850.....	20
1.5.2 Implementación.....	21
1.5.3 Medición de las características de los equipos de posicionamiento.....	22
1.6 CMM – Máquina de mediciones coordenadas	30
1.6.1 Mecanismo de un CMM	30
1.6.2 Puntas de prueba	32
1.7 Quick Scope200Z.....	33
1.7.1 Control de movimiento	34
1.7.2 Sistema de iluminación	35
1.7.3 Sensor CCD	36
2 El caso de estudio y los métodos de análisis.....	38
2.1 Medición de la precisión del desplazamiento.....	39
2.2 Medición de la sensibilidad de la cámara.....	41
2.2.1 Evaluación del método de iluminación.....	41
2.2.2 Evaluación de la respuesta de la cámara a la iluminación.....	42
2.2.3 Evaluación de la repetividad de la iluminación	42
2.3 Propuestas para reducción de error en la medición.....	43
2.4 Función de Transferencia de modulación: capacidad para las mediciones de resolución óptica.....	45
3 Resultados.....	52
3.1 Incertidumbre causada por el sistema de movimiento	52
3.2 Incertidumbre en la sensibilidad de la cámara	53

3.2.1	Incertidumbre causada por la evaluación de funciones.....	56
3.3	Resumen de las contribuciones de error.....	56
3.4	Propuestas para reducción de error	57
3.4.1	Propuesta para sistema de iluminación	57
3.4.2	Medición de la capacidad del sistema óptico	59
3.4.3	Propuesta para sistema de movimiento	62
3.4.4	Propuesta para reducción de tiempos.....	65
3.5	Medición de resultados en el caso de estudio.....	67
4	Conclusiones	68
	Bibliografía.....	70
	Apéndice	72
A.1	Medición de repetividad y precisión.	72
A.2	Programas para la evaluación de la precisión del desplazamiento.....	75
A.3	Programa para la medición de la sensibilidad del CCD y la curva de transferencia de fotones.....	77
A.4	Programa para la reducción de error en el desplazamiento usando Método A.	78
A.5	Programa para la reducción de error en el desplazamiento usando Método B.....	80

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1.1 Configuración de línea de SMT	6
1.2 (a) Procedimiento de mantenimiento y ajuste para la precisión de montaje, (b) Comparación de dimensiones entre componentes 1005, 0603, 0402, 01005 y la cabeza de un cerillo	7
1.3 (a) Función de densidad probabilística, (b) límites de un proceso, (c) Relación entre la forma de la curva y la variación del valor de Cp, (d) Variación del valor de Cpk y su relación con el desplazamiento de la curva en la grafica.	12
1.4 Comportamiento de indicadores estadísticos a la variación de nivel sigma.....	14
1.5 (a) Fuentes de defectos de SMT previos a soldar, (b) Componentes mal posicionados, (c) Corte transversal del mecanismo del efecto Manhattan en los SMDs, y (d) Componentes faltantes.....	16
1.6 Ciclos de transferencia y ensamble de un panel y cuatro paneles consecutivos	23
1.7 (a) Ejemplo de detección del centroide, donde el rectángulo es el cuerpo del chip, se detectan las esquinas, se traza una recta entre las esquinas contrarias y la intersección de estas es el centroide; (b) Método b de cálculo de ángulo de rotación, partiendo del (a) se calculan los puntos medios entre 2 de las esquinas y se traza una recta que luego es calculada por su ángulo contra la horizontal; (c) Método c de cálculo de ángulo de rotación, similar al método b pero con los lados más cortos de del cuerpo del chip; (d) Método d de cálculo de ángulo de rotación, de manera similar pero se toma todas de las orillas trazadas entre las esquinas detectadas y se calcula el ángulo promedio contra la horizontal; (e) Tablero de vidrio calibrado propuesto en el IPC-9850, para medir la capacidad del CMM al calcular el centro y detectar la rotación de la figura del chip.....	28
1.8 Diseño convencional de CMMs	31
1.9 Quick Scope 200Z de Mitutoyo	32
1.10 Diagrama a bloques del QS 200Z	33
1.11 Diagrama de sistema mecánico	34
1.12 Sistema de iluminación	35
1.13 Especificaciones del sensor CCD.....	36
1.14 (a) Configuración del sensor CCD y construcción interna del semiconductor, (b) Gráfica característica de la sensibilidad del CCD.....	37

2.1 (a) Trayectoria de recorrido de la punta de prueba o cámara del CMM sobre el tablero de prueba, construido con el método de electrolitografía, el cual permite una precisión de $\pm 1\mu\text{m}$, donde se conoce una distancia patrón entre los puntos A y B; (b) ejemplo de la detección del centro de una fiducial, donde las secciones rectangulares se les aplico el operador de sobel y son marcadas de color rojo los contornos para resaltarlas. De estas secciones rectangulares ya procesadas se selecciona un punto por cada una para poder calcular el centro de la fiducial.....	40
2.2 Onda senoidal ejemplificando el uso de la MTF.....	46
2.3 (a) Proceso de cálculo de MTF basado en la transformada de Fourier, (b) Simulación de patrón senoidal y de barra con respuesta de MTF (imagen proporcionada por Imatest LLC).....	49
2.4 (a) Método para calcular la MTF basado en la función de dispersión de orilla, (b) perpendicularidad al contorno de la pieza de calibración, (c) Consolidación de perfiles del contorno.....	51
3.1 Muestras de mejores condiciones de iluminación (a) pro reflexión, donde la distribución del objeto se sobrepone a la del fondo; (b) por transmisión, donde las distribuciones de objeto y fondo son notablemente separadas.....	54
3.2 (a) Comparación entre la desviación estándar de la intensidad con iluminación por reflexión y transmisión, de ahí se puede notar como el método de transmisión cuenta con una menor desviación estándar. (b) En la ganancia media del sensor CCD vs. el porcentaje de voltaje del sistema de iluminación por transmisión, se observa como aumenta rapidamente la saturación del sensor.	55
3.3 Gráfica característica de la lámpara fluorescente del sistema de iluminación	57
3.4 (a) Espectro de respuesta de un LED, (b) Curva de transferencia de fotones a magnificación de 1x	58
3.5 Ejemplo de resultados de análisis para cálculo de la MTF	60
3.6 (a) Método A: Usando el concepto de fiduciales globales, (b) Método B: Usando el concepto de fiduciales locales	63
3.7 (a) Variación de las mediciones en el eje X, (b) Variación de las mediciones en el eje Y	64
3.8 Pasos para procesar el centroide y el ángulo de rotación de la pieza	66
3.9 (a) Distribución de defectos de hace 1 año, (b) Distribución de defectos más recientes, utilizando un muestreo mas continuo cada 4 días y planeando reparaciones en base a resultados.....	67
A.6.1 Tablero de pruebas recomendado en el IPC-9850.....	73

A.6.2 Estandares de montaje.....	75
A.6.3 Programa CNC de desplazamiento entre dos puntos.....	76
A.6.4 (a) Programa CNC de desplazamiento de la pieza, (b) programa de reconocimiento del objeto, detección del centroide y cálculo de la orientación	79
A.6.5 (a) Programa CNC de desplazamiento de la pieza, (b) programa de reconocimiento del objeto, detección del centroide y cálculo de la orientación partiendo de la orientación de las fiduciales.....	80

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
1.1 Capacidad σ / nivel σ vs. DPMOs	13
1.2 Causa-Efecto de los componentes desalineados	17
1.3 Causa y acciones correctivas para componentes con efecto Manhattan	18
1.4 Causa y acciones correctivas para componentes caídos o faltantes	19
1.5 Especificaciones de fábrica del QS200Z	34
3.1 Resultados del error de la posición A	52
3.2 Resultados del error de la posición B	53
3.3 Resultados del error causado por la iluminación	54
3.4 Tabla resumen de las contribuciones de error.....	56
3.5 Resultados de mediciones de MTFs a diferentes magnificaciones	59
3.6 Criterios de calidad para SMT	61
3.7 Capacidad de medición del QS200Z	61
3.8 Resultados de evaluación de métodos A y B	64

Introducción

Desde el nacimiento de la Tecnología de Montaje Superficial (SMT), a mediados de los años ochenta, los usuarios de los equipos de posicionamiento de componentes han buscado determinar qué equipo cubre las demandas del ambiente de trabajo. Así, las máquinas más rápidas, con mayor exactitud en incorporar los componentes y generar la menor cantidad de errores, se consideraban las mejores, y hasta hoy esto persiste. Pero el proceso de SMT se ha vuelto considerablemente más exigente. Ante esto, traducir los resultados de conocimientos científicos a acciones prácticas en procesos de producción y de mercado, se convierten hoy en día en un inevitable contexto del trabajo. El tamaño del empaquetado de los componentes se ha contraído y las posiciones de la colocación se van dibujando más cerca una de otra. Los equipos de posicionamientos efectúan la colocación de componentes en forma más rápida y con mayor exactitud, pero además deben ser económicamente competitivos.

Hasta el año de 2002, las empresas que manufacturan máquinas de posicionamiento no habían fijado un estándar en común, en el cual pudieran especificar su desempeño, consecuentemente, cada fabricante de equipos medía la razón de posicionamientos de componentes por hora (de las siglas en inglés “cph”, por “Component placement per hour”), de la manera que le fuera más favorable a sus máquinas. Ante esto, los vendedores de equipos de posicionamiento, seleccionaban sus propios parámetros y metodologías para especificar las capacidades del rendimiento y posicionamiento, haciendo difícil la comparación de su funcionamiento. Lo anterior ocasionó que los usuarios para obtener datos comparables, debían conducir sus propias evaluaciones independientes

teniendo como único parámetro el que las maquinas se encontraban bajo las mismas condiciones. Esta forma de definición de capacidades y posicionamientos generaba a los usuarios pérdidas de tiempo, y altos costos a los proveedores. Sin embargo, todo lo anterior no exentaba que el rendimiento y la precisión del posicionamiento fueran relacionados a la frecuencia de mantenimiento y a la forma en que se realizaban las mediciones.

En el 2003, el subcomité del Instituto de Circuitos Impresos (IPC), formado por usuarios y proveedores de equipos de posicionamiento de SMT, desarrollaron el estándar IPC-9850, que simplifica el proceso de la evaluación al estandarizar los parámetros de desempeño que describen la capacidad de las maquinas de posicionamiento. En estos equipos el rendimiento de colocación de componentes va relacionado a la velocidad y la exactitud de posicionamiento. Por su parte, el estándar especifica una metodología por la cual los parámetros de capacidad son medidos, y sus resultados finales permiten a los usuarios solamente medir la capacidad del equipo dejando la implementación del estándar a la selección del usuario. En este sentido, las empresas de manufactura de dichos equipos, fijan la frecuencia del mantenimiento y el método de reparación. Por lo que surge la necesidad de crear una metodología de medición enfocada a mantener el nivel de calidad a través de la mejora continua. Aunado a esto, el análisis del desempeño de la Máquina de Mediciones de Coordenadas (CMM), cuya función es evaluar la capacidad de la máquina de posicionamiento de SMT en términos estadísticos, se efectúa en forma particular y no en la totalidad de posibilidades del universo de evaluación, por lo que surge también la necesidad de contar con métodos opto-electrónicos para fijar tanto la máxima precisión de la medición del equipo como la confiabilidad de dicha medición.

Tomando en cuenta lo antes expuesto y considerando que la caracterización estima y tipifica el comportamiento de una máquina de acuerdo a sus parámetros, y que estos cambian según las situaciones y el tiempo transcurrido desde el último mantenimiento, surge la necesidad de clarificar el método de medición y el desempeño de la Máquina de Mediciones de Coordenadas. En este contexto y teniendo como base el estudio de diversas metodologías de medición de la precisión de posicionamiento de SMTs, el objetivo general del presente estudio fue: *Crear una metodología de medición para mantener el nivel de calidad a través de la mejora continua de los ciclos de mantenimiento y recalibración de*

las máquinas de posicionamiento de SMTs, con el uso de métodos opto-electrónicos que permitan fijar tanto la máxima precisión de la medición del CMM como el grado de confiabilidad de dicha medición.

Para lo anterior, fue necesario lograr los siguientes objetivos específicos:

A) Mejorar el método de medición basado en el tipo de maquinas de posicionamiento de SMT, el funcionamiento de las partes del CMM, y los métodos más predominantes en el mercado actual.

B) Optimizar el algoritmo de detección de partes, basados en los métodos de iluminación empleados, y el método de detección de bordes.

C) Definir la resolución y las zonas de confianza de las mediciones.

D) A través de compensación por software, reducir el error de la medición contribuido por las deformaciones de los lentes

E) Rediseñar la frecuencia del método de mantenimiento preventivo para asegurar la prevención de defectos

El proyecto toma como caso de estudio a la máquina de posicionamiento en una línea de ensamble con un modelo basado en computadora, Sony E1100, y a una Máquina de Mediciones de Coordenadas, Mitutoyo QS200Z, localizados en la empresa Sony Baja California, en Mexicali, Baja California.

La base teórica plantea: (1) La descripción de los actuales equipos a analizar, (2) el estudio del método de medición, (3) el análisis del desempeño del CMM y (4) el estudio de su aplicación en el desempeño de una línea de producción.

El alcance del proyecto abarca únicamente a la metodología de medición y la adaptación del CMM para lograr una medición lo más precisa posible. Se centra en el desempeño del CMM para la detección de objetos, las limitaciones de fabricación, el método para medir la precisión de montaje y el impacto de las mediciones sobre el producto en una nueva rutina bajo un programa de mantenimiento preventivo. En lo referente al estudio de la aplicabilidad del sistema propuesto, su aplicación es evaluada en

Sony de Baja California, como caso de estudio. Y se desarrollan nuevas herramientas de análisis con la empresa Sony FA, empresa de manufactura de las E1000, citada y referida en este documento.

No se considera dentro del alcance, al estudio de la planificación, la coordinación o el control de los métodos recomendados para controlar la calidad de montaje, ya que dichos aspectos fueron abordados de forma tangencial, en los apartados del marco de referencia, y el análisis. El material que se presenta aquí cuenta con limitaciones debido a la política de confidencialidad de información de Sony de Baja California.

Para la presentación del desarrollo del estudio, en el primer capítulo se presenta el apartado de antecedentes donde se explican los métodos actuales para realizar la medición del desempeño de los equipos de posicionamiento y el alcance que pueden llegar a tener este tipo de defectos. En el segundo capítulo se presenta el apartado del caso de estudio enfocándose en el análisis del funcionamiento del CMM (Quick Scope 200Z de Mitutoyo), su capacidad y las metodologías sugeridas para reducir el error causado por deficiencias en la manufactura del mismo. En la sección de resultados, el estudio presenta iniciativas para la gestión de proyectos en general y la adecuación de los actuales estándares de la industria para el mantenimiento preventivo de las máquinas de posicionamiento de SMDs.

Capítulo 1.

Antecedentes

Hoy en día en la industria electrónica, la tecnología de montaje superficial (SMT) se refiere a una tecnología avanzada de interconexiones de componentes usadas en un montaje sobre el mismo plano. SMT incluye varias tecnologías de circuitos que no utilizan tecnología THT (por las siglas en inglés “Through hole technology”), que también es otra técnica ampliamente conocida y aplicada.

1.1 Tecnología SMT en la Industria electrónica

La SMT es considerada como una de las más recientes e importantes tecnologías en el ensamble de circuitos electrónicos. A diferencia de la tecnología de THT, donde la inserción de componentes montados (IMC) es a través de un tablero y posteriormente soldado, en la SMT los componentes son soldados directamente a la superficie del tablero, inmediatamente después del montaje. Esta diferencia tiene gran impacto en la composición de los productos y de su proceso de manufactura, ya que como resultado, se producen productos más pequeños, ligeros, y de menor costo de manufactura.

Ante esto, la industria electrónica moderna cambió hacia el uso de SMT. La reducción en tamaño de tableros de circuitos impresos, las altas velocidades de oscilación, la mejora del aseguramiento de la vida de los componentes, la simplificación de la automatización de ensamble, y los bajos costos de los materiales y los activos de la empresa son las principales razones de este cambio. Otras ventajas son las relacionadas con el desempeño del circuito impreso (PCB) tales como los retardos de propagación de los circuitos, inmunidad al ruido e interferencia. Además de la facilidad de manufactura de los PCBs, la flexibilidad de las máquinas de posicionamiento cuando elaboran el ensamble; y la calidad de los PCBs debido a al grado de control sobre la línea de ensamble.

Actualmente, la mayoría de los procesos de ensamble SMT son similares y altamente automatizados, las maquinas de ensamble que son controladas por computadoras son colocadas en líneas de producción o celdas, ver Figura 1.1. El número de componentes de montaje superficial (SMDs) que se llegan a posicionar en los PCBs fluctúan entre cientos y miles, y las máquinas de posicionamiento difieren dependiendo del estilo y tamaño de los SMDs y también del promedio de producción.

Por su parte, cada máquina de posicionamiento o montadora de componentes en la

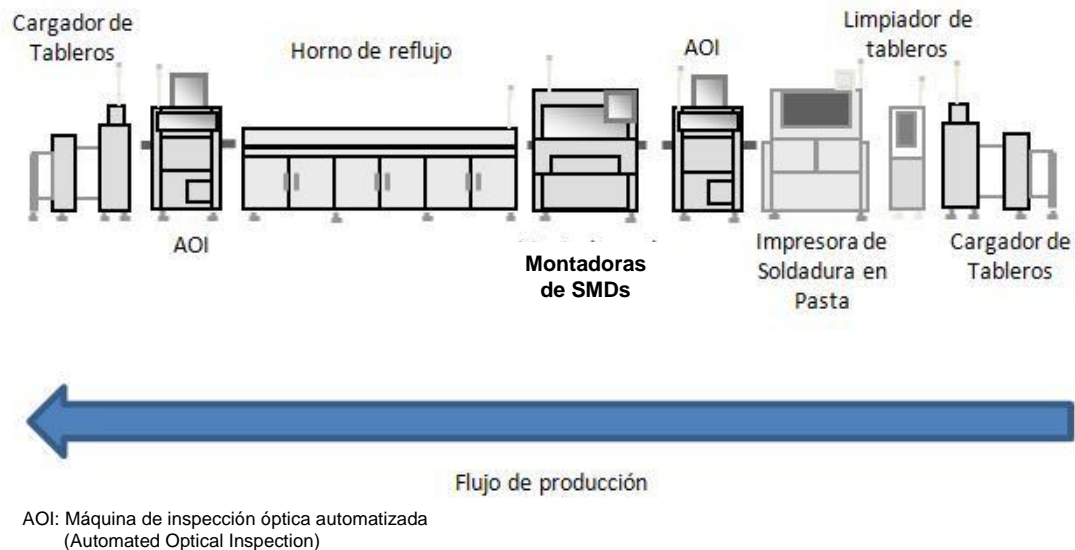


Figura 1.1 Configuración de línea de SMT

línea de ensamble tiene uno o más alimentadores que sostienen los SMDs al ser montados. Y cuando la línea de producción es cambiada a otro tipo de tablero, se integra una nueva configuración para cambiar los alimentadores y reprogramar el proceso de ensamble.

En las líneas de ensamble de SMT, las configuraciones y reparaciones de los equipos pueden llegar a ser costosos y consumir mucho tiempo. Y aunque el tiempo de vida de las partes de las maquinas son considerados en los programas de mantenimiento y reparación del equipo, estos programas de mantenimiento no suelen estar contemplados para lograr un nivel tal que el rendimiento del equipo sea el más adecuado al producto que se manufactura. Adicionalmente, como todo lo anterior es desarrollado directamente por cada usuario del equipo, se elimina la posibilidad de la estandarización entre los equipos.

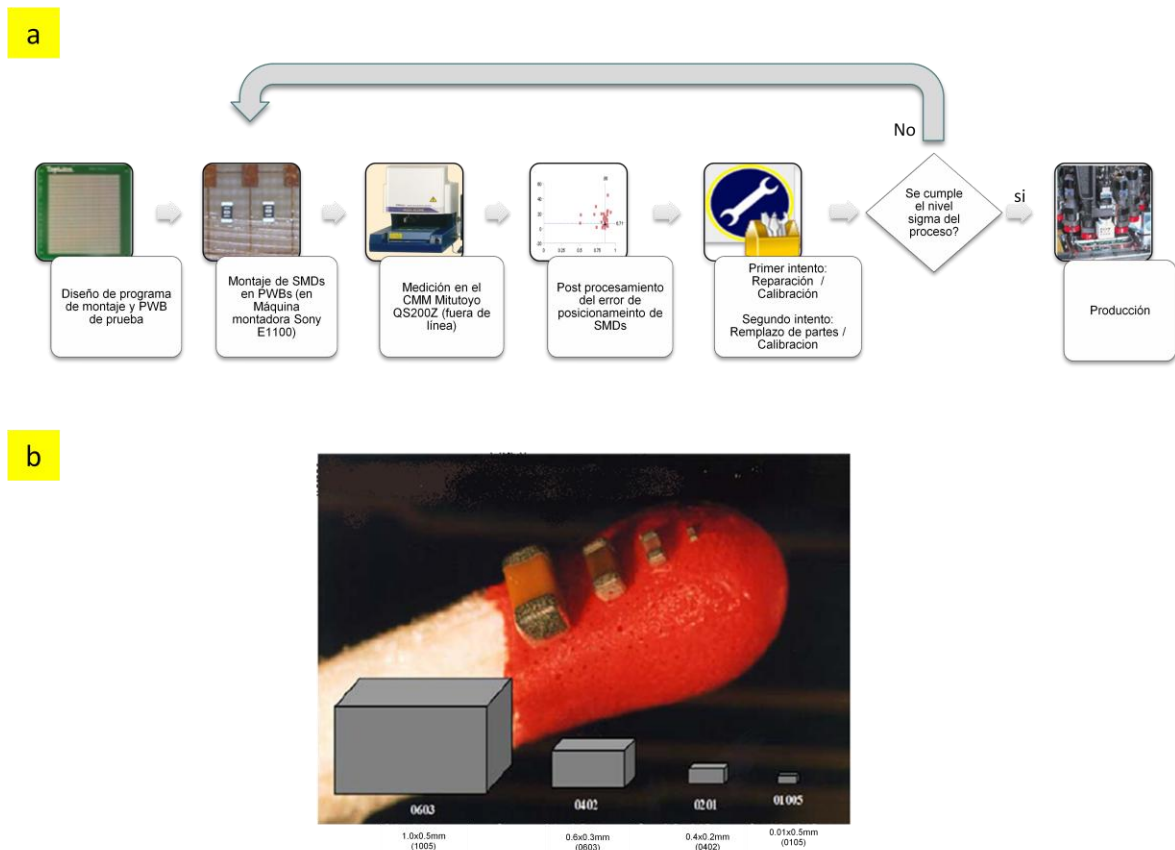


Figura 1.2 (a) Procedimiento de mantenimiento y ajuste para la precisión de montaje, (b) Comparación de dimensiones entre componentes 1005, 0603, 0402, 01005 y la cabeza de un cerillo

En el caso de Sony Baja California, se cuenta con un CMM fuera de línea para realizar la medición de la precisión de montaje de las máquinas de posicionamiento. Esta actividad se realiza al menos 1 vez al mes y lleva alrededor de 35 a 45 minutos para el técnico de mantenimiento usando la configuración actual del CMM, la cual es basada en un documento interno. Aunado a esto, no se garantiza la precisión del equipo para realizar mediciones y se desconoce la capacidad para realizar mediciones confiables para componentes de tipo 1005, 0603, y 0402, ver Figura 1.2(b).

El proceso de evaluación consiste en realizar las mediciones de las posiciones de los SMDs comparándolas con las posiciones diseñadas y su error causado por el equipo de montaje es retroalimentado al técnico de mantenimiento que después modifica los registros de calibración del equipo de montaje. Esto se resume en la Figura 1.2(a).y se detalla en los siguientes pasos,

1. Generar un PWB de prueba junto con un programa de montaje de componentes, los cuales son alineados a través de un par de fiduciales localizadas en las esquinas del PWB.
2. Realizar el montaje de los SMDs siguiendo el algoritmo para alinear el PWB. Esto es,
 - a. Colocar el PWB en la misma posición, cada vez que se evalúa.
 - b. Reconocer el centroide de las dos fiduciales.
 - c. Recalcular la rotación y estiramiento del PWB contra el programa de montaje
3. Generar un programa de medición para comparar las posiciones montadas contra las posiciones teóricas de los componentes
4. Realizar las mediciones de dichos errores de posicionamiento de los SMDs, esto se convierte en información estadística que será utilizada para realizar el mantenimiento de los equipos de montaje.
5. Basado en la información estadística, se realizan los ajustes finos, reparaciones o remplazo de partes.

Este proceso de mantenimiento, principalmente entre los puntos 3 y 4 descritos anteriormente son los que consumen un tiempo de 35 a 45 minutos.

1.2 La calidad en los ensambles de PCBs

En este apartado se presentan las técnicas más relevantes del análisis con 6σ , usados en la industria de ensamble electrónico, aunadas a la perspectiva de evaluación propuesta en el estándar IPC 9850, y los defectos que se pueden generar por el mal funcionamiento o descalibración de un equipo de posicionamiento de SMDs.

A partir de que la importancia del control de calidad en el ensamble de PCBs nunca ha sido mayor que ahora, debido a los tamaños de miniaturización de los componentes y del ensamble, la capacidad de supervisar y de analizar tendencias con precisión en el posicionamiento de componentes en tiempo antes de que se conviertan en un problema de calidad nunca ha sido más crítica.

El análisis estadístico basado en los fundamentos del programa de 6σ de Motorola, es de los medios más eficaces para determinar resultados de la exactitud de posicionamiento de componentes. Así, el medir la calidad de una manera cuantificable permite analizar el desempeño del equipo y localizar las fallas.

Esta metodología en conjunto con los actuales estándares de la industria, como el IPC-9850 2002, establecidos para caracterizar, verificar y estudiar la capacidad de los equipos de SMT son herramientas esenciales en diagnóstico y mantenimiento de los equipos de posicionamiento de SMDs, que permiten evitar el mal ensamble de componentes sobre el producto, y mejorar la calidad en general del producto.

1.3 Fundamentos de 6σ

A la fecha, las grandes compañías en la industria de semiconductores y de ensamble electrónico como Motorola, entre otras, han revolucionado el principio de medición cuantificable, y aun cuando se desarrolló durante las dos décadas pasadas, su definición se ha ido redefiniendo constantemente.

El sistema de administración de 6σ conduce claramente alrededor de una estrategia de negocio y los métricos, que en su mayoría reflejan el acierto con las estrategias aplicadas. Además, provee una forma de trabajo en la que se ubican las prioridades ante los recursos del proyecto que mejorarán los métricos, y también conduce a los líderes para que administren de manera eficiente, rápida y sostenible sus esfuerzos por mejorar los resultados del negocio.

Utilizando la metodología 6σ se puede representar el comportamiento de un proceso y describirlo a través de sus indicadores. Para describir un proceso generalmente se utiliza el modelo del comportamiento estadístico más exacto posible. Para el caso de máquinas de posicionamiento de SMDs la curva normal es confiable, ya que ésta es descrita por la siguiente fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

Donde x es la variable independiente del proceso, la μ es la media y σ es la desviación estándar del proceso. Tal como se muestra en la Figura 1.3 (a), se puede apreciar la variación de la forma del proceso dependiendo del valor de la μ y la σ .

Otras formas de describir el proceso es a través de medir su capacidad. Ya que esta capacidad del proceso, utilizándolos índices de capacidad, compara la salida de un proceso en control, con los límites de especificación. La comparación se efectúa al crear una relación entre lo amplio de las especificaciones del proceso y los valores medidos del mismo proceso, esto es, al medirse en unidades de 6 desviaciones estándar del proceso.

A menudo, se requiere comparar la salida de un proceso estable con las especificaciones del proceso y hacer una declaración sobre como el proceso resuelve la especificación. Para hacer esto se comparan la variabilidad natural del proceso estable con los límites de la especificación de proceso.

Si casi todas las salidas del proceso están dentro de los límites de la especificación, se define como un proceso capaz. Esto se puede representar gráficamente como en la Figura 1.3 (b).

Hay varios estadísticos que se pueden utilizar para medir la capacidad de un proceso, como son [1]:

- Capacidad de proceso (C_p)
- Índice de capacidad de proceso, (C_{pk})
- Índice de capacidad del proceso desviado de la media, (C_{pm})

La mayoría de las estimaciones de los índices de la capacidad, son válidas únicamente si el tamaño de muestra utilizado es cerca de 50 valores, independientes de los datos.

Los estadísticos C_p , C_{pk} , y C_{pm} asumen que la población de los valores de los datos está distribuida normalmente. Si se asume que una especificación con dos por ambos lados, si μ y σ son la media y la desviación estándar, respectivamente, de un conjunto de datos y USL , LSL y T son el límite de especificación superior, inferior y el valor objetivo, respectivamente, entonces los índices de capacidad para la población están definidos por:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1.2)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (1.3)$$

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (1.4)$$

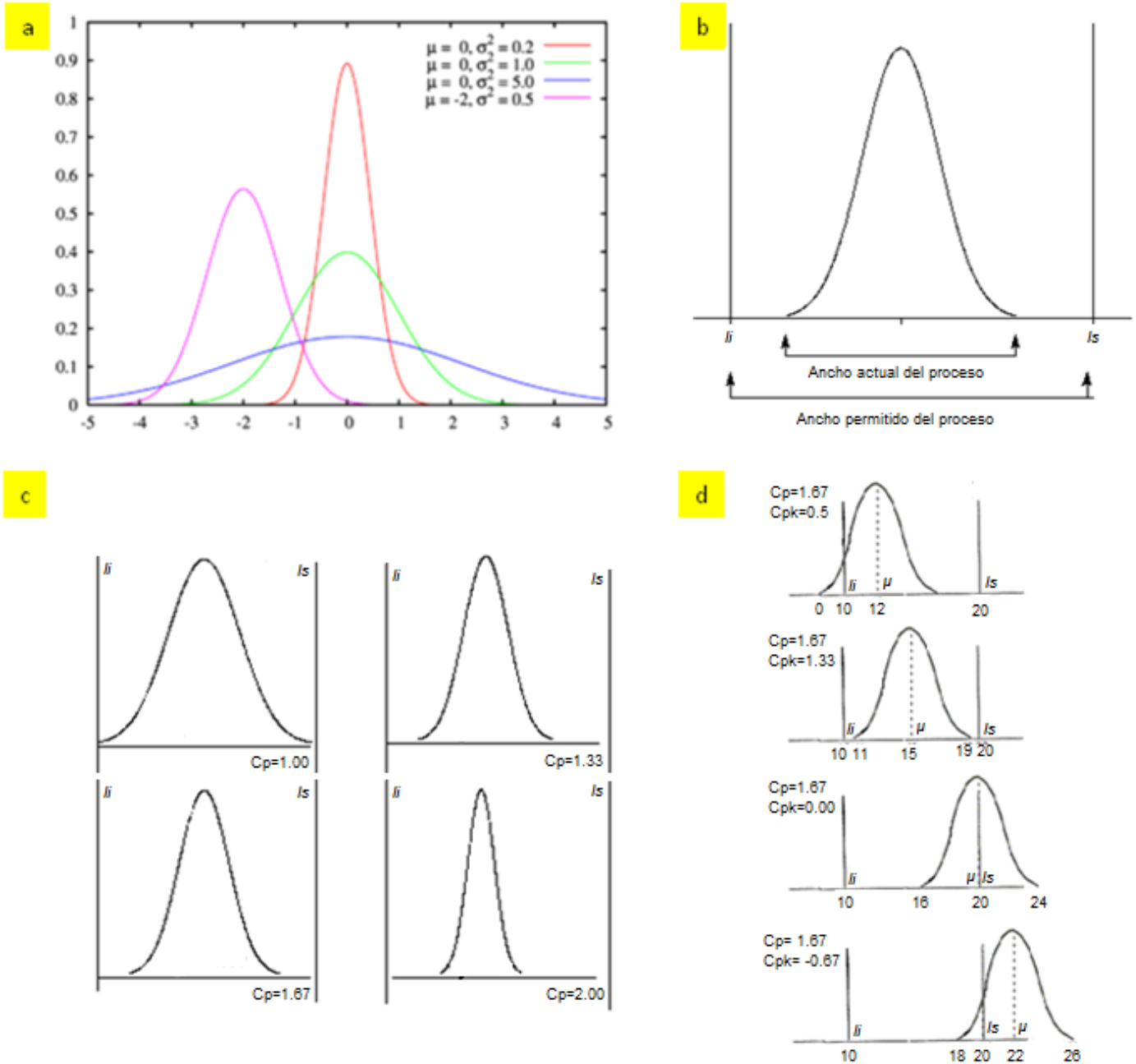


Figura 1.3 (a) Función de densidad probabilística, (b) límites de un proceso, (c) Relación entre la forma de la curva y la variación del valor de Cp, (d) Variación del valor de Cpk y su relación con el desplazamiento de la curva en la grafica.

Para darse una idea del efecto del cambio en el valor del C_p observe la Figura 1.3 (c). El efecto del cambio del valor del C_{pk} se ve indexado a la posición de la grafica al distribuirse entre los límites de especificación, esto se puede observar en la Figura 1.3 (d).

El valor de C_{pk} puede a llegar a ser máximo el valor de C_p .

Entre los indicadores importantes se encuentra el del nivel sigma, σ_{level} , que representa el número de desviaciones estándar entre el centro del proceso y límite de especificación, esto es:

$$\sigma_{level} = \min\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}, \frac{\mu - LSL}{\sigma}\right) \quad (1.5)$$

Y el de capacidad sigma, $\sigma_{capability}$, que permite relacionar el numero de defectos por millón de oportunidades (DPMOs) con la capacidad sigma del proceso. Tal como se muestra en la Tabla 1.1 la relación está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{capability} = 0.8406 + \sqrt{29.36 - 2.221 \ln(\text{dpm})} \quad (1.6)$$

$$\sigma_{capability} \approx \sigma_{level} + 1.5 \quad (1.7)$$

La ecuación 1.7 muestra el hecho de prevenir un desplazamiento de la media de 1.5 la desviación estándar sin llegar a notarlo al momento de hacer las mediciones.

Tabla 1.1 Capacidad σ / nivel σ vs. DPMOs

Nivel σ	Capacidad σ	DPMOs
4.5	6.0	3.4
4.0	5.5	32.0
3.5	5.0	233.0
3.0	4.5	1,350.0
2.5	4.0	6,210.0
2.0	3.5	22,750.0
1.5	3.0	66,807.0
1.0	2.5	158,655.0
0.5	2.0	308,538.0

Así el programa de calidad 6 σ expuesto por Motorola alienta a utilizar la medición del C_{pk} , C_p , y DPMOs para indicar el nivel de calidad del producto o del proceso de fabricación. A partir de esto, el término de un producto con calidad 6 σ es:

$$C_p = 2.0, C_{pk} = 1.5 \text{ y DPMO} = 3.4$$

Otro indicador es el de producción, o de 'Yield %', éste es porcentual y se mide al calcular substrayendo el total de defectos del total de oportunidades, dividido entre el total de oportunidades y multiplicado por 100. Esto es,

$$Yield\% = \frac{\#oportunidades - \#defectos}{\#oportunidades} \times 100\% \quad (1.8)$$

El mínimo a alcanzar cuando se aplican los principios de 6 σ a una máquina de posicionamiento de SMDs, es un nivel sigma de 4 (C_{pk} de 1.33 con un 1.5 σ de desplazamiento). Esto corresponde a un nivel de producción de 99.38%. A este nivel, se puede esperar tener 6,200 defectos por millón de componentes montados.

En otros estudios recientes, al observar la cantidad de componentes montados contra la cantidad de defectos en un año, al variar el nivel de sigma como en la Figura 1.4, se puede ver claramente que el monitoreo y seguimiento del desempeño de una máquina de posicionamiento de SMDs es clave para reducir los costos [2]

3σ	4σ
Yield%: 93.32%	Yield%: 99.38%
DPMO: 66,800	DPMO: 6,201
Cpk: 1.00	Cpk: 1.33
5σ	6σ
Yield%: 99.97%	Yield%: 99.9997%
DPMO: 230	DPMO: 3.4
Cpk: 1.67	Cpk: 2.00

Figura 1.4 Comportamiento de indicadores estadísticos a la variación de nivel sigma

Así la metodología de una manera proactiva para alcanzar y mantener los niveles de 4, 5 o 6 σ que serán tratados en este documento se pueden resumir en los siguientes pasos:

1. Reducir los tiempos por los que está en mantenimiento el equipo, a hacer un itinerario de mantenimiento.
2. Facilidad de rastreo / control de procesos: esto es a través del cálculo de Cp y Cpk del proceso.
3. El uso de herramientas para medir la precisión y el rendimiento del equipo de posicionamiento de manera periódica, en un método proactivo más que reactivo.
4. El mantenimiento periódico es inminente para sostener el nivel σ .

En suma, las herramientas de 6 σ son utilizadas para enfocarse en los defectos, en lugar de invertir en buscar los defectos, y así eliminar los defectos antes de que estos lleguen al producto o a los puntos de inspección.

1.4 Defectos causados por equipos de posicionamiento de SMDs

En la mayoría de los estudios, se ha indicado que la mayor proporción de defectos en el ensamble ya soldado, son resultado de las operaciones de manufactura previas a soldar. El posicionamiento de componentes ha sido identificado como la mayor fuente prevaleciente de estos de estos defectos [3]. Ver la Figura 1.5 (a). El número de defectos causados por el posicionamiento de componentes se incrementa con el uso de tecnologías de pequeñas separaciones entre terminales. Así las operaciones de SMT relacionadas con el montaje pueden ser clasificadas por los rubros más frecuentes, de la siguiente manera: (1) Componentes mal posicionados o desalineados, (2) Componentes con efecto Manhattan (tombstoned), (3) Componentes volteados, (4) Componentes caídos o faltantes

1.4.1 Componentes mal posicionados o desalineados

Tal como se muestra en la Figura 1.5 (b), la naturaleza de este tipo de defecto consiste en que el cuerpo del componente se encuentra posicionado teniendo más del 50% de sus electrodos fuera de las terminales de Cobre sobre las cuales será soldado. Este tipo de defectos ocasiona problemas en la confiabilidad de la interconexión de la terminal y el electrodo del componente. Generalmente este problema está relacionado a con múltiples causas que van desde la calibración del equipo hasta el SMD, ver Tabla 1.2.

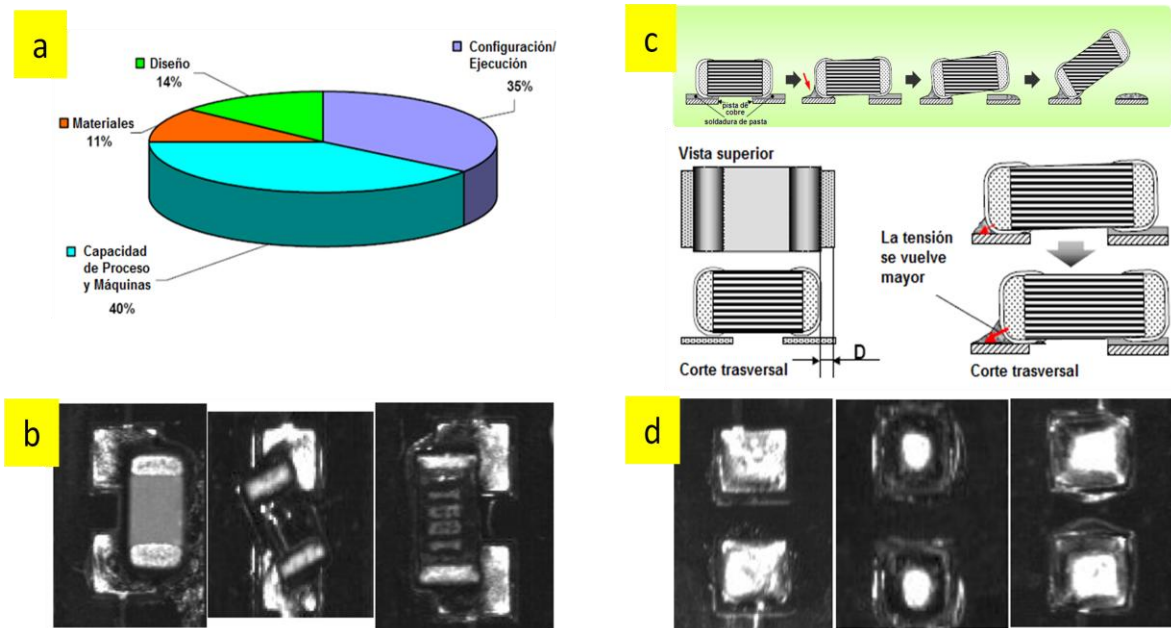


Figura 1.5 (a) Fuentes de defectos de SMT previos a soldar, (b) Componentes mal posicionados, (c) Corte transversal del mecanismo del efecto Manhattan en los SMDs, y (d) Componentes faltantes

Tabla 1.2 Causa-Efecto de los componentes desalineados

A. Relacionados con el equipo/proceso			
Posible causa	Acción correctiva comun	Actividades que requieren de un CMM	Descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs
1. El posicionamiento no es preciso	Se debe volver a entrenar el posicionameinto	O	O
2. El tablero está desalineado	Se verifica el equipo que carga el tablero.	X	X
3. Incorrecto alimentador seleccionado	Se modifica el programa y se usa el correcto o posiblemente requira un alineamiento del sistema de vision	X	X
4. El componente es rotado	verifique que la información de la rotacion sea correcta en el programa de posicionamiento	X	X
5. La revision del tablero es diferente a la del programa	Verifique las version del programa	X	X
6. El equipo necesita calibración	Calibre el equipo basado en el procedimiento recomendado por el fabricante del mismo Comprobar los engranajes de poleas para saber si hay resbalamiento en los ejes	O	O
7. Archivo de datos incorrectos usado	Carge el archivo correcto de datos	X	X
8. Las tolerancias del equipo de montaje no son adecuadas para la precision de un posicionamiento aceptable	El equipo no podra ser usado para la presición de posicionamiento requerida. Obtenga un equpo con la precisión de montaje aceptable.	O	X
9. El sistemas de visión no esta trabajando	Revise las connexiones electricas y fusibles: a) revise las dimensiones /composición de los objetivos; verifique que concuerden. B)la camara no esta viendo a las cabezas; es un problema de software. Verifique los componentes dentro del campo de vision.	O	O
10. El entrenamiento del posicionamientos de la superficie del tablero es incorrecto	Vuelva a entrenar el posicionamiento	O	O

B. Relacionados con el material o el proceso previo			
Posible causa	Acción correctiva comun	Actividades que requieren de un CMM	Descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs
1. El tablero esta desalineado	Verifique la posición de las fiduciales	O	O
2. Incorrecta impresión en el tablero	Verifique con los estandares de diseño y/o las listas de partes más actualizadas y los esquemanticos	X	X
3. Incorrecta operación de "pick up" del componente	Verifique con la lista de partes y el diagrama de diseño	O	O
4. El componente fue rotado	Verifique el proceso de descarga del componente	O	O
5. La revision del tablero es diferente a la del programa	Verifique las version del programa	X	X

CMM: Máquina de Mediciones de coordenadas.

SMD: Componente de montaje superficial.

1.4.2 Componentes con efecto Manhattan o tombstoned

Este defecto se presenta al momento de refluir la soldadura en pasta bajo el SMD, si el tiempo en que son soldados los electrodos del SMD no están sincronizados, es muy probable que esto lleve a causar el defecto.

Cuando uno de estos electrodos empieza a soldar existe una diferencia de tensiones sobre el cuerpo del componente tal como se muestra en la Figura 1.5 (c), y ocasiona el levantar el componente. Otras causas se muestran en la Tabla 1.3.

Las dos principales causas de este defecto son las diferencias de temperaturas en los electrodos al soldar, y la distancia D mostrada, la cual solamente puede incrementar al posicionarse de manera incorrecta el SMD. Su detección se limita a la inspección visual de los inspectores de calidad y la detección en pruebas eléctricas, lo cual no garantiza su detección dentro del proceso de montaje automático, las AOIs, que son los equipos posteriores a su montaje, se ven imposibilitadas de detectar los defectos por la similitud con los correctos montajes, esto ocasiona falsas aceptaciones [4].

Tabla 1.3 Causa y acciones correctivas para componentes con efecto Manhattan

A. Relacionados con el equipo/proceso			
Posible causa	Acción correctiva comun	Actividades que requieren de un CMM	Descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs
1. Exceso de movimiento en el horno de reflujo	Reducir el movimiento durante el reflujo	X	X
B. Relacionados con el material o el proceso previo			
Posible causa	Acción correctiva comun	Actividades que requieren de un CMM	Descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs
1. El posicionamiento del SMD no es preciso	Ajuste el posicionamiento o recalibre	O	O
2. Solderabilidad dispareja en las terminales o electrodos del componente	Verifique las variaciones de la solderability	X	X
3. El diseño de la terminal no es el adecuado	Rediseñe las terminales	X	X

1.4.3 Componentes caídos o faltantes

En este tipo de defectos, el SMD no se encuentra en la posición programada, de tal manera que al momento de estar en estado líquido la soldadura ninguna de sus terminales está en contacto con el tablero, ver Figura 1.5 (d). En la Tabla 1.4 , se muestran algunas de las principales causas de este defecto.

Tal como se puede observar en los tres tipos de defectos más sobresalientes es necesario el uso de un CMM y los defectos van relacionados con la descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs. Mientras en la industria, por lo general después de haber sido soldados los componentes se contempla un nivel de 100 a 300 dpms, dependiendo de la complejidad del tablero. El mejorar el proceso de montaje partiendo de

Tabla 1.4 Causa y acciones correctivas para componentes caídos o faltantes

Posible causa	Acción correctiva comun	Actividades que requieren de un CMM	Descalibración del equipo de posicionamiento de SMDs
1. No está encendido el sistema de vacío	Verificar el sistema de vacío al momento de tomar el componente	X	X
2. No hay componentes en la posición en que se deben de tomar	Coloque componentes nuevos en el alimentador	X	X
3. El componente no se levanto	Se debe reprogramar para el levantar el componente correctamente	X	X
4. Mal funcionamiento del alimentador a) Baja presión b) No hay electricidad c) El desperdicio del tape impide que avance alguna parte del alimentador d) Excesiva o baja vibración en el alimentador	Verifique la correcta presión/El vacío en el alimentador Verifique la electricidad en el alimentador y si esta bien conectado Remueva el exceso de tape y los componentes atrapados, después realmente el material ajuste la vibración del alimentador.	X	X
5. Se está usando la boquilla incorrecta	Modifique el programa o cambie la boquilla, para que se use la correcta	X	X
6. No hay información de posicionamiento	Agregue la información de posicionamiento al programa	X	X
7. Posicionamiento incorrecto	Edite la posición correcta para colocar el componente. Verifique calibración del equipo	O	O
8. El componente nunca se libero de la boquilla	Limpie la boquilla y revise el funcionamiento de las valvulas que controlan la presión del vacío	X	X
9. Diferente versión de programa o diferente tablero	Verifíquese la correcta versión del tablero/programa	X	X

100 a 8 dpms para un mismo tablero puede resultar en una reducción de costos de más de \$200,000 dls [5]. Ya que esto implica el costo del tiempo, material y mano de obra invertidos en la reparación, inspección y entrada-salida de los tableros de la línea de producción.

1.5 Método para caracterizar equipos de posicionamiento de SMDs, IPC-9850

La IPC fue fundada en 1957 como el instituto para Circuitos Impresos, de ahí sus siglas en inglés son IPC. Al igual que la mayoría de las compañías de ensamble electrónico se vieron envueltos en la asociación de instituciones de investigación, empresas de ensamble y sus proveedores formando esta organización que busca interconectar a la industria electrónica.

En 2002, la IPC publicó el estándar IPC-9850 titulado “Surface Mount Placement Equipment Characterization”, el cual tiene el propósito de estandarizar los parámetros, procedimientos de medición usados para la especificación, evaluación y continua verificación de los parámetros de caracterización de equipos de ensamble, o equipos de posicionamiento de SMDs.

1.5.1 Justificación del IPC-9850

Con la proliferación de la SMT, los usuarios de equipos de posicionamiento estaban ante la duda de cuál de las máquinas se desempeñaran mejor en el ambiente de manufactura. Así en un principio, las máquinas que pudieran colocar componentes más rápidamente y con la menor cantidad de defectos eran consideradas las mejores.

Inicialmente, el método común de evaluación era el “Yield%” de posicionamiento. Para este tipo de evaluación las máquinas eran programadas para posicionar una gran cantidad de SMDs y después de contar los defectos, las máquinas con menor número y con operaciones más robustas eran consideradas las mejores. Históricamente, los proveedores

de equipos de posicionamiento han seleccionado sus propios parámetros y metodologías para presentar las capacidades de posicionamiento y desempeño. Esto hizo difícil la comparación entre tipos similares de máquinas de posicionamiento, aparte de consumir capital y tiempo para los usuarios al buscar cumplir condiciones iguales para diferentes equipos.

Es entonces, cuando la IPC publica este documento que simplifica la evaluación al estandarizar los parámetros de rendimiento y calidad de posicionamiento que describen la capacidad de las máquinas de posicionamiento, en este estándar también se incluyen la relación de la velocidad y la precisión con el desempeño y la calidad de posicionamiento, de lo cual a continuación se expondrá en los siguientes apartados.

1.5.2 Implementación

Este estándar se enfoca en la medición de cinco tipos de SMDs – QFP-100, QFP-208, BGA-228, 1608C capacitor, and SOIC-16 – que son los más representativos de la gama de tipos de SMDs posicionados por un equipo de montaje superficial. La selección de estos SMDs fue hecha basada en aislar la contribución de la variación de SMD a SMD.

El método de evaluación de este estándar especifica que el posicionamiento de los SMD se colocara sobre un medio pegajoso dispensado sobre un panel claro de vidrio. Las dos principales razones del por qué usar paneles de vidrio son estabilidad dimensional y alto contraste de los sistemas de iluminación. El hecho de usar paneles de vidrio es más estable dimensionalmente, en comparación con el vidrio/epóxica de los PWBs, los cuales son más susceptibles a encogerse y doblarse. La segunda razón es el que permite usar un CMM para iluminar usando el modo de transmisión sobre el componente, y con un alto contraste permite fácilmente medir un largo número de componentes con una alta precisión.

Para estandarizar la forma de medición, un solo tipo de panel de vidrio es especificado para evaluación y verificación de la variedad de componentes. Este panel (PVP) cuenta con marcas fiduciales en posiciones específicas con una precisión con certificación NIST, que permiten usarse de referencia tanto para el posicionamiento y para las máquinas de medición. Otra razón de la selección de paneles de vidrio con fiduciales y

el uso de CMMs ópticos de no contacto, es el hecho de que tanto proveedores y usuarios ya contaban con herramientas de evaluación y diagnóstico alrededor de estos.

1.5.3 Medición de las características de los equipos de posicionamiento

Muchos métodos para evaluar la capacidad del desempeño de los equipos de posicionamiento se han empleado en el pasado, lo que llevó a al IPC-9850 a establecer unos lineamientos para la evaluación:

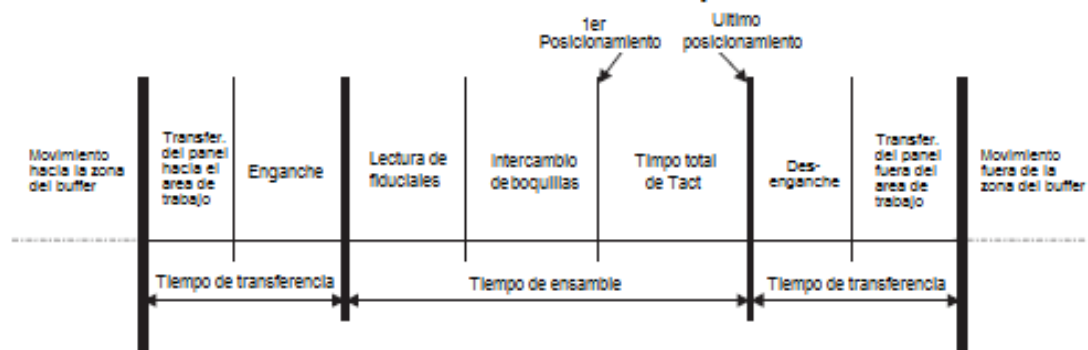
1. El uso de por lo menos 30 componentes en un área de 198x198mm en el PVP.
2. El uso de las 4 orientaciones más comúnmente usadas (0° , 90° , 180° y 270°), al menos que el equipo de posicionamiento no pueda realizarlo. Lo único que se restringe es la exclusión de alguna boquilla para optimizar el montaje.
3. Utilizar el área delimitada por las fiduciales en el PVP.
4. La densidad de montaje por área debe de ser distribuida a lo largo del PVP
5. Al menos 4 tableros deberán ser usados para reducir la variación entre tableros.
6. Si se cuenta con patrones de menos de 100 partes, todas deben ser medidas
7. Si se cuenta con patrones de más de 100 partes y con orientaciones idénticas a través de las columnas o renglones, entonces se puede realizar muestreos para medir el desempeño por renglón o columna.

Utilizando este tipo de recomendaciones se elabora la evaluación sobre los siguientes puntos:

1. Número y tipo de cabezas
2. Número y tipo de cámaras
3. Número de alimentadores
4. Tipos de boquillas
5. Evaluación de parámetros de tiempo base. Estos parámetros describen los periodos de tiempo definidos en los que dura un ciclo de montaje de componentes en un PWB. Estos parámetros – tiempo de ensamble, de transferencia y ‘tact’ – deben ser obtenidos montando sobre el mismo tablero, ver. Figura 1.6

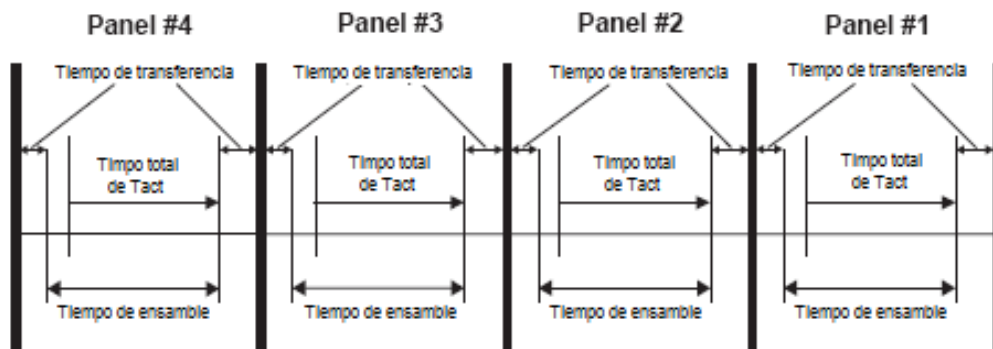
- Tiempo de ensamble – es el tiempo de ensamble del panel
- Tiempo de transferencia – tiempo que se requiere para transportar y preparar un PWB, mas el tiempo de descarga y transporte.
- Tiempo de ‘tact’ – tiempo de montaje solamente
- El rendimiento neto (cph) – es el número de componentes montados por hora (usando el PVP).

El ciclo de un solo panel



IPC-9850-3-1

El ciclo de cuatro panels



IPC-9850-3-2

Figura 1.6 Ciclos de transferencia y ensamble de un panel y cuatro paneles consecutivos

Otro punto que hay que resaltar de la aportación del IPC-9850, es el procedimiento de recolección de datos y medición de la precisión y la repetitividad del equipo (ver apéndice A.1).

De los 4 tableros tratados con adhesivo, que son montados consecutivamente con un programa de montaje definido para un solo tipo de parte, deben posteriormente llevarse a medir a un equipo CMM certificado. Y una vez teniendo los resultados de las mediciones de error en el desplazamiento, X y Y, al igual que la rotación, θ , es que se realizan los cálculos de precisión y repetitividad.

Revisando los actuales estándares utilizados en la industria para evaluación del error de montaje en componentes similares al 1608, el error permitido era no mayor a 0.2mm para el empaquetado 1608, pero en casos de empaquetados 0402 esto se limita a 0.0075mm, esto será discutido en el capítulo 3 y en la Figura A.6.2. Esta información se debe de usar para conocer los límites de aceptación del equipo al momento de realizar las mediciones

Una completa evaluación de un sistema de SMT debe no solo considerar la capacidad del desempeño, pero aparte debe incluir información acerca el 'Yield' y la confiabilidad del sistema. Los siguientes puntos son los recomendables a considerar cuando se realiza la evaluación.

1. Promedio de defectos de atributo. Estos defectos son una función de defectos discretos, los cuales son posicionados de tal manera que la cantidad requerida de soldadura no permite el crear la correcta forma de la unión entre la terminal y el electrodo del componente. Generalmente estos tipos de defectos ocurren en tan pequeñas cantidades que no son medidas en porcentajes del total de número de posicionamientos pero si en defectos de partes por millón (PPMs). Estos defectos son definidos generalmente como componentes puestos de cabeza, tombstoned, a la orilla, faltantes, dobles montajes, terminales dañadas, partes dañadas, desplazados y polaridad invertida. Lo que comúnmente se define como límite de tolerancia de este tipo de defectos es el llegar a acumular un defecto máximo por equipo, independientemente de la asociación de la

anomalía que lo causara. En este caso se recomienda hacer 88000 montajes en 20 equipos para tener un estimado del desempeño, esto es:

$$\text{Promedio de defectos de atributo} = \frac{10^6}{(8.8)(10^3)} \sum_{i=1}^{20} \text{Defectos de atributo} \quad (1.9)$$

2. Parámetros de Confiabilidad. En contraste con los parámetros de desempeño que especifican el peor de los casos, estos parámetros describen el comportamiento típico. Estos métricos son difíciles de especificar ya que no hay una manera razonable para verificar sin antes haber probado un equipo de manera rigurosa por miles de horas. No solamente esto se vuelve costoso si no que impreciso ya que el proveedor debe coleccionar información de los usuarios de los equipos. Algunos tipos de máquinas de posicionamiento llegan a comportarse en sus fallas con distribuciones de χ^2 . De hecho si las máquinas tiene un promedio constante de fallas, el 63% de las máquinas tendrán que ser asistidas y las fallas serán más frecuentes que las observadas en el MPBF (media de montajes entre fallas) y el MPBA (media de montajes entre mantenimientos). Esto es por el hecho que en la distribución los datos están cargados hacia la izquierda, causando a la mediana ser menor que la media. Así las siguientes mediciones son una buena aproximación para realizar la medición:

- a. MPBA (Media de montajes entre mantenimientos)

$$\text{MPBA} = \frac{\text{Total de montajes}}{\# \text{ de mantenimientos}} \quad (1.10)$$

- b. MTTR_a (Media de tiempo para recuperarse del mantenimiento)

$$\text{MTTR}_a = \frac{\text{Total de tiempo de recuperación}}{\# \text{ de mantenimientos}} \quad (1.11)$$

- c. MPBF (Media de montajes entre fallas)

$$\text{MPBF} = \frac{\text{Total de montajes}}{\# \text{ de fallas}} \quad (1.12)$$

- d. MTTR_f (Media de tiempo para recuperarse de fallas)

$$\text{MTTR}_f = \frac{\text{Total de tiempo de recuperación}}{\# \text{ de fallas}} \quad (1.13)$$

- e. Tiempo activo del equipo. Este es el porcentaje del tiempo en el que el equipo tarda en hacer una actividad y se le resta el tiempo en el que la máquina no está activa.

f. Promedio de errores de levantar componentes (en PPMs).

$$\text{Mispickup Rate} = 10^6 \frac{\text{Total de intentos de Pickup} - \# \text{ de los posicionamientos,} - \# \text{ de componentes defectuosos}}{\# \text{ de intentos de Pickup} - \# \text{ de componentes defectuosos}} \quad (1.14)$$

g. PM, Tiempo de mantenimiento preventivo

$$PM \text{ Total} = (\text{Tiempo de PM})(\# \text{ de veces en } 6000\text{hrs}) \quad (1.15)$$

Pero para poder realizar estas mediciones de capacidad del equipo de montaje, se necesita tener un CMM con la habilidad para repetir y reproducir la medición de la posición y rotación de componente de una manera confiable. Usando la metodologías de GR&R con una precisión a la tolerancia (P/T) menor al 25% se realiza el siguiente método para certificar el CMM.

Usando un solo tablero de verificación, y se montara 4 veces y se realizará la medición de solo 24 componentes por corrida, entre corridas se debe apagar y re encender el CMM y se debe de hacer en 2 ciclos utilizando 2 operadores diferentes.

En el caso específico de los componentes 1608, el centro de los componentes debe ser medido al detectar el contorno del componente. Desde que el CMM utiliza las marcas fiduciales sobre el tablero, independiente de la figura del componente, solo es necesario el evaluar la capacidad del CMM a medir las fiduciales y no individualmente por la forma de componente.

El método recomendado para detectar los 1608 de calibración, consiste en

1. detectar las esquinas del componente
2. Crear líneas de intersección al contorno de dichas esquinas.
3. Para calcular el centroide se recomienda utilizar los 2 siguientes métodos:
 - a. Medir las posiciones de las esquinas y calcular el promedio de X y Y

$$X_{\text{componente}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \quad (1.16)$$

$$Y_{\text{componente}} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \quad (1.17)$$

- b. Tomando las cuatro esquinas y creando líneas que se intercepten entre ellas al formar el centroide, ver Figura 1.7 (a), esto corresponde a las siguiente serie de ecuaciones,

$$\begin{aligned}
 L1: A_1x + B_1y &= C_1 & L2: A_2x + B_2y &= C_2 \\
 A_1 &= y_2 - y_1 & A_2 &= y_4 - y_3 \\
 B_1 &= x_1 - x_2 & B_2 &= x_3 - x_4 \\
 C_1 &= A_1x_1 + B_1y_1 & C_2 &= A_2x_3 + B_2y_3
 \end{aligned}$$

$$x_{componente} = \frac{B_2C_1 - B_1C_2}{A_1B_2 - A_2B_1} \quad (1.18)$$

$$y_{componente} = \frac{A_1C_2 - A_2C_1}{A_1B_2 - A_2B_1} \quad (1.19)$$

4. Para calcular el ángulo de rotación se recomienda utilizar los siguientes 5 métodos:
- Tomando el promedio de los ángulos formados por las dos líneas diagonales a través de las fiduciales
 - Tomando el ángulo de la línea a través de la vertical de los puntos medios menos 90 grados, ver Figura 1.7 (b).
 - Tomando el ángulo a través de la línea horizontal de los puntos medios, ver Figura 1.7 (c)
 - Tomando el promedio de todos los ángulos de los lados del componente, ver Figura 1.7 (d)
 - Tomando el promedio del método b y c.

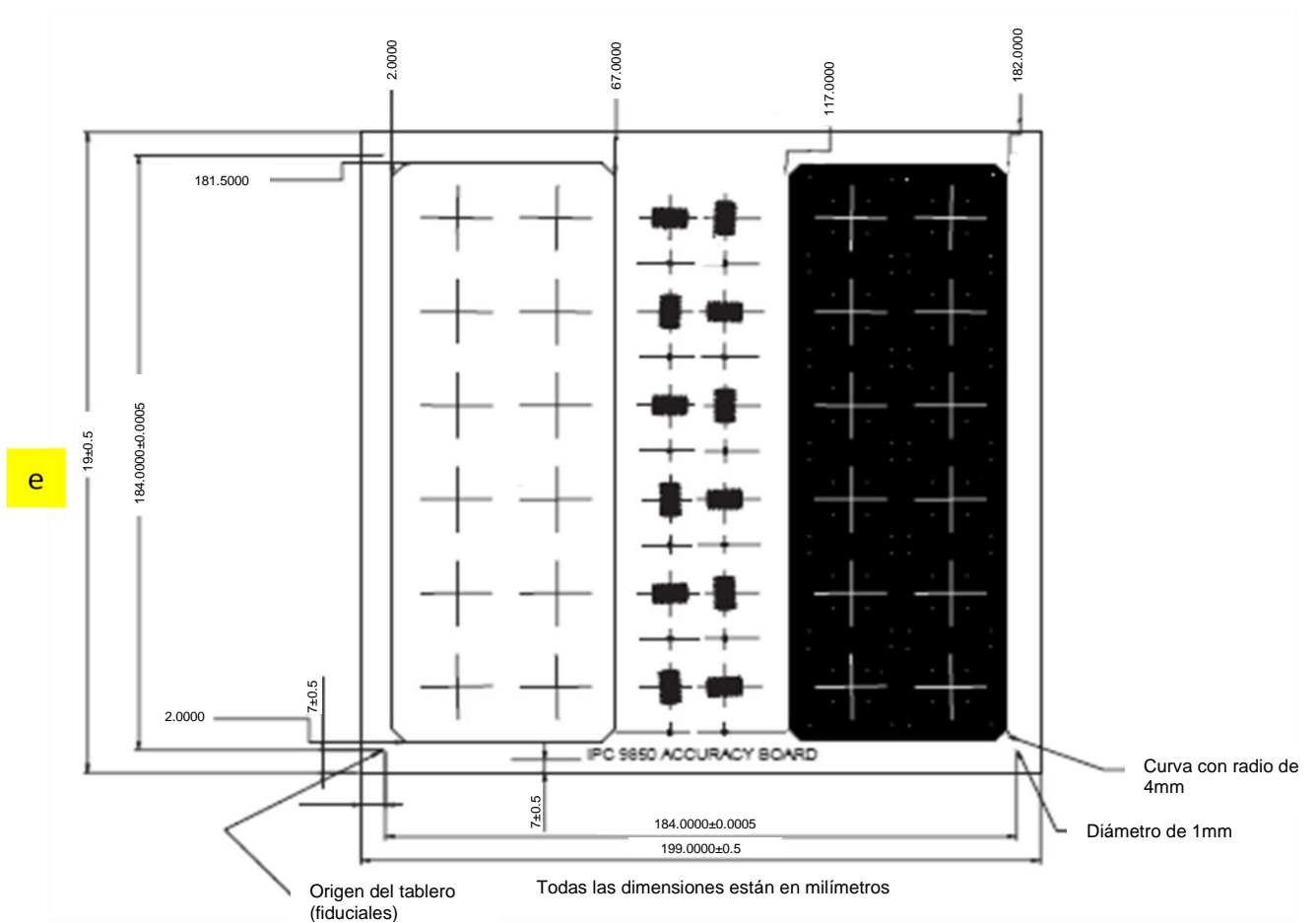
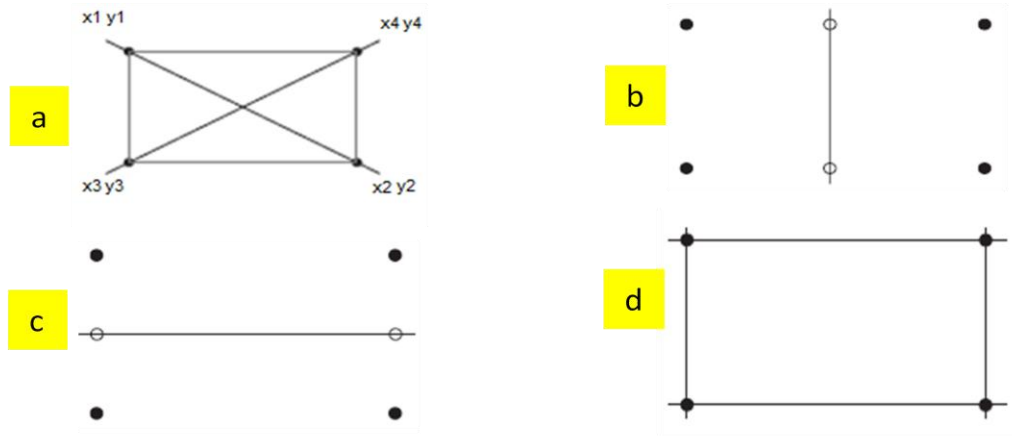


Figura 1.7 (a) Ejemplo de detección del centroide, donde el rectángulo es el cuerpo del chip, se detectan las esquinas, se traza una recta entre las esquinas contrarias y la intersección de estas es el centroide; (b) Método b de cálculo de ángulo de rotación, partiendo del (a) se calculan los puntos medios entre 2 de las esquinas y se traza una recta que luego es calculada por su ángulo contra la horizontal; (c) Método c de cálculo de ángulo de rotación, similar al método b pero con los lados más cortos de del cuerpo del chip; (d) Método d de cálculo de ángulo de rotación, de manera similar pero se toma todas de las orillas trazadas entre las esquinas detectadas y se calcula el ángulo promedio contra la horizontal; (e) Tablero de vidrio calibrado propuesto en el IPC-9850, para medir la capacidad del CMM al calcular el centro y detectar la rotación de la figura del chip.

La capacidad de la precisión del CMM. Este proceso de verificación determina la habilidad del CMM óptico para precisamente medir la posición de los componentes sobre el panel de vidrio calibrado Figura 1.7 (e). Para evaluar la capacidad de medir a los componentes de 1608, estos han sido dopados sobre el vidrio.

Algunas de las imágenes dopadas fueron intencionalmente desplazadas y rotadas de tal manera que se pueda medir la habilidad del CMM para medir el error . Algunos de las imágenes de componentes de tipo 1608C fueron desplazados en un rango de $\pm 50\mu\text{m}$ y con una rotación de $\pm 3^\circ$.

Esta metodología es implementada usando un programa en el CMM, el cual debe buscar los componentes sobre el vidrio en las posiciones del CAD. Estas posiciones del CAD son los centros de los componentes sin el desplazamiento o rotación adicional que fueron aplicados a las imágenes del tablero de vidrio. Los resultados de las mediciones del CMM serán comparados con las posiciones y rotaciones de las imágenes de los componentes que fueron certificados por el NIST para este único tablero que se usa para las pruebas. Entre más cercanos los valores de la medición del CMM a lo que se certificó por el NIST, será mayor la capacidad del CMM de realizar la medición.

El método de cálculo. Se debe substrar las posiciones de las imágenes medidas por el CMM de las posiciones de las imágenes certificadas por el NIST a lo largo de los ejes X, Y y θ . Esto debe proveer una distribución de los errores de medición del CMM. Luego se debe usar esta distribución para calcular la media, $\bar{\mu}_{Error}$, y desviación estándar δ_{Error} , para cada eje, utilizando los métodos anteriormente descritos. Acto seguido es el cálculo de los límites de especificación para cada uno de los ejes bajo la condición de un $Cpk = 2.0$. Esto es,

$$SL = 3\delta_{Error} Cpk + |\bar{\mu}_{Error}| \quad (1.20)$$

Que específicamente para este caso,

$$\bar{\mu}_{Error} = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} (Posiciones medidas_i - Posiciones Certificadas_i) \quad (1.21)$$

$$\delta_{Error} = \sqrt{\frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} (Posiciones medidas_i - Posiciones Certificadas_i)^2} \quad (1.22)$$

Dentro de estos límites es lo que se asegura que puede variar el error. Una vez realizando la verificación del CMM tal como es descrito anteriormente, se prosigue a efectuar el muestreo generado por los montajes del equipo de posicionamiento de SMDs. De igual manera se selecciona un tablero de vidrio con cromo anti reflejante metalizado en la superficie debido a su estabilidad dimensional, pero ahora se realizaran más de 1600 montajes con componentes 1608C en los 4 ángulos más comunes de montaje, sobre la cinta adhesiva doble que se aplica sobre todo el tablero, ver Figura A.6.1. Y como fue descrito con anterioridad se realiza las mediciones de capacidad, media y desviación estándar, y es así como se evalúa de acuerdo a la recomendación de la IPC-9850, que aun cuenta con errores y representa un gran gasto, en tiempo y dinero, tanto para el usuario y el proveedor; sobre este tema se discutirá en los siguientes capítulos.

1.6 CMM – Máquina de mediciones coordenadas

1.6.1 Mecanismo de un CMM

Estas máquinas pueden ser construidas con ciertos principios cinemáticos o físicos. En lo referente a los principios cinemáticos, la primera CMM fue desarrollada por Ferranti, una compañía Escocesa en 1950, como resultado de la necesidad de medir la precisión de sus componentes en la fabricación de productos militares. De ahí le siguió el UMS 500 (Zeiss/Alemania). Después Leitz/Alemania produjo una estructura fija con una mesa desplazable. En las máquinas modernas, la estructura tipo ‘gantry’ cuentan con dos piernas también conocidas como puente. Esto se mueve libremente a lo largo de la mesa del granito con una pierna (designada a menudo la pierna interior) que sigue un carril de guía unido a un lado de la mesa del granito. La pierna opuesta (a menudo pierna del exterior) descansa simplemente sobre la mesa del granito que sigue el contorno superficial vertical. Los cojinetes de aire son el método elegido para asegurar el viaje libre de fricción. En éstos, el aire comprimido es forzado con una serie de horadaciones muy pequeños en una superficie sustentadora plana que funciona como un amortiguador de aire suave pero controlable en el cual el CMM puede moverse. El movimiento del puente o el ‘gantry’ junto con la mesa de granito forman uno de los ejes del plano XY. El puente del ‘gantry’ contiene un carro que

se traslada entre la pierna interior y la exterior formando el otro eje del plano XY. El tercer eje de movimiento (Z) es proporcionado por la adición de una punta de prueba que se mueva hacia arriba y hacia abajo a través del centro del carro. La punta de prueba del tacto forma el dispositivo de detección. Así el movimiento del eje X, Y y Z completamente describen la medición coordinada. Instrumentos opcionales son mesas rotatorias y de inclinación, que suelen dar mayor flexibilidad a la medición de piezas complicadas. Tal como se explico anteriormente, ese es el caso de un CMM tradicional de 3 ejes, como se muestra en la Figura 1.8. Ahora existen diferentes tipos de puntas de prueba y se han mejorado al uso de sistemas de visión basados en sensores CCD o CMOS.

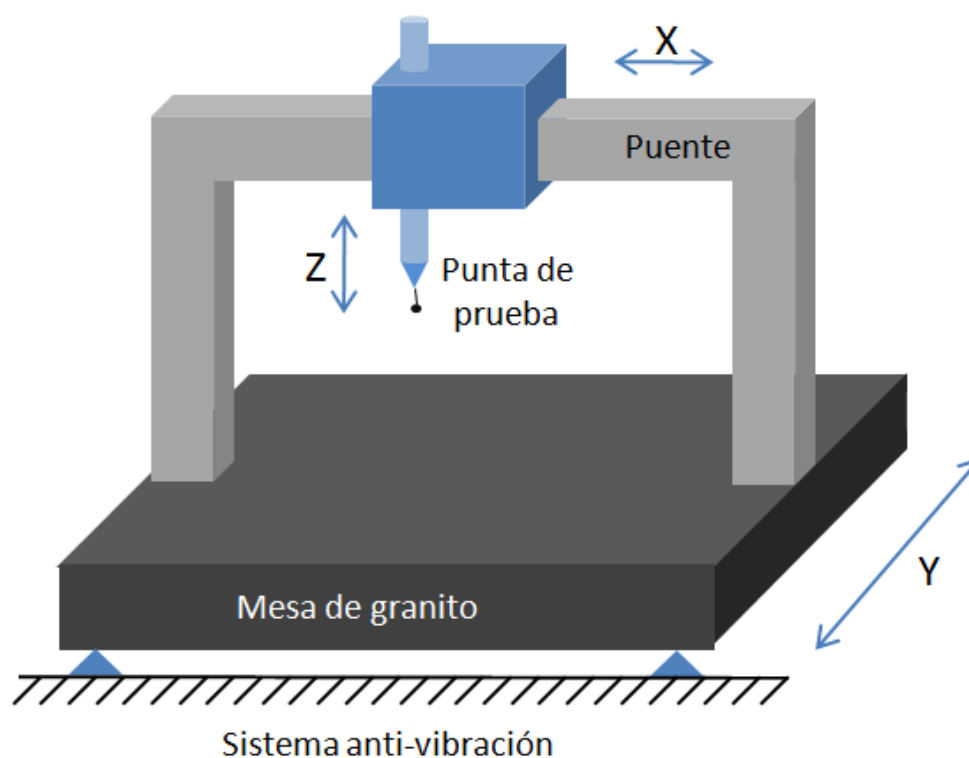


Figura 1.8 Diseño convencional de CMMs

1.6.2 Puntas de prueba

Dentro del CMM se considera como una de las partes más importantes a las puntas de pruebas que se dividen las puntas de prueba de contacto, y ópticas.

Las puntas de contacto generalmente son puntas esféricas diseñadas a registrar la detección de pieza al contacto, eléctricamente se detecta el movimiento de la punta, y en ese instante se registra en una PC la posición actual de la punta de prueba.

Las puntas de prueba ópticas, en cambio son basadas en sistemas de lentes y cámaras CCDs, las cuales se mueven como las puntas mecánicas, y son enfocadas al punto de interés, en lugar de tocar el material. Se captura la imagen de la superficie, y se determina la zona de interés, y por medio de técnicas de procesamiento digital de imágenes se adecua a encontrar el mejor contraste en blancos y negros de la imagen. Se realizan las detecciones de contorno de la pieza y realizan los cálculos geométricos o solamente la adquisición de datos. En estos sistemas al variar el enfoque, el eje Z se va registrando. Lo cual permite registrar en 3D el contorno de la pieza.

Recientemente, en la industria se han usado la combinación de puntas de prueba ópticas y laser, lo cual cambia a los CMMs a microscopios de medición o máquinas de múltiples sensores. Así la cantidad de aplicaciones crece rápidamente. En nuestro caso observaremos de cerca la construcción de un CMM con punta de prueba óptica, Quick Scope 200Z de Mitutoyo (ver Figura 1.9), utilizado para determinar la posición de SMDs montados por un equipo posicionador de SMDs.



Figura 1.9 Quick Scope 200Z de Mitutoyo

1.7 Quick Scope200Z

Este tipo de CMM se puede separar en 3 secciones principalmente, tal como la Figura 1.10,

- Unidad Principal: Sistema de iluminación, sistema de movimiento, y sistema de adquisición de imágenes
- PC (hardware): Entradas (Caja de control) y Salidas (Pantalla, Impresora, bocina)
- Software: Programación gráfica

A continuación se presenta parte de la construcción de la unidad principal ver Figura 1.10

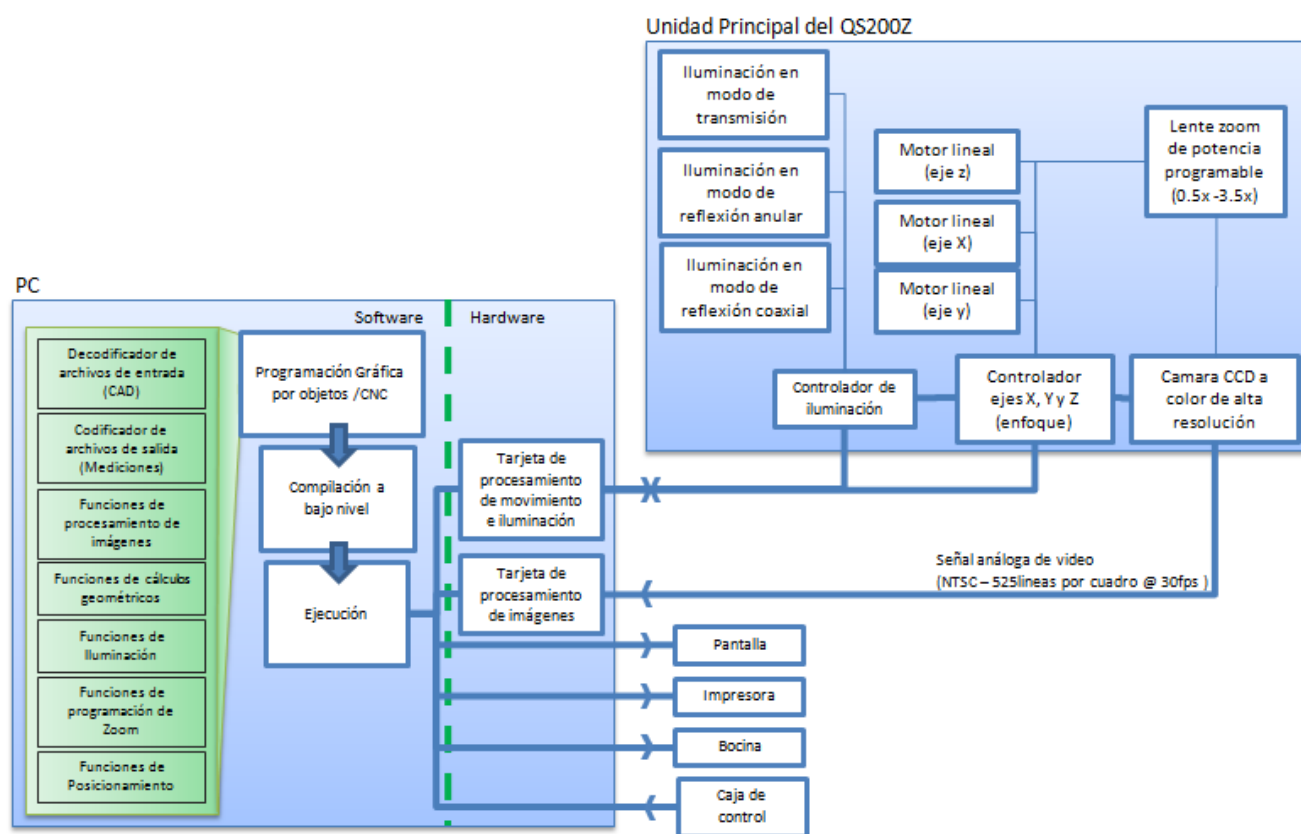


Figura 1.10 Diagrama a bloques del QS 200Z

1.7.1 Control de movimiento

El equipo cuenta con una mesa que a través de un motor lineal, se desplaza solamente en un eje (Y), cuenta con dos guías para reducir el error al desplazamiento. De igual forma se cuenta con un segundo motor acoplado a un tornillo de posicionamiento que permite el movimiento del otro eje (X), ver Figura 1.11. Las pruebas de repetitividad y reproducibilidad muestran como el sistema de posicionamiento por si solo más la manufactura del tornillo de posicionamiento conjugan de manera sobresaliente, tal como se muestra en la Tabla 1.5

Tabla 1.5 Especificaciones de fábrica del QS200Z

Rango	Eje X	200mm
	Eje Y	200mm
	Eje Z	100mm
Resolución		0.5 μ m
Precisión a 20C°		$E_{1XY}: \left(2.5 + \frac{6L}{1000}\right) \mu\text{m}$ donde L es la distancia recorrida

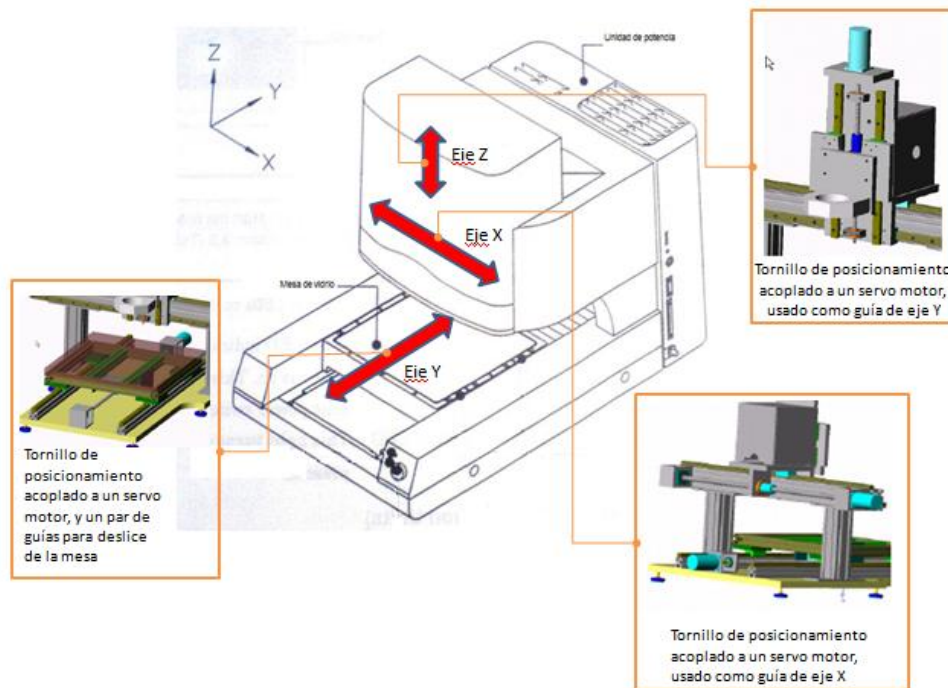


Figura 1.11 Diagrama de sistema mecánico

1.7.2 Sistema de iluminación

El sistema de iluminación es a través de un grupo de tres lámparas con bulbos de halógeno, estas transmiten la iluminación a través de fibra óptica orientada en posiciones fijas. Así el sistema de iluminación da tres opciones de cómo iluminar,

- por transmisión a través de la base
- por reflexión en forma de anillo
- por reflexión a través del lente

Las tres fuentes de iluminación cuentan con un control de lazo abierto que se controla de 0 al 100% del máximo voltaje de control para dicha lámpara. Esta configuración es mostrada en la Figura 1.12. Estas fuentes de iluminación son controladas por voltaje partiendo desde 0V (0%) al máximo voltaje de operación, 12V (100%).

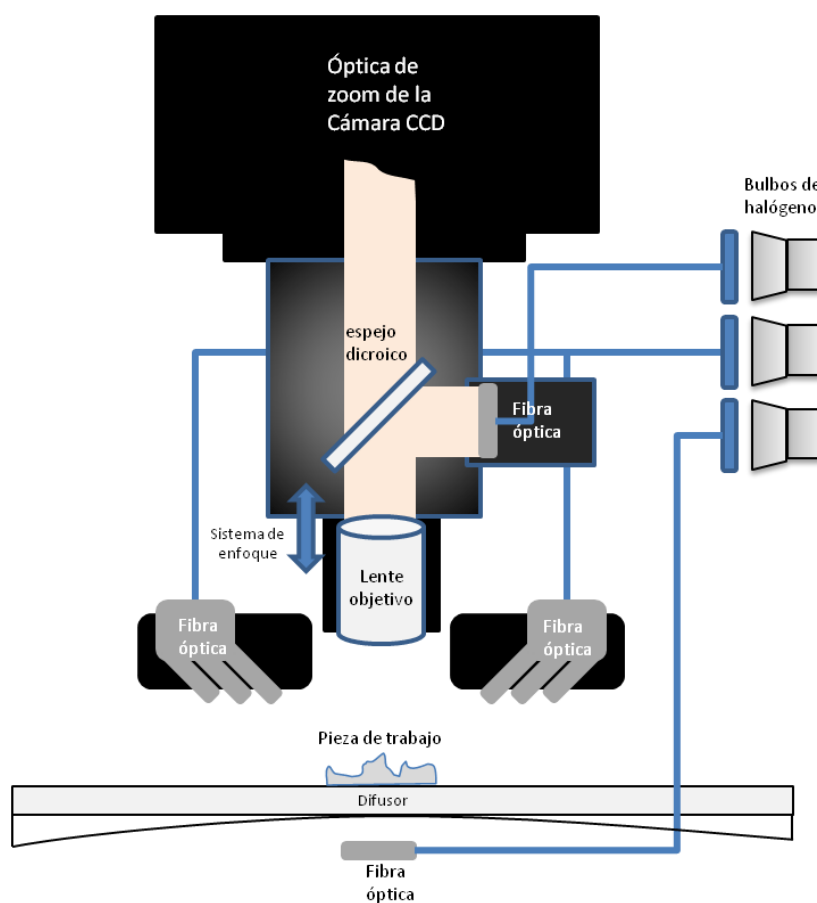


Figura 1.12 Sistema de iluminación

1.7.3 Sensor CCD

El sensor CCD para color, formato NTSC del que el sistema cuenta es un SONY ICX058AKB con las características mostradas en la Figura 1.13

Las arquitecturas para estos sensores son por lo general de 3 tipos:

- Transferencia de cuadro completo (Full frame)
- Transferencia de cuadro (Frame transfer)
- Transferencia de interlinea (Interline)

Las diferencias en las 3 arquitecturas se fundamentan en el método de captura.

En el caso de específico del ICX058AKB usa la arquitectura de transferencia de interlinea, donde el área de silicio cubierta de Aluminio (una máscara oscura). Esta máscara permite una transferencia rápida de la imagen a los registros de almacenamiento al ir recorriendo por columna. La transferencia se hace como un corrimiento de una columna.

El arreglo en una celda se secciona en 3 compuertas sensibles a diferentes longitudes de onda (en este caso rojo, verde y azul o A, B, C). Ver Figura 1.14(a)

Y con estas características se observa la gráfica de sensibilidad del sensor, la cual asemeja a la sensibilidad del ojo humano, ya que su propósito de este tipo de productos, son el remplazar actividades realizadas por el hombre a través de visión por máquina. Ver Figura 1.14(a).

Estructura	
Tamaño de imagen	Diagonal 6mm (tipo 1/3)
Numero de pixeles efectivos	768(H) x 494(V) Approx 380k pixeles
Numero total de pixeles	811(H) x 508(V) Approx 410k pixeles
Metodo de tranferencia	Entrelineado
Tamaño del chip	6.00 mm (H) x 4.96 mm (V)
Tamaño de la celda	6.35um (H) x 7.4 um (V)
Optical black	Horizontal (H): frente 3 pixeles. Atrás 40 pixeles Vertical (V): frente 12 pixeles. Atrás 2 pixeles
Numero de dummy bits	Horizontal 22 Vertical 1(solo en impares)
Tipo de material	Silicon tipo-N

Figura 1.13 Especificaciones del sensor CCD

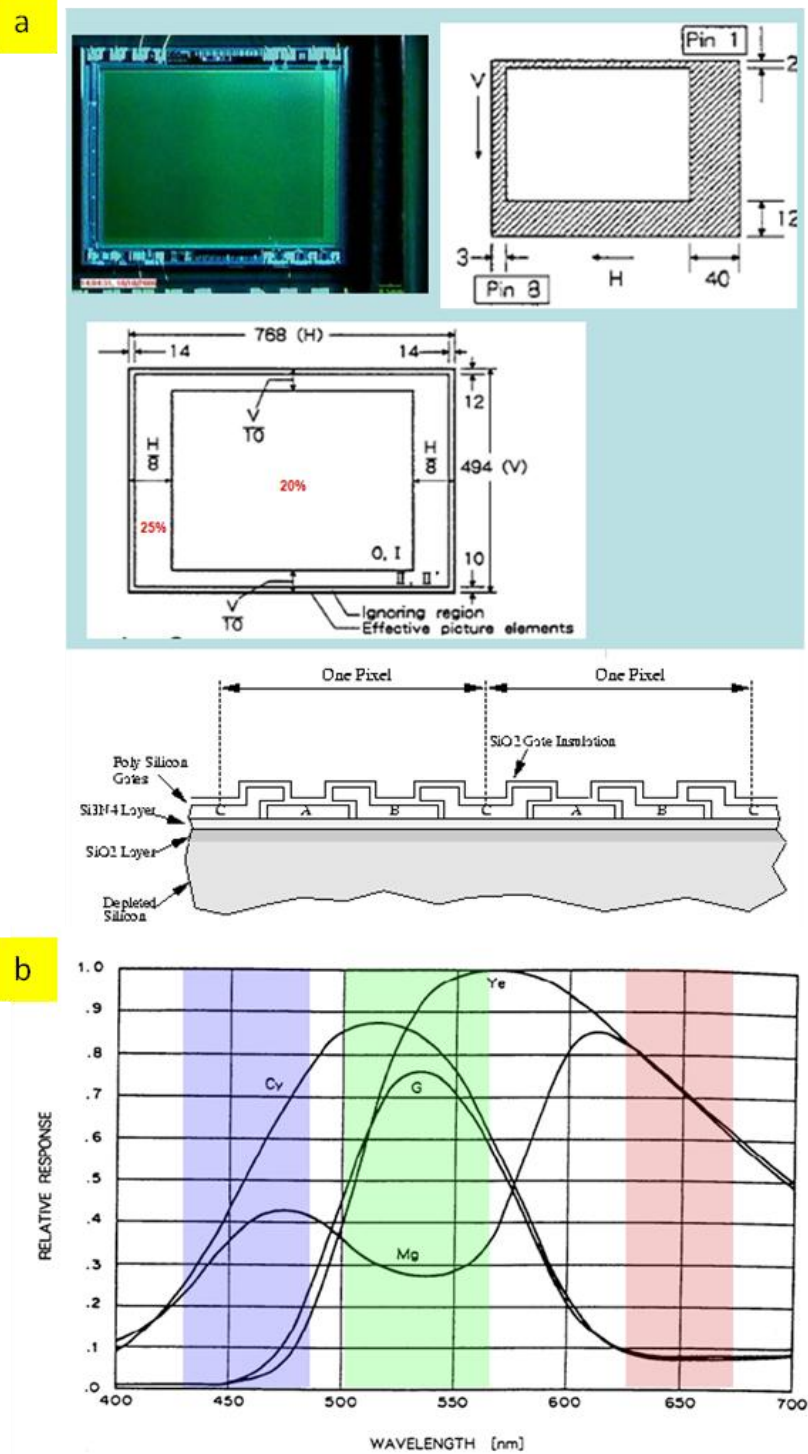


Figura 1.14 (a) Configuración del sensor CCD y construcción interna del semiconductor, (b) Gráfica característica de la sensibilidad del CCD

Capítulo 2.

El caso de estudio y los métodos de análisis

El caso de estudio se refiere a la máquina de posicionamiento (Sony E1100) en una línea de ensamble con un modelo basado en computadora y a una Máquina de Mediciones de Coordenadas (Mitutoyo QS200Z) localizados en la empresa Sony Baja California, en Mexicali, Baja California.

Tomando en cuenta la definición de que una máquina de mediciones de coordenadas, o CMM por sus siglas en inglés, es un equipo para medir dimensiones. Y que este es un sistema diseñado para mover una punta de prueba para determinar los puntos coordenados de la superficie de una pieza. Habitualmente son empleados en mediciones dimensionales, perfiladores, medición de orientación, contornos y/o profundidad. Se asume que un CMM consiste en las siguientes partes: la punta de prueba o sensor de medición, el controlador de movimiento y el software de medición.

Estos equipos están disponibles en una gran diversidad de tamaños y diseños. Pueden llegar a ser operados manualmente y/o por control por CNC o PC. Existen varios tipos de configuración, tales como de escritorio, portátiles, o de producción en línea.

2.1 Medición de la precisión del desplazamiento

La precisión a la traslación es evaluada al compararla contra una distancia patrón de un tablero de prueba como el mostrado en la Figura 2.1, mediante la siguiente secuencia:

- 1) Elaborar un programa CNC para el recorrido de la posición A (0,0) a la posición B (190,75), que es la distancia patrón del tablero de prueba de la Figura 2.1.
- 2) Centrar de manera manual el tablero en la posición A como referencia. Esto es al asegurar el tablero de prueba a la mesa del CMM, y mover la mesa a la posición A, después centrar la fiducial con una guía o “cross-hair” dibujado al centro de la imagen de salida de la cámara del CMM.
- 3) Crear un programa de reconocimiento de bordes para ambos casos, para poder capturar la posición del centro de la fiducial.
 - a. Primero se captura la imagen, y se reduce el área de búsqueda a tres secciones rectangulares a las orillas donde queda situada la fiducial. Con dimensiones de 30x30 píxeles.
 - b. Después usando el operador de Sobel de 3x3 con los siguientes kernels (2.1) para convolución, h_x , para detectar los contrastes verticales y h_y , para detectar los contrastes horizontales:

$$h_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, h_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- c. Las respuestas de las convoluciones con las secciones rectangulares de la fiducial serían los gradientes g_x y g_y . Estos se usan para calcular la magnitud del gradiente g (2.2) de la siguiente manera:

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (2.2)$$

- d. Después de normalizar las imágenes procesadas y filtrar solo las que sean mayor a 0.8. Se hace una búsqueda y se toman uno de los puntos mayor a 0.9, el primero en la lista. Este representa una posición relativa a la esquina superior izquierda de la sección rectangular, después se recalcula las posiciones para ser relativas a la esquina superior izquierda de la imagen capturada. Teniendo como resultado 3 posiciones que representan 3 puntos sobre el contorno de la fiducial, esto es:

$$\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}, \{x_3, y_3\} \quad (2.3)$$

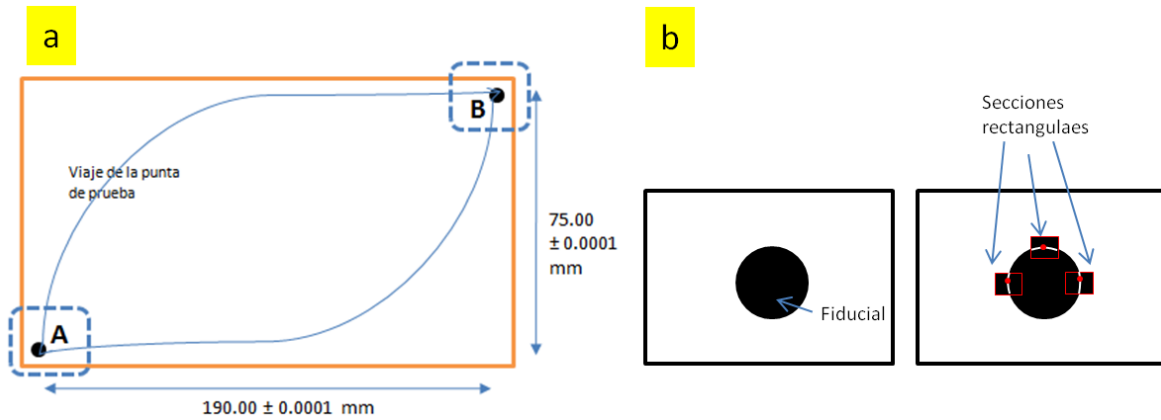


Figura 2.1 (a) Trayectoria de recorrido de la punta de prueba o cámara del CMM sobre el tablero de prueba, construido con el método de electrolitografía, el cual permite una precisión de $\pm 1 \mu\text{m}$, donde se conoce una distancia patrón entre los puntos A y B; (b) ejemplo de la detección del centro de una fiducial, donde las secciones rectangulares se les aplico el operador de Sobel y son marcadas de color rojo los contornos para resaltarlas. De estas secciones rectangulares ya procesadas se selecciona un punto por cada una para poder calcular el centro de la fiducial.

- e. Entonces para calcular el centro del círculo se resuelve el determinante de la siguiente ecuación

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

- f. Evaluando los cofactores para la primera línea del determinante y nos puede dar una solución

$$x^2 + y^2 - \left(\frac{M_{12}}{M_{11}}\right)x + \left(\frac{M_{13}}{M_{11}}\right)y - \left(\frac{M_{14}}{M_{11}}\right) = 0 \quad (2.5)$$

- g. Al completar los cuadrados se obtiene el centro del círculo.

$$\begin{aligned} x_c &= 0.5 \frac{M_{12}}{M_{11}} \\ y_c &= -0.5 \frac{M_{13}}{M_{11}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

- 4) Interpretar la desviación estándar de los datos de los centros de las fiduciales calculados. Ambas distribuciones de error en la posición son caracterizadas por una función normal. La composición de ambas dará otra distribución normal. Esta composición se calcula según el teorema de convolución.

Teorema 1. $f_1 * f_2 = \sqrt{2\pi} \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}[f_1] \cdot \mathcal{F}[f_2])$

donde $f_1, y f_2$ son las funciones de dos distribuciones normales o gaussianas, y donde \mathcal{F} es la transformada de Fourier,

$$F(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i v t} dt,$$

y donde \mathcal{F}^{-1} es la transformada inversa de Fourier,

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(v) e^{2\pi i v t} dv,$$

De las ecuaciones anteriores, v es la variable de transformada, $f(t)$ es la función continua, esta puede ser f_1 , y f_2 , y t representa la variable independiente.

Y así, siendo las dos funciones gaussianas,

$$f_1 = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (2.7)$$

$$f_2 = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2.8)$$

Se puede calcular el resultado de la convolución de la ecuación (2.7) y (2.8),

$$f_1 * f_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}} e^{-\frac{(t-(\mu_1+\mu_2))^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}} \quad (2.9)$$

De aquí se puede deducir que la suma de los cuadrados de las varianzas será la incertidumbre de la translación. Para mayor detalle sobre el programa usado para la evaluación consulte el Apéndice en la sección A.2

2.2 Medición de la sensibilidad de la cámara

2.2.1 Evaluación del método de iluminación.

Esta evaluación tiene la finalidad de evaluar si el método de iluminación produce dos distribuciones de intensidad entre el objeto y el fondo, teniendo sus medias separadas por más del ancho de una de las distribuciones. Esto consiste en exponer un SMD a 10

diferentes niveles de iluminación a lo largo del rango de control del sistema de iluminación y registrar sus fotografías al igual que calcular los histogramas. Los métodos de iluminación evaluados fueron transmisión y reflexión con anillo de luz.

2.2.2 Evaluación de la respuesta de la cámara a la iluminación.

Una vez seleccionado el método de iluminación idóneo, se evalúa la respuesta de la cámara, midiendo su desviación estándar y media conforme incrementa el nivel de iluminación. Esto se realiza al capturar 10 imágenes y recalculando la media y desviación estándar de cada grupo de imágenes. En esta evaluación se seleccionará el nivel de iluminación para la prueba de repetitividad, condición donde la desviación estándar será la menor y no se encuentre en saturación el sensor o por lo menos este empezando a saturarse.

2.2.3 Evaluación de la repetitividad de la iluminación

Una vez seleccionado el nivel adecuado de iluminación se opta por evaluar la repetitividad del sistema. Para realizar dicha evaluación, se utilizaría las mismas condiciones de iluminación, y la detección del centro de una fiducial A usando el tablero de prueba de la Figura 2.1(a). Por lo que se realizaron los siguientes pasos para poder analizar los datos:

- 1) Centrar la pieza de calibración en la posición A como referencia, de manera similar a lo explicado en la sección 2.1.
- 2) Crear un programa de reconocimiento de bordes para ambos casos, para poder capturar la posición del centro de la fiducial. De igual manera a lo utilizado en la sección 2.1, y para mayor detalle sobre el programa utilizado revise el Apéndice en la sección A.2
- 3) Interpretar la desviación estándar (σ_{total}) de los datos de los centros de las fiduciales calculados a 300 muestras.

Al interpretar la desviación estándar, se puede separar la variación causada por la medición de la siguiente manera,

- 1) La varianza total (σ_{total}^2) debe de ser la suma de los cuadrados del error causado por la iluminación (variando la sensibilidad a los niveles de grises) σ_i , y el error en el cálculo del centro del círculo usando 3 puntos en el contorno de la fiducial

σ_p . Para reducir el número de variables, la base fue fijada eliminando la variable de la vibración y la temperatura fue fijada a 25C°. Entonces, el error causado por la variación en el sistema de iluminación debe ser:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{total}^2 - \sigma_p^2} \quad (2.10)$$

- 2) Por lo que para estimar la desviación estándar de calcular el centro del círculo que forma la fiducial se debe realizar un análisis de propagación de error de las formulas en base a tres puntos, esto arroja lo siguiente

$$\begin{aligned} (x_a - h)^2 + (y_b - k)^2 &= r^2 \\ (x_c - h)^2 + (y_d - k)^2 &= r^2 \\ (x_e - h)^2 + (y_f - k)^2 &= r^2 \\ &\vdots \\ f_k(x_a, y_b, x_c, y_d, x_e, y_f) : k &= \frac{(x_a^2 + y_b^2)(x_e - x_c) + (x_c^2 + y_d^2)(x_a - x_e) + (x_e^2 + y_f^2)(x_c - x_a)}{2(y_b(x_e - x_c) + y_d(x_a - x_e) + y_f(x_c - x_a))} \\ f_h(x_a, y_b, x_c, y_d, x_e, y_f) : h &= \frac{(x_a^2 + y_b^2)(y_f - y_d) + (x_c^2 + y_d^2)(y_b - y_f) + (x_e^2 + y_f^2)(y_d - y_b)}{2(x_a(y_f - y_d) + x_c(y_b - y_f) + x_e(y_d - y_f))} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Después de calcular con un simulador de propagación de error [6], que se basa en el desarrollo de la siguiente ecuación de derivadas parciales para calcular el error:

$$\sigma_f^2 = \sigma_{x_a}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_a} \right)^2 + \sigma_{y_b}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial y_b} \right)^2 + \sigma_{x_c}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_c} \right)^2 + \dots, \quad (2.12)$$

Donde $\sigma_{x_a} = \sigma_{y_b} = \sigma_{x_c} = \dots = \sigma_{y_f} = \frac{2(n)}{\sqrt{6}} = 0.8164965809n$, esto es basado en la respuesta de la composición de los eventos aleatorios con distribuciones uniforme continuas (rectangulares). Asumiendo $n = 7.751937984\mu\text{m}$, la cual es la resolución que llega a tener un pixel en el sensor CCD a 1x de magnificación. Bajo estas condiciones, en la función (2.12), la varianza del error de la función σ_f , será calculada teóricamente partiendo de 3 puntos en una circunferencia de 1mm de diámetro.

2.3 Propuestas para reducción de error en la medición

Desde el análisis se puede percibir las oportunidades de mejorar las partes del CMM, el método de medición y su uso como herramienta de mantenimiento y auditoria para las montadoras de componentes en una línea de producción. La caracterización del

CMM que se propone en las secciones 2.1 y 2.2 expondrán cual de las variables es la que más contribuye al error en la medición, y las siguientes propuestas ayudarán a reducir el error al medir.

- 1) Se propone analizar la sensibilidad del CCD y el espectro de la lámpara fluorescente, comparándola contra el uso de un LED. Evaluar la curva de transferencia de fotones. La curva de transferencia de fotones es generada al capturar la señal de la cámara de una sección de la imagen (de 100x100 pixeles al centro de la imagen) conforme los niveles de iluminación incrementan. Es importante asegurarse que la iluminación sea uniforme sobre la sección de interés. La secuencia del evento es la siguiente:

- (a) Se logra la oscuridad total
- (b) Se adquieren dos imágenes, se computan las diferencias y el ruido RMS (ruido de lectura)
- (c) Se incrementa la iluminación y se captura el par de imágenes
- (d) Y se calcula la media y la desviación estándar,
- (e) Se incrementa la iluminación y se capturan el par de imágenes y se repite el paso (c) y (d) hasta alcanzar el máximo nivel de iluminación. El cálculo de la media, μ_a y μ_b , y la desviación estándar, σ , es respecto a las siguientes ecuaciones:

$$\mu_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad (2.13)$$

$$\mu_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i \quad (2.14)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^N ([a_i - \mu_a] - [b_i - \mu_b])^2 \quad (2.15)$$

Donde N es el número máximo de pixeles en la imagen, a_i son los pixeles de la primera imagen, y b_i son los pixeles de la segunda imagen.

Para mayor detalle sobre el programa utilizado en esta evaluación, revise el Apéndice en la sección A.3

- 2) Se propone eliminar el error acarreado al desplazamiento de la punta de prueba, utilizando un nuevo tablero de prueba con fiduciales locales, situados alrededor del componente a medir, los cuales estarían dentro del campo de visión de la cámara del CMM, esto para hacer mediciones de distancias relativas a sus posiciones.
- 3) Se buscará el que el método de medición le lleve un tiempo de ciclo 1.5seg de procesamiento por parte SMD, según los requerimientos idóneos para el departamento de producción y mantenimiento.
- 4) Se propone cambiar el muestreo (la frecuencia de mantenimiento preventivo) Basados en los resultados e historial del muestreo al mantenimiento.
- 5) Se propone medir la capacidad del sistema óptico para distinguir los bordes de las muestras. Se evaluará de acuerdo a la norma ISO 12233 Metodología de sesgado de punta haciendo uso de la función de transferencia de modulación para el sistema óptico, el proceso de evaluación y su uso se explicará en la siguiente sección.

2.4 Función de Transferencia de modulación: capacidad para las mediciones de resolución óptica

La función de transferencia de modulación (MTF) es la característica que relacionada con la calidad de resolver de un sistema óptico el reproducir una imagen.

Un lente perfecto podría reproducir una imagen de un objeto sin ninguna degradación. Pero desgraciadamente, no existen. Así que la agudeza, contraste, iluminación, transmisión espectral y la distorsión afectan a la calidad del lente para reproducir una imagen. Un lente puede adecuadamente reproducir una imagen de un objeto hasta que alcanza el punto en el que en la imagen no puede ser reproducido el detalle del objeto. En otras palabras, el lente solamente puede resolver el detalle en términos de la frecuencia espacial. Entre más fino sea el detalle del objeto, será mayor la frecuencia espacial de la imagen y más difícil de reproducir

La MTF se mide como un porcentaje de una escala de 0 a 1 o de 0% a 100%, donde 0% indica que no hay transmisión de la información y 100% indica que no se atenúa la información. Los estándares de la industria ópticas para medir la MTF usan las unidades de frecuencia espacial llamadas “pares de líneas por milímetro” o lp/mm. La MTF es la respuesta de la frecuencia espacial de un sistema óptico o un componente del sistema; su valor de contraste va relacionado con una frecuencia espacial relativa a bajas frecuencias.

La esencia del significado de la MTF es simple. Suponga que se tiene un patrón consistente de un tono puro (una onda senoidal). A frecuencias las cuales la MTF del sistema o el componente son 100%, se tendrá el máximo contraste. A una frecuencia donde la MTF es el 50%, el contraste está a la mitad del valor original, y así sucesivamente.

Un ejemplo de los niveles de contraste del 100% al 2% es ilustrado en la Figura 2.2, para un patrón senoidal de frecuencia variable. El contraste es moderadamente atenuado para la MTF al 50% y severamente atenuado para la MTF al 10%. En la práctica un componente o sistema óptico presenta una MTF que varía el contraste con la frecuencia espacial, es decir mayor contraste a bajas frecuencias y menor contraste a altas frecuencias.

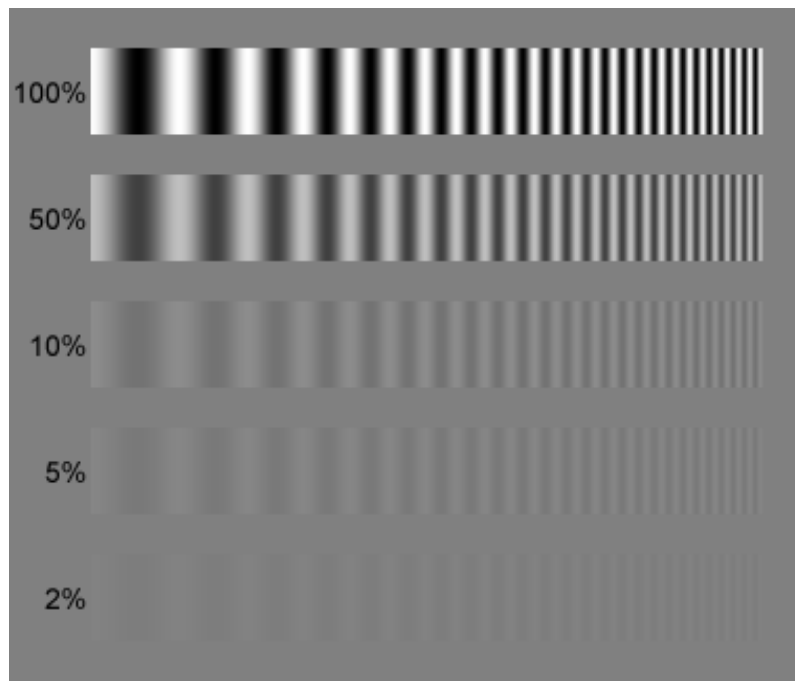


Figura 2.2 Onda senoidal ejemplificando el uso de la MTF

La relación entre la nitidez percibida (expresada en lp/mm o pares de líneas por milímetro) va relacionado con la frecuencia donde la MTF es el 50%, esto es donde el contraste cae a la mitad.

Para conocer la nitidez percibida en lp/mm con una MTF de 50% se parte de resultados experimentales donde la mayoría de los lentes son dominados o su resolución es limitada por las aberraciones ópticas, esto es el límite de Rayleigh, el cual tiene una MTF de alrededor del 9%. Cualquier lente tiene su mejor desempeño al contraste entre la máxima apertura y la apertura donde la difracción lo empiece a dominar. A grandes aperturas la resolución es limitada por las aberraciones ópticas.

Así la difracción empieza a empeorar conforme los f-stops o apertura se incrementan en un lente. La ecuación para el límite Rayleigh es,

$$\text{Límite de Rayleigh} \left(\frac{lp}{mm} \right) = \left(\frac{1}{1.22N\omega} \right) \quad (2.16)$$

Donde N es el f-stop y ω es la longitud de onda de la luz en mm. Haciendo un aproximado para un lente con apertura f/22 del límite al 9% de la MTF es a 68 lp/mm. Así que al 10% sería cerca de 64 lp/mm y al 50% a 32 lp/mm. Esto responde a la relación,

$$f_{10} = \frac{0.77}{N\omega} \quad (2.17)$$

$$f_{50} = \frac{0.38}{N\omega} = 0.46 * \text{límite de Rayleigh}$$

La curva de difracción de la MTF es algo difícil de llegar a expresar matemáticamente, pero puede ser aproximada a los porcentajes de 10 y 50 de la MTF, a través de la siguiente fórmula,

$$MTF_{\text{difracción}}(f) = \frac{1}{\left(1 + \left| \frac{f}{f_{50}} \right|^{3.17} \right)} \quad (2.18)$$

Aun así la apertura a la cual la resolución del lente se limita por la difracción es según la ecuación (2.17), f_{50} , es igual a la frecuencia del 50% de la MTF en la apertura que da mayor nitidez.

Otra manera de entender la definición de la MTF basada en los patrones senoidales es “La MTF es el contraste a una frecuencia espacial (f) relativa al contraste a bajas frecuencias.” Esta dada por:

$$MTF(f) = 100\% \frac{C(f)}{C(0)} \quad (2.19)$$

$$C(f) = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}; \text{ el contraste en la frecuencia } f \quad (2.20)$$

$$C(0) = \frac{V_w - V_b}{V_w + V_b}; \text{ el contraste a bajas frecuencias} \quad (2.21)$$

Donde,

V_b es la iluminación en áreas negras en bajas frecuencias, V_w es el máximo de iluminación en áreas blancas a bajas frecuencias, V_{min} es el mínimo de iluminación a la frecuencia f . V_{max} es el máximo de iluminación a la frecuencia f .

La MTF también puede llegar a ser definida como la transformada de Fourier en el punto o línea de la función dispersión – la respuesta de un sistema óptico a un punto infinitesimal o una línea. Esta técnica es muy precisa y equivalente al concepto anteriormente explicado, el procedimiento se explica en la Figura 2.3(a). Para visualizar el efecto de la MTF, al crear un objetivo de 0.5mm de longitud con un patrón senoidal y uno en forma de barras, ambos empezarían a una frecuencia espacial baja, 2 lp/mm en la izquierda e incrementando logarítmicamente a 200 lp/mm a la derecha. La respuesta a ese objetivo corresponden a un film y un lente de canon 28-70mm f2.8L con una línea roja, la de color azul es la curva de la MTF combinada, la respuesta espacial de la frecuencia del film más el lente, expresado en porcentajes de bajas frecuencias, indicando en una escala a la izquierda. La línea azul en puntitos es la MTF del lente solamente.

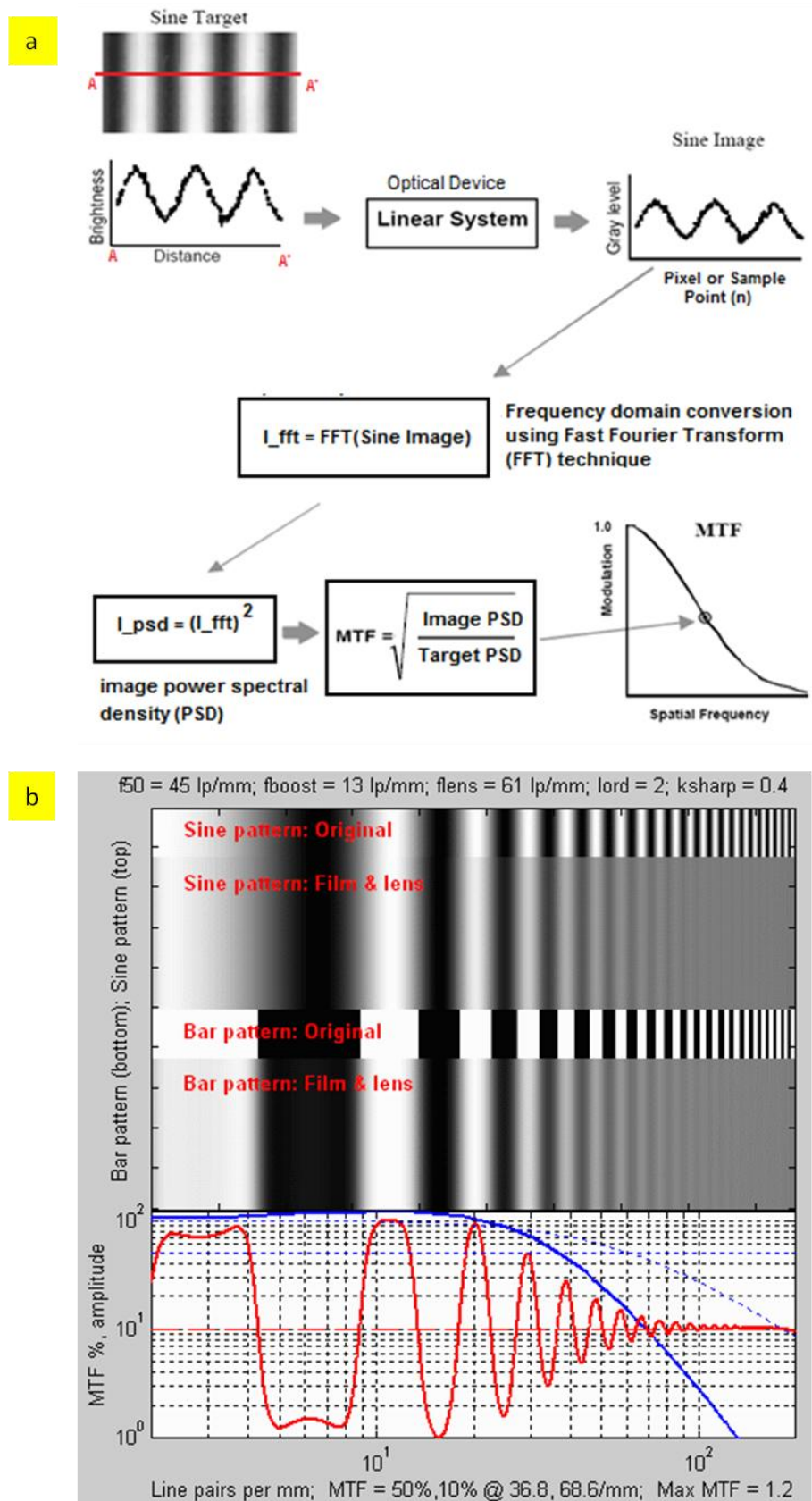


Figura 2.3 (a) Proceso de cálculo de MTF basado en la transformada de Fourier, (b) Simulación de patrón senoidal y de barra con respuesta de MTF (imagen proporcionada por Imatest LLC)

Existe otro método para obtener la MTF, el cual es el preferido por la industria, ya que no requiere de un patrón tan complicado. Este método usa la función de dispersión de orilla (ESF, de la frase “Edge Spread Function”), de acuerdo a ISO 12233. Este se resume al proceso explicado en la Figura 2.4(a). Este método consiste en los siguientes pasos:

1. Identificar el contorno: la actividad inicial de la medición de una MTF es identificar la orilla conveniente para el análisis. La orilla debe ser orientada cerca del principal escaneo o el eje. El ángulo mínimo sobre la dirección principal es requerida como la longitud suficiente para la construcción del ESF. El candidato debe cumplir los requerimientos de contrastes y ruido para la selección. El operador del detector de bordes de Sobel seguido por un nivelador para procesar la imagen y hacerla una imagen binaria es usado para identificar los contornos con una orientación apropiada y una mínima magnitud. Una estimación inicial de la ubicación y el ángulo del contorno es determinado al realizar una regresión de mínimos cuadrados de los puntos seleccionados a lo largo del contorno. Para cada orilla identificada, los métricos son requeridos tal como la magnitud del contorno, el nivel de ruido y longitud.
2. La construcción de la ESF: la ESF es la respuesta del sistema a una entrada de un contorno ideal. Conforme la salida del sistema es una imagen muestreada. La salida del sistema es muestreada, la fidelidad de la ESF usando a una sola línea de la imagen es insuficiente para el análisis de la MTF. Interferencia debido a sobremuestreo en la cámara junto con los efectos de fase y el ángulo del contorno actual con respecto a la matriz de muestreo causaría resultados variables para una sola línea. La construcción de la ESF gráficamente es representada perpendicularmente al contorno y se muestrea de manera paralela a esa orientación los perfiles del contorno, ver Figura 2.4(b). Una vez consolidando todos los datos se hace calcula la curva que pasa por el centro de todos los puntos muestreados, ver Figura 2.4(c).
3. Una vez que la ESF ya fue calculada, la MTF puede ser calculada como se muestra. La función de dispersión de línea (LSF, de la frase “Line Spread Function”) del sistema es calculada al tomar la derivada numérica de muestras ESF igualmente espaciadas. Una FFT es realizada partiendo de la LSF, se normalizada magnitud de

la cual resalta la MTF. Se debe tener cuidado al momento de seleccionar los puntos a lo largo de la ESF con respecto al promedio de muestreo de tal manera que se obtenga el número deseado de resultados de la MTF. También se necesita seleccionar una apropiada escala para el eje de frecuencia de la MTF para representar lo calculado en términos de la frecuencia de Nyquist del sistema. La frecuencia de Nyquist es definida como la mayor frecuencia senoidal que pueda ser representada por la señal muestreada y de igual el muestreo a la mitad de la velocidad de muestreo del sistema.

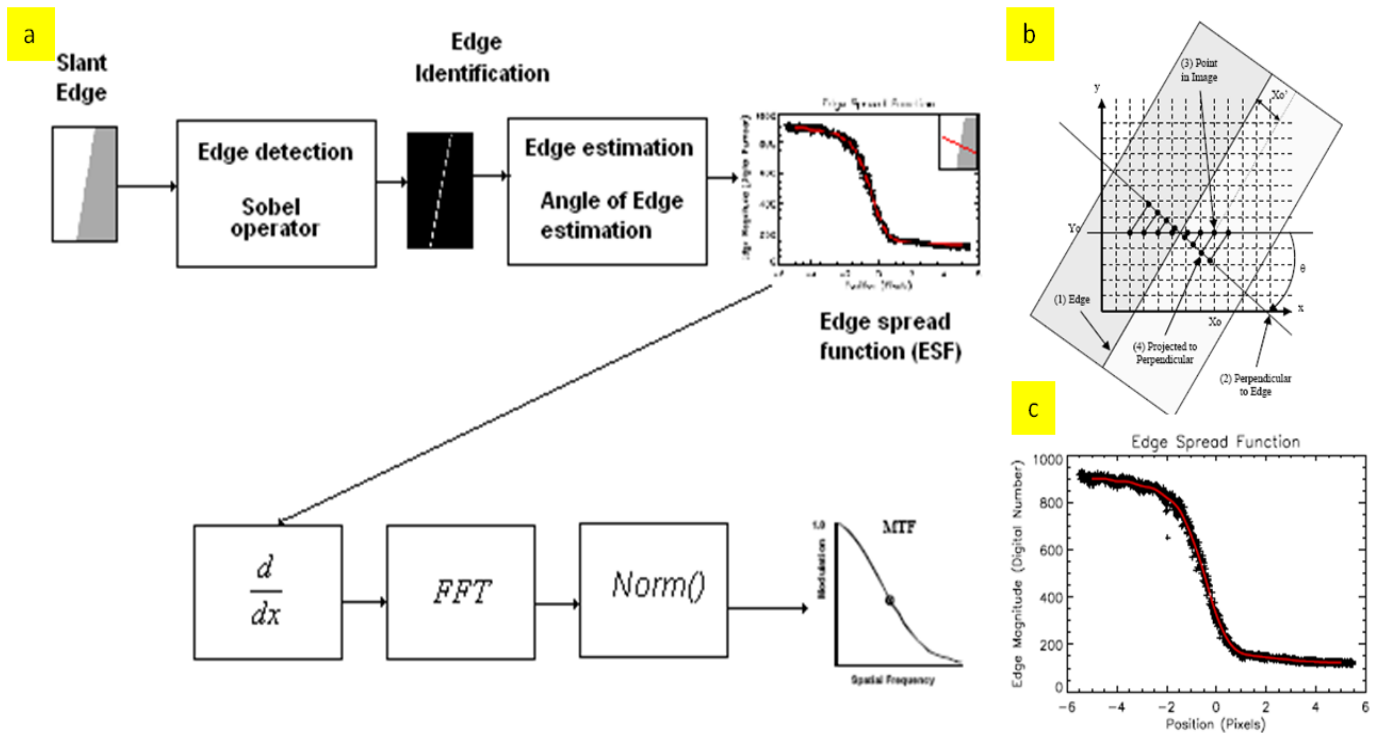


Figura 2.4 (a) Método para calcular la MTF basado en la función de dispersión de orilla, (b) perpendicularidad al contorno de la pieza de calibración, (c) Consolidación de perfiles del contorno

Capítulo 3.

Resultados

En el capítulo anterior se presentó una secuencia de pruebas para caracterizar el sistema CMM y además se propusieron algunas mejoras al método de medición y a las partes del CMM. En este capítulo se abordarán sus resultados.

3.1 Incertidumbre causada por el sistema de movimiento

De acuerdo a lo descrito en la sección 2.1 sobre cómo medir la precisión de la translación entre los puntos A y B contra las distancias ya conocidas del tablero patrón, a continuación se muestran los resultados

Tabla 3.1 Resultados del error de la posición A

	Muestras	Media	Desviación estándar
Eje X (en mm)	100	-3.7×10^{-16}	0.000643
Eje Y (en mm)		-4.8×10^{-15}	0.000615

Tabla 3.2 Resultados del error de la posición B

	Muestras	Media	Desviación estándar
Eje X (en mm)	100	190	0.000603
Eje Y (en mm)		75	0.000047

Por lo que, para conocer la incertidumbre de la translación, se despeja σ_{T_x} , y σ_{T_y} de la suma de los cuadrados de las varianzas

$$\begin{aligned}\sigma_{T_x}^2 &= \sigma_{A_x}^2 + \sigma_{B_x}^2 \\ \sigma_{T_x} &= 0.000881\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{T_y}^2 &= \sigma_{A_y}^2 + \sigma_{B_y}^2 \\ \sigma_{T_y} &= 0.000774\end{aligned}$$

3.2 Incertidumbre en la sensibilidad de la cámara

De acuerdo al método descrito en la sección 2.2.1 para evaluar si la intensidad del objeto y la del fondo producen distribuciones separadas, los resultados de la Figura 3.1(a) y (b) muestran como el método de transmisión tiene un histograma en el que las distribuciones de los niveles de grises, representando el fondo y el objeto, se encuentran separados por más del ancho de alguna de las dos distribuciones, esto bajo las condiciones de magnificación de 1x. Por lo que se selecciona el método de iluminación por transmisión como el idóneo para las siguientes evaluaciones.

Conforme al método de la sección 2.2.2 para medir la respuesta de la iluminación, a través de calcular la media y desviación estándar a diferentes niveles de iluminación, los resultados muestran que existe una menor desviación estándar entre el uso del 30% al 80% del voltaje de operación, ver Figura 3.2(a). Una razón de la baja desviación estándar al detectar un contorno es debido a que la dispersión se separa más fácilmente sobre el histograma en el método por transmisión, ya que lo único que se observa es la sombra del componente. Al revisar la saturación del sensor CCD, ver Figura 3.2(b), se puede observar que la parte en la que la saturación empieza es en el incremento del 20% al 30% del voltaje de operación. Por lo que se opta como la mejor opción, la del 30% del voltaje de operación para la siguiente evaluación.

De acuerdo al método de la sección 2.2.3 para medir la repetitividad de la iluminación al 30% del voltaje de operación de la lámpara y su impacto en la posición de la detección del centro de una fiducial en el tablero de prueba, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados del error causado por la iluminación

	Muestras	Media	Desviación estándar
Eje X (en mm)	300	1.17×10^{-14}	0.000530
Eje Y (en mm)		1.71×10^{-14}	0.000610

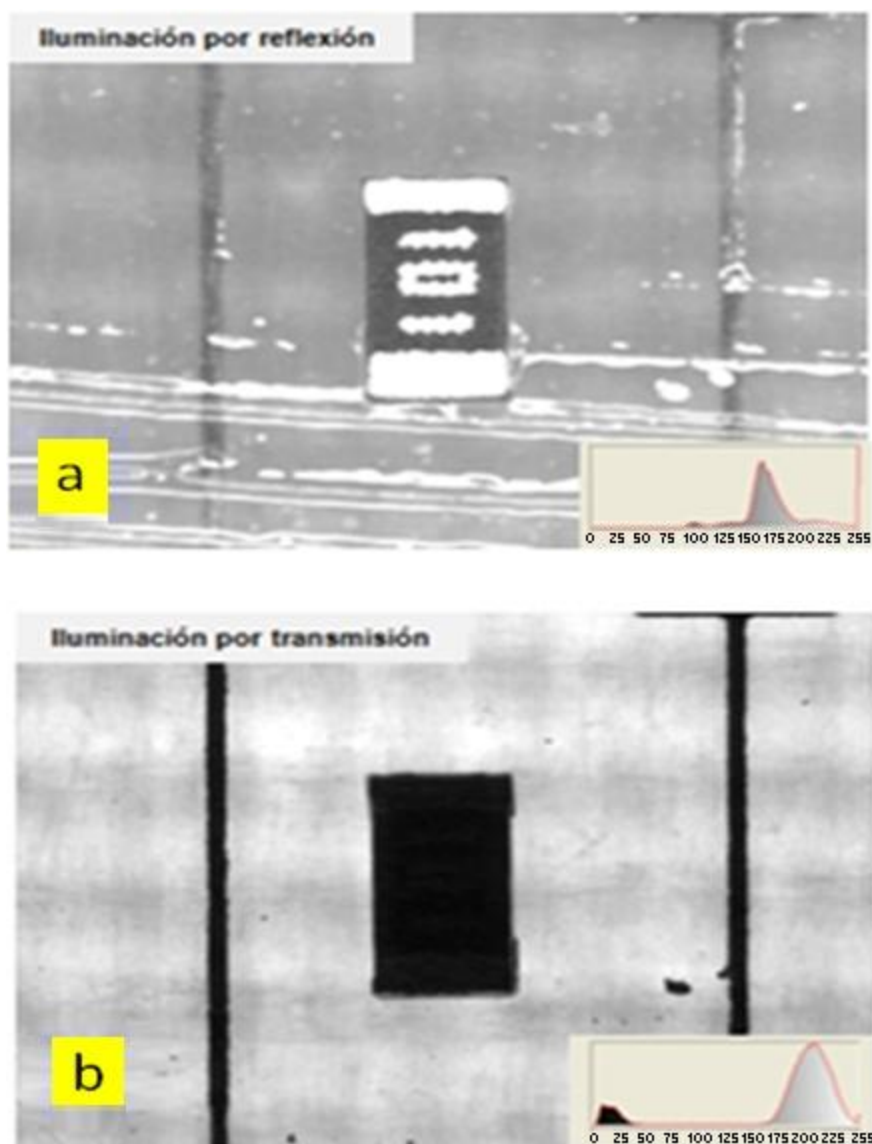


Figura 3.1 Muestras de mejores condiciones de iluminación (a) pro reflexión, donde la distribución del objeto se sobrepone a la del fondo; (b) por transmisión, donde las distribuciones de objeto y fondo son notablemente separadas.

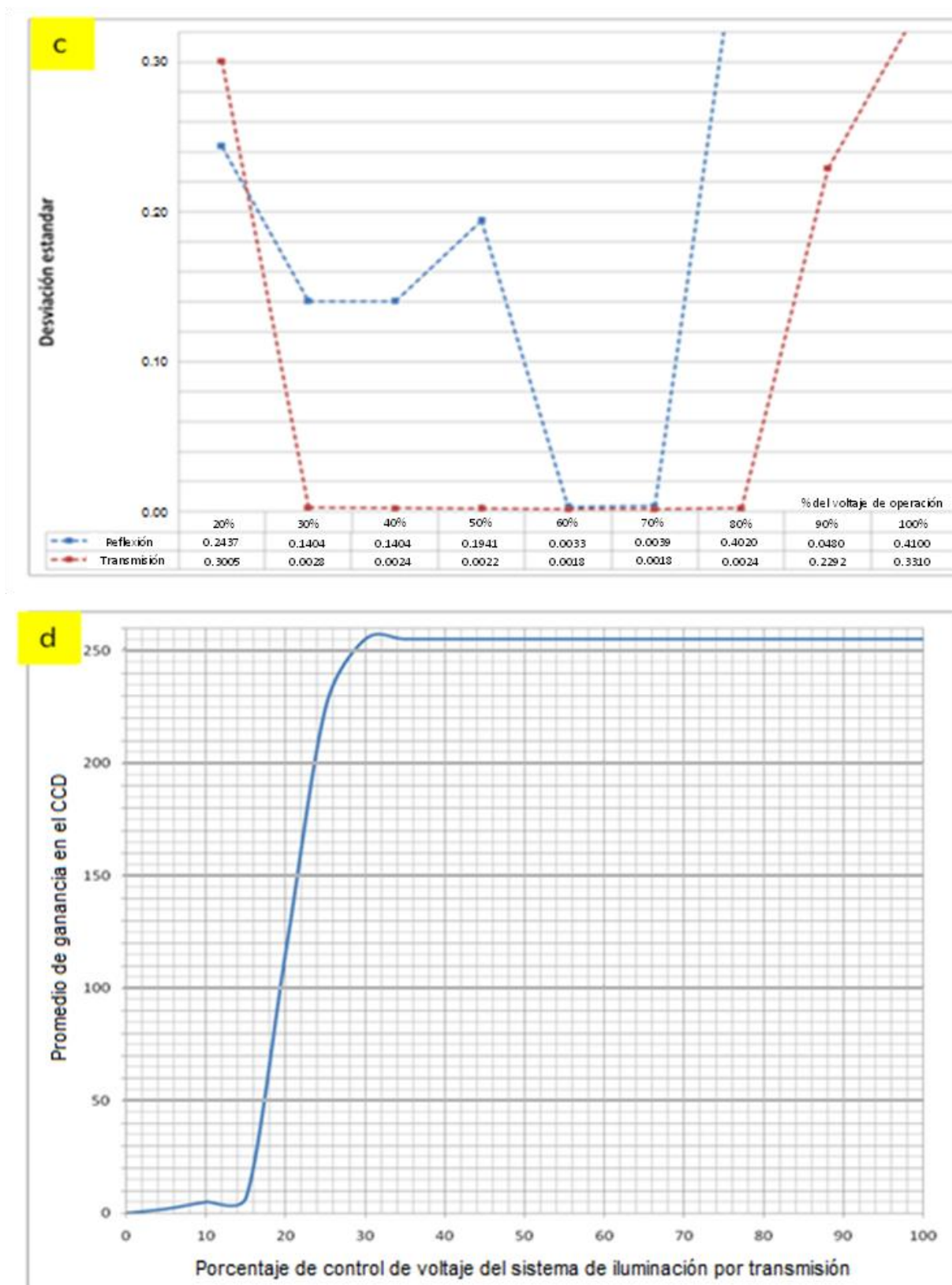


Figura 3.2 (a) Comparación entre la desviación estándar de la intensidad con iluminación por reflexión y transmisión, de ahí se puede notar como el método de transmisión cuenta con una menor desviación estándar. (b) En la ganancia media del sensor CCD vs. el porcentaje de voltaje del sistema de iluminación por transmisión, se observa como aumenta rápidamente la saturación del sensor.

3.2.1 Incertidumbre causada por la evaluación de funciones

De acuerdo a la sección 2.2.3, con lo que respecta a la evaluación de la propagación de error al calcular el centroide de las fiduciales, para f_k y f_h en las ecuaciones (2.11), y usando el simulador de incertidumbre [6], se obtiene los siguientes resultados sobre la desviación estándar de error acarreado por el cálculo:

$$\sigma_{fk} = 0.0000071$$

$$\sigma_{fh} = 0.0000055$$

Tal como se puede observar la imprecisión por el cálculo de las funciones del centroide es insignificante comparado a los resultados de la sección 3.2 y 3.1.

3.3 Resumen de las contribuciones de error

Haciendo un breve resumen del análisis expuesto en las secciones 3.1 y 3.2, se puede llegar a aislar la contribución en la desviación estándar por las tres principales fuentes, ver Tabla 3.4. Claramente se puede observar que la desviación estándar causada por la evaluación de las funciones origina la menor contribución. El sistema de iluminación y la sensibilidad de la cámara son las mayores contribuyentes del error.

Tabla 3.4 Tabla resumen de las contribuciones de error

Fuente de error	σ_x	σ_y
Control de movimiento	0.0003432	0.0001577
Sistema de iluminación por transmisión y la sensibilidad de la cámara	0.0005222	0.0006037
Metodología de medición	0.0000055	0.0000071

3.4 Propuestas para reducción de error

3.4.1 Propuesta para sistema de iluminación

Utilizando un analizador de espectro óptico (HORIBA Jobinyvon VS70-M) el cual tiene una ventana espectral de 190-1000nm de longitud de onda, se realizaron las mediciones del espectro sobre la superficie del difusor, ver Figura 1.12, y fue comparado contra la gráfica de sensibilidad del sensor, ver Figura 1.14(b). Se puede ver como es que la sección de color azul no es iluminada por la fuente mientras en el sensor la sensibilidad es alta en la banda del azul. Lo cual puede causar una alta variación. Como se puede ver el pico de la iluminación sucede desde los 550 a 650nm aproximadamente, dejando una gran sección a recibir ruido del ambiente y de la lámpara.

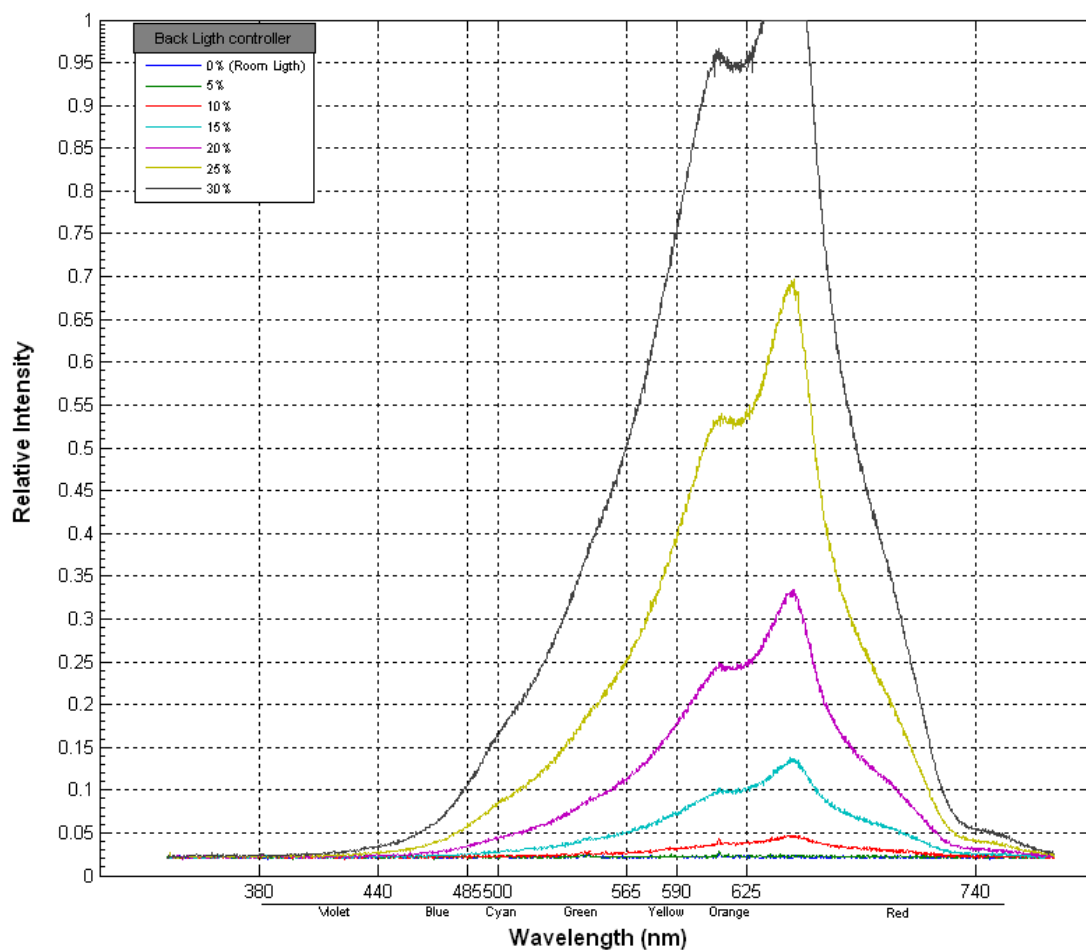


Figura 3.3 Gráfica característica de la lámpara fluorescente del sistema de iluminación

En cambio en la Figura 3.4(a), la gráfica de un LED de luz blanca (LED de estructura InGaN-GaN con recubrimiento Ce^{3+} : YAG), cubre una mayor sección en el espectro visible (380-750nm de longitud de onda), que obviamente debe de ser regulado para que la zonas de interés, donde es sensible la cámara llegue a tener el mismo nivel de intensidad, lo cual evitaría tener señales con ruido siendo capturadas por las celdas del azul principalmente. Ver Figura 1.14(a). Aunado a este análisis, al revisar la curva de transferencia de fotones por color, nos confirma el incremento en la desviación estándar en el color azul.

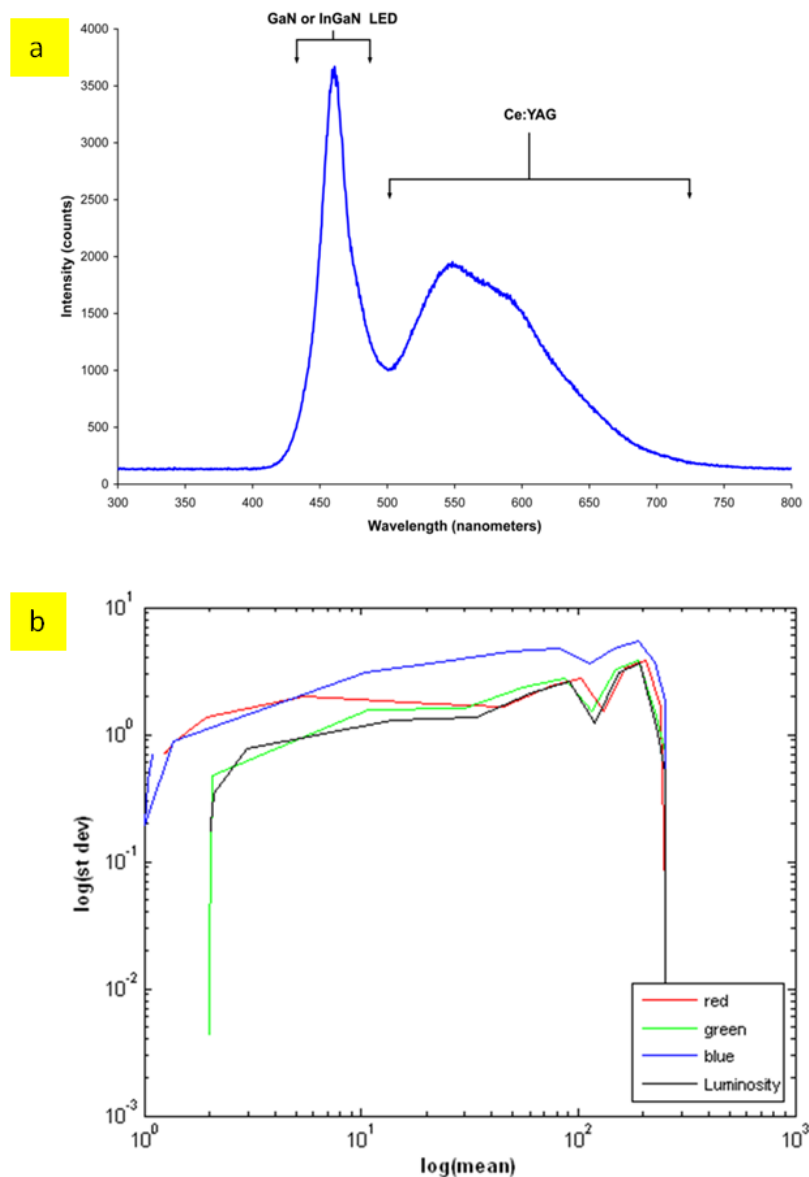


Figura 3.4 (a) Espectro de respuesta de un LED, (b) Curva de transferencia de fotones a magnificación de 1x

En la Figura 3.4(b), se puede observar el rápido incremento de la desviación estándar conforme va cambiando la media, en cambio conforme la iluminación aumenta el verde y el rojo mantienen una baja desviación estándar.

Debido a la imposibilidad de modificar el equipo, no se puede realizar la medición de un LED en lugar de la lámpara fluorescente.

3.4.2 Medición de la capacidad del sistema óptico

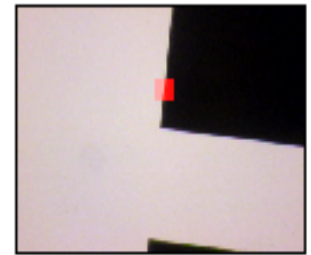
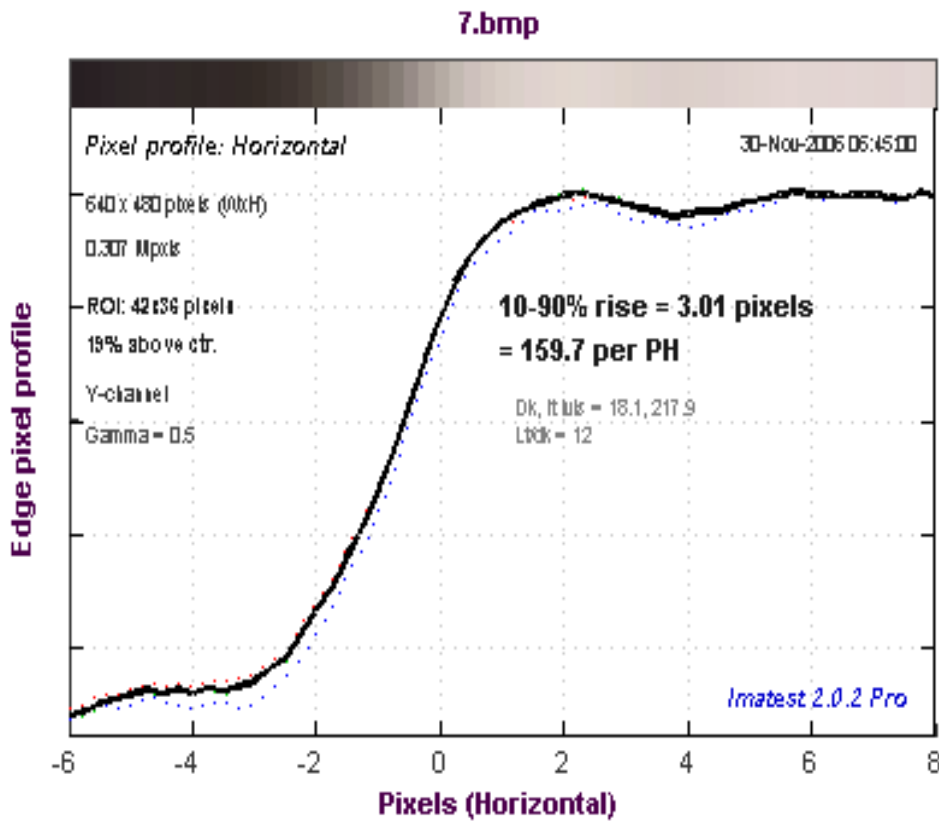
Usando el método descrito en la sección 2.3 y 2.4 se obtienen los resultados, ver la Tabla 3.5, de las diferentes magnificaciones para analizar la capacidad del sistema, y se muestra un ejemplo de los datos arrojados por el programa IMATEST en la Figura 3.5

También se calculó el máximo de error causado por el número de pixeles necesarios para causar el cambio de 10% a 90% del tono del contorno. Para mayor detalle observe la grafica resultante del análisis, en la Figura 3.5.

Al observar los límites establecidos en la industria para la capacidad de montaje observamos que en un solo caso, a 21x de magnificación total, la medición puede llegar a verse comprometida por la capacidad de resolver el contorno de una manera confiable, ver Tabla 3.6 y Tabla 3.7. También el sistema se ve limitado a solo poder evaluar hasta componentes con empaquetado de tipo 0603 ya que la medición tiene un desempeño cuestionable.

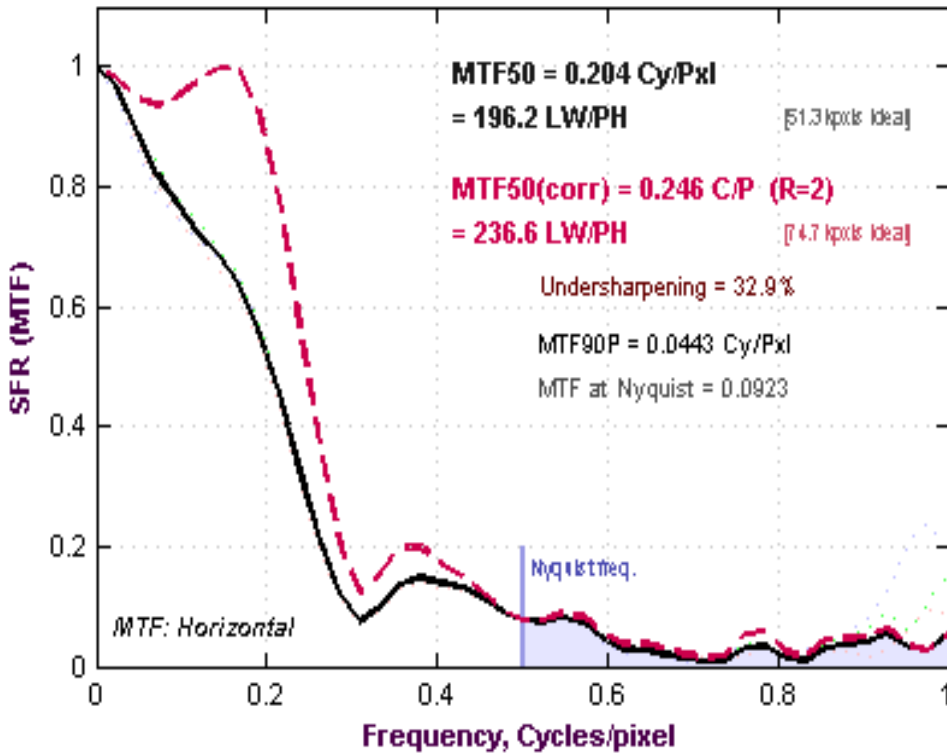
Tabla 3.5 Resultados de mediciones de MTFs a diferentes magnificaciones

mag	FOV(l)	FOV(w)	1mm pix?	0.5mm pix	1 pix (um)	cycle legth (worst) in um	MTF at nyquist freq (%)	Nyquist freq (lp/mm)	MTF50% (lp/mm)	MTF9% (lp/mm)	10-90% rise	max error (um)
3.5x	1471.3	1103.45	435	218	2.29885057	4.597701149	0.07	217.5	89.2	199	2.87	6.597701149
2.5x	2051.3	1538.46	312	156	3.20512821	6.41025641	0.0692	156	69.8	141	2.4	7.692307692
2.0x	2539.7	1904.76	252	126	3.96825397	7.936507937	0.0964	126	56.8	122	2.45	9.722222222
1.5x	3333.3	2500	192	96	5.20833333	10.41666667	0.113	96	43.9	102	2.29	11.92708333
1.0x	4961.2	3720.93	129	65	7.75193798	15.50387597	0.116	64.5	30.8	63.7	2.05	15.89147287
0.85x	5714.3	4285.71	112	56	8.92857143	17.85714286	0.242	56	32.5	73.4	1.77	15.80357143
0.65x	7804.9	5853.66	82	41	12.195122	24.3902439	0.246	41	24.4	54.4	1.74	21.2195122
0.5x	9411.8	7058.82	68	34	14.7058824	29.41176471	0.24	34	20.5	55.6	1.71	25.14705882



ROI: 42x36 pixels

LR T B = 310 351 148 183



Edge angle = -6.52 degs



Figura 3.5 Ejemplo de resultados de análisis para cálculo de la MTF

Tabla 3.6 Criterios de calidad para SMT

Dimensiones (mm)		Tecnología de montaje (mm/pulg.)	Precisión requerida (mm)
L	W		
1.6	0.8	1608/0603	0.2
1.0	0.5	1005/0402	0.1
0.6	0.3	0603/0201	0.05
0.3	0.15	03015/01005	≤0.0075

Tabla 3.7 Capacidad de medición del QS200Z

Magnificación total	Campo de visión (L x W) (en mm)	Error	Capacidad para las mediciones (con un 10% de tolerancia)			
			1608	1005	0603	01005
147x	1.471 x 1.103	0.007	○	○	△	X
105x	2.051 x 1.538	0.008	○	○	X	X
84x	2.539 x 1.904	0.010	○	○	X	X
63x	3.333 x 2.500	0.012	○	△	X	X
42x	4.961 x 3.720	0.016	○	X	X	X
35.7x	5.714 x 4.285	0.016	○	X	X	X
27.3x	7.804 x 5.853	0.021	○	X	X	X
21x	9.411 x 7.058	0.025	△	X	X	X

Donde ○ es buen desempeño,

△ es un desempeño cuestionable,

X es un desempeño no aceptable

En suma, al observar la capacidad del sistema óptico, se propone el utilizar la Tabla 3.7 como referencia para la reducción de error. Así se puede seleccionar la configuración óptima que evite el llegar a comprometer la medición.

3.4.3 Propuesta para sistema de movimiento

Basados en el IPC-9850, se rediseña un PCB (vidrio) con una matriz de fiduciales graduadas. Las fiduciales servirán como referencias a los montajes de componentes de dimensión 1608 con los cuales se evaluará la repetitividad y precisión de un equipo de alta velocidad de 'pick & place'. Las fiduciales están intrínsecamente relacionadas con la secuencia de inspección, los métodos de inspección se describen a continuación

Método A, el campo de visión del equipo de medición no contiene a las 4 fiduciales al mismo tiempo, tal como se muestra en la Figura 3.6(a). Previo a la medición del centroide de la pieza es creado un eje coordenado, el cual sus ejes pasan por el centro de dos de las fiduciales y el centro de una tercer fiducial sirva de origen.

Método B, el campo de visión del equipo de medición contiene a 4 fiduciales al mismo tiempo. Tal como se muestra en la Figura 3.6(b). Este método está diseñado con la intención de aislar la desviación estándar de la medición originada por la translación de la mesa XY o sistema Gantry del equipo de medición.

Se espera que la desviación estándar de la medición longitudinal de 4 fiduciales y comparada con la dimensión diseñada, resultante del Método B deberá ser menor a la del Método A; y ambas distribuciones deberán ser diferentes. La precisión a la traslación fue evaluada al compararla contra una distancia patrón ya conocida. La secuencia fue la siguiente, muy semejante al método del apartado 3.1. Para mayor detalle sobre el programa utilizado para evaluar este método revise el Apéndice en la sección A.4 y A.5

Para el caso del Método A:

- 1) Se elabora un programa CNC para el recorrido de la posición A (0,0) a la posición B (190,75). Ver Figura 2.1. Con el cual se define el eje para el sistema coordenado de la máquina (MCS) al reconocer los centroides de las fiduciales, el sistema coordenado de la parte (PCS) coincide con el MCS, como se describió en el inicio del apartado.

- 2) Basados en el archivo con el que se programaron las posiciones para el montaje es que se realiza el programa para posicionar en dichas posiciones.

3) Una vez que se posiciona en la pieza se corre un programa de reconocimiento de bordes para calcular la posición del centro de la pieza.

4) Esto es después comparado con las posiciones programadas y se calcula el error y la desviación estándar.

Para el caso del Método B:

1) Se elabora un programa CNC para el recorrido de la posición A (0,0) a la posición B (190,75), ver Figura 2.1. Con el cual se define el eje para el sistema coordenado de la máquina (MCS) al reconocer los centroides de las fiduciales, como se describió en el inicio del apartado.

2) De ahí, basados en el archivo con el que se programaron las posiciones para el montaje es que se realiza el programa para posicionar en dichas posiciones. Se recalcula el eje coordenado PCS con las 4 fiduciales tomándolas como referencias.

3) Una vez que se posiciona en la pieza se corre un programa de reconocimiento de bordes para calcular la posición del centro de la de la pieza.

4) Esto es después comparado con las posiciones programadas y se calcula el error y la desviación estándar.

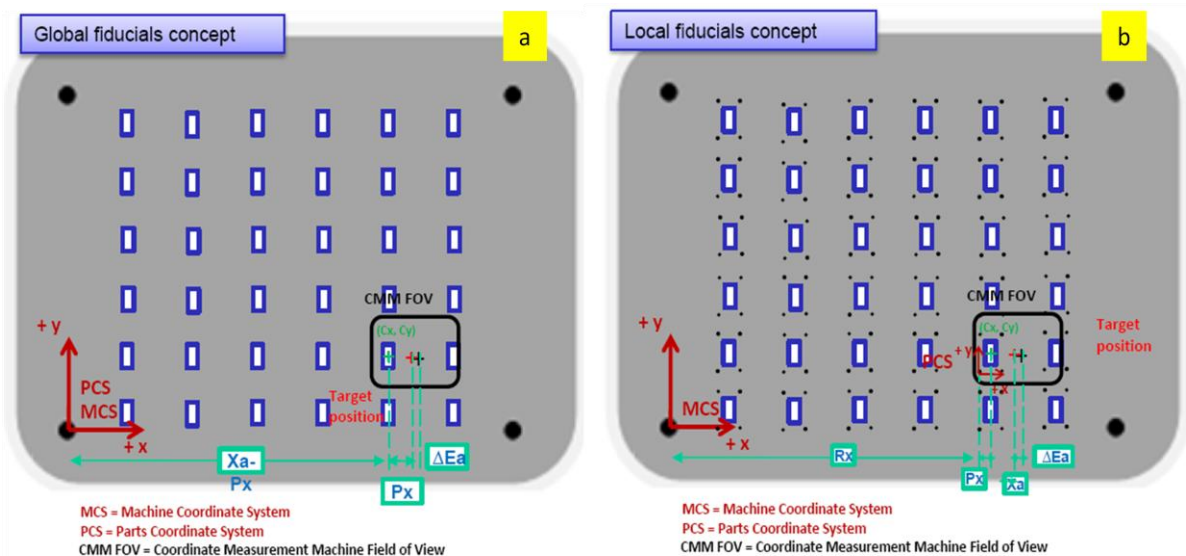


Figura 3.6 (a) Método A: Usando el concepto de fiduciales globales, (b) Método B: Usando el concepto de fiduciales locales

Los resultados muestran una reducción significativa en la desviación estándar, ver Tabla 3.8

Tabla 3.8 Resultados de evaluación de métodos A y B

	Método A		Método B	
	x	y	x	y
Promedio	0	0	0	0
Desviación estándar	0.00064	0.00084	0.00035	0.00050

Así se puede observar como la desviación estándar reduce en 0.00035 aproximadamente, entonces la distribución muestra como se hace más esbelta al cambiar el método de medición. Lo cual contribuye a la reducción de error, tal como se muestra en la Figura 3.7.

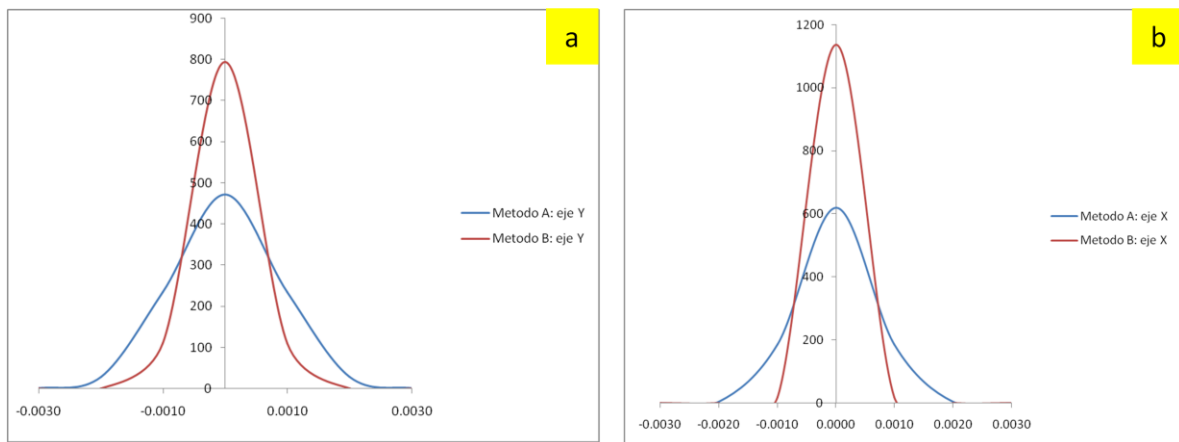


Figura 3.7 (a) Variación de las mediciones en el eje X, (b) Variación de las mediciones en el eje Y

3.4.4 Propuesta para reducción de tiempos

La secuencia inicial de programación del equipo CNC era:

1. Definir el MCS
2. Definir el PCS para eliminar la rotación o desplazamiento al momento de colocarlo.
3. Hacer el recorrido de la punta de prueba, para posicionarse encima de cada pieza.
4. En cada pieza realizar la medición descrita en el apartado anterior y luego posicionarse en la siguiente pieza, y así sucesivamente hasta terminar las piezas programadas.

Siguiendo esta metodología le lleva al equipo procesar 1.5 segundos por pieza. Por lo que la propuesta consiste en:

1. Capturar las imágenes, para reducir el tiempo del traslado y al final procesarlas
2. Debido a que el procesamiento de esta forma no se puede realizar con el equipo integrado por la PC del equipo Mitutoyo QS200Z, se sugiere utilizar una tarjeta o modulo de National Instruments (NI PCI-1405) para adquisición y procesamiento de imágenes.
3. Sobre la secuencia de programación se reduce a los siguientes pasos:
 - a. Secuencia de adquisición de imágenes:
 - i. La cual almacena siempre que una de las marcas entra a una estrecha área, esto coincide con el tiempo entre pieza y pieza en el que se sincroniza el sistema de movimiento y el de adquisición.
 - ii. Las imágenes son almacenadas en posiciones de memoria temporal (RAM) para ser procesadas en menor tiempo.
 - b. Secuencia de procesamiento de imágenes (ver Figura 3.8)
 - i. Se identifican las fiduciales, se fija el PCS
 - ii. Se transforma a binaria la imagen, partiendo de un nivel medio en la escala a 8 bits, esto es 128. Partiendo de,

$$b(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{para los puntos dentro de la pieza u objeto} \\ 0, & \text{para los puntos del fondo} \end{cases}$$

- iii. Se recorta el área entre las fiduciales para definirla como el área de interés.
- iv. Considerando que el objeto tiene un área de,

$$A = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b(i, j) \quad (3.1)$$

lo cual para calcular el centro de masa se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m i b(i, j)}{A} \quad (3.2)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m j b(i, j)}{A}$$

La rotación se recalcula en base a los dos puntos detectados sobre la orilla izquierda de la pieza, los cuales siempre se buscan tras una máscara lateral en las mismas posiciones. Esto se calcula a través de:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) \quad (3.3)$$

Así utilizando dicho método se redujo el tiempo de procesamiento a 70.65 ms por pieza, esto es, debido a que el procesamiento es distribuido entre la tarjeta NI PCI-1405 y la tarjeta de control de movimiento. Aparte de que así los cálculos se reducen, debido a que es procesada la imagen en base a su señal de iluminación (Y) y no a la señal de video compuesto (Y, B-Y, R-Y). Para mayor detalle sobre el programa utilizado para la evaluación vea el Apéndice en la sección A.5

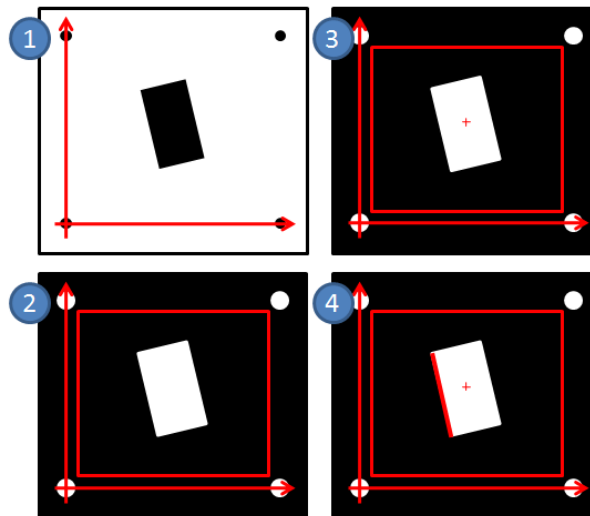


Figura 3.8 Pasos para procesar el centroide y el ángulo de rotación de la pieza

3.5 Medición de resultados en el caso de estudio

Debido a que la implementación de dichas metodologías requiere de la continuidad y el seguimiento de varios grupos, solamente se expondrá la diferencia entre los defectos sucedidos hace 1 año a la situación actual.

Se puede ver la diferencia en la gráfica de la Figura 3.9 donde se muestran que el uso de un sistema con reducción del error en la medición, aparte de la continuidad de su uso y que la toma de decisiones en base a sus resultados permite la reducción de los defectos. Cabe mencionar que dichas gráficas son los resultados de una máquina que se encuentra al final de la línea de producción y que su propósito es solamente inspeccionar por defectos, que quedan clasificados como componentes desplazados.

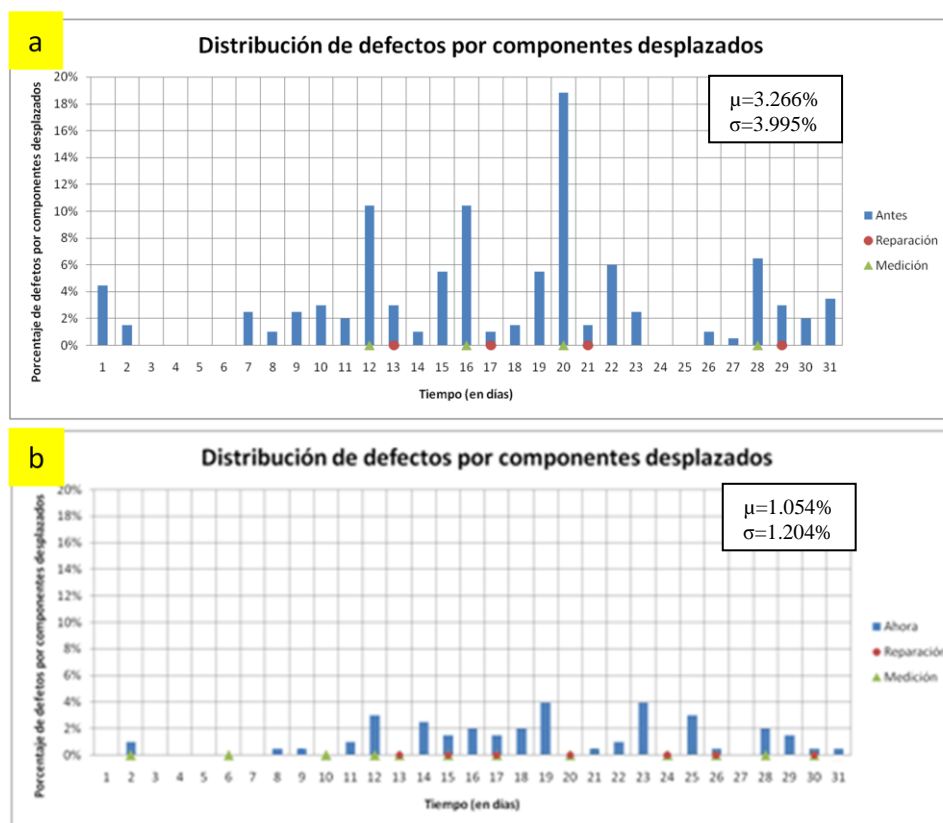


Figura 3.9 (a) Distribución de defectos de hace 1 año, (b) Distribución de defectos más recientes, utilizando un muestreo mas continuo cada 4 días y planeando reparaciones en base a resultados

Capítulo 4.

Conclusiones

La actual metodología propuesta por el IPC 9850, no elimina del todo el error de manufactura del CMM, lo cual lleva a considerar que una selección de un CMM a un mayor costo y su constante recalibración hacen insignificante la contribución del error de manufactura. Por eso el uso de una metodología de medición que ayude a reducir el error se vuelve conveniente para mejorar la producción y previo a la toma de decisiones de inversión fuerte sobre estos equipos.

Tal como se mostró en los capítulos anteriores, el error mecánico se ve drásticamente disminuido al utilizar fiduciales locales y al hacer las mediciones del centro de masa de la pieza relativo a la posición de las fiduciales. Actualmente en la industria de la electrolitografía se cuenta con métodos que garantizan una variación de $0.2\mu\text{m}$ a $0.020\mu\text{m}$, lo cual lo vuelve una forma segura de fabricar una plantilla de medición confiable. Aunado a esto, el error causado por la iluminación se debe de analizar basándose en la capacidad del sistema óptico con el que se cuenta, y no simplemente el aumentar la magnificación de las lentes ópticas creyendo que esto conlleva el aumento en la resolución dimensional automáticamente.

En el caso de estudio, utilizando métodos optoelectrónicos se logro fijar la máxima precisión de la medición del CMM como el grado de confiabilidad de dicha medición. Comprobando que de esta manera, el sistema de medición se puede evaluar y en ella identificar los puntos en los que se puede reducir el error, para después implementarse en una línea de producción de SMT, donde básicamente la implementación y el seguimiento serán la clave del éxito en la reducción de defectos de dichas técnicas.

Capítulo 5.

Bibliografía

- [1] **NIST/SEMATECH.** 6.1.6. What is Process Capability? . *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. [En línea] NIST, 1 de 06 de 2003. [Citado el: 1 de Agosto de 2007.]
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section1/pmc16.htm>.
- [2] **Flayler, Rick.** Surface Mount Technology (SMT) Placement Accuracy Management: Key to Better Profits. *Surface Mount Technology (SMT)*. [En línea] 2005.
- [3] **Suck, Titus T.** Controlling the Process: Post-Reflow AOI to Ascertain Machine and Process Capability. *orbotech*. [En línea] Mayo de 2002.
http://www.orbotech.com/pdf/controlling_the_process.pdf.
- [4] **Electronic Circuit capacitor Division, Matsushita Electric Industrial Co, Ltd.** Panasonic. *Precautions for Soldering*. [En línea] Agosto de 2003.
http://industrial.panasonic.com/ww/i_e/26550/technical_e/technical_e/soldering_failureeng.pdf.

- [5] **Conlon, Peter.** SMT - AOI:-A-Strategy-for-Closing-the-Loop. *SMT*. [En línea] Abril de 2006.
http://smt.pennnet.com/display_article/252910/35/ARTCL/none/none/1/AOI:-A-Strategy-for-Closing-the-Loop.
- [6] **Shattuck, T. W.** Uncertainty Calculator. *Uncertainty Calculator*. [En línea] Colby College Chemistry,. [Citado el: 1 de August de 2007.]
<http://www.colby.edu/chemistry/PChem/scripts/error.html>.
- [7] **IPC.** *IPC/EIA J-STD-001 Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies*. Northbrook, Illinois. : s.n., 2000. J-STD-001.
- [8] **IPC.** *IPC-A-610D Acceptability of Electronic Assemblies*. Bannockburn, Illinois. : IPC, 2000. A-610D.
- [9] **IPC.** *IPC-S-816 SMT Process Guideline and Checklist*. Northbrook, Illinois. : IPC, 1993. S-816.

Capítulo 6.

Apéndice

A.1 Medición de repetitividad y precisión.

Repetitividad. Esta es definida como una desviación estándar del error de posicionamiento de múltiples montajes a través de múltiples tableros de prueba, PVPs. Una desviación es definida como el error de posicionamiento experimentado cuando una maquina posiciona un componente.

El error de posicionamiento es definido como la distancia entre el centro actual del componente a la posición específica diseñada con referencia a las fiduciales del tablero. Ver Figura A.6.1

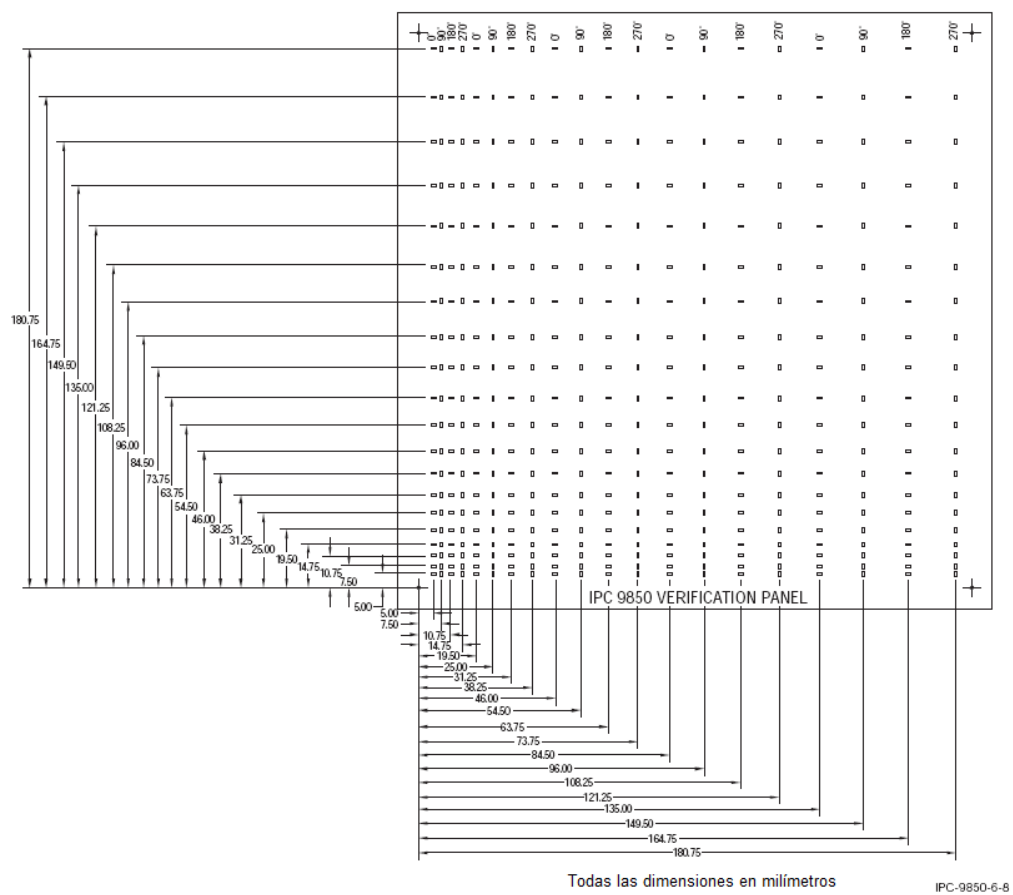


Figura A.6.1 Tablero de pruebas recomendado en el IPC-9850

Así la repetitividad se mide utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{Promedio } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{A.1})$$

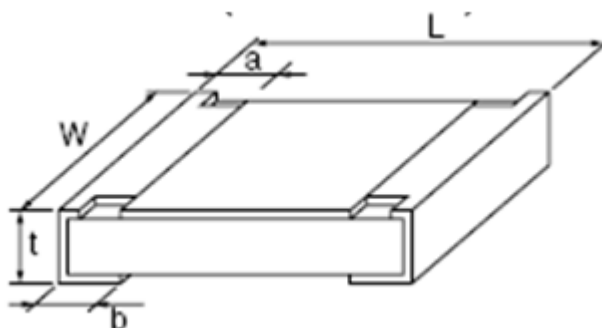
$$\text{Desviación estandar } S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{A.2})$$

Donde i se refiere al componente y X_i se refiere al error de x en el i -ésimo componente y n se refiere al número total de componentes montados sobre el tablero.

Precisión. En cuanto al método para medir la precisión, en la industria la mayoría de los proveedores especifican su desempeño contra sus propios y únicos límites de especificación y valores de capacidad (ej. $\pm 40\mu\text{m}$ con $C_{pk} \geq 1.5$). Uno de los aspectos que resalta el IPC-9850 es que lugar de tener diferentes límites de especificación y diferentes niveles sigma para cada proveedor, los resultados de todos deberían proveerse en términos de límites requeridos para sostener un C_{pk} de 1.33 y de 2.0. Esto lleva a comparar directamente un equipo a otro dentro de los mismos parámetros.

Para fijar los límites de especificación para C_{pk} son los límites de especificación para los cuales la máquina es capaz de montar componentes de dimensiones específicos con referencia a las fiduciales del panel. Estos parámetros indicarían la habilidad de la máquina para generar un montaje centrado con un índice de capacidad de proceso, C_{pk} . Los límites para C_{pk} de 1.33 implican una capacidad de hasta 64 PPMs y en el caso de C_{pk} de 2.0, implica una capacidad de 0.002 PPMs. El método de cálculo es el siguiente:

$$\text{Límite de especificación} = (3\sigma)(C_{pk}) + |\mu| \quad (\text{A.3})$$



Tipo (mm/pulg)	Dimensiones (mm)					Masa (Peso) (g/1000 pzas)	Presición de montaje requerida
	L	W	a	b	t		
0402/01005	0.40 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.10 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.04	$\leq 0.0075^{**}$
0603/0201	0.60 ± 0.03	0.30 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.15	0.0500*
1005/0402	1.00 ± 0.06	0.50 ± 0.03	0.20 ± 0.10	0.25 ± 0.03	0.35 ± 0.03	0.80	0.1000*
1608/0603	1.60 ± 0.15	0.8 ± 0.10	0.30 ± 0.20	0.30 ± 0.15	0.45 ± 0.10	2.00	0.2000*

*Basado en el estandar de montaje IPC 782A

** Basados en resultados de investigación de Speedline Technologies / Panasonic

Figura A.6.2 Estándares de montaje

Debido a que la mayoría de los defectos son causados por la combinación de grandes errores de posicionamiento en X, Y y θ . Se recomienda el definir los parámetros para diversos empaquetados donde es confiable el permitir la holgura del error de montaje. El IPC-9850 recomienda el clasificarlos en base al porcentaje de área sobrepuestos de la terminal y la impresión de cobre, comúnmente llamado 'Land'. Las dos clasificaciones mayores son los de 50 de sobre posición y el de 25% de sobre posición. En el especial caso de empaquetados como el 1608, el cálculo de área de sobre posición no es necesario ya que las pruebas de confiabilidad publicadas en otros documentos [7] [8] muestran que no hay una sustancial diferencia entre ellos.

A.2 Programas para la evaluación de la precisión del desplazamiento

Tal como se menciona en la sección 2.1, se requirió realizar un programa en el lenguaje CNC del equipo QScope de Mitutoyo, para realizar el desplazamiento de la meza y captura de imágenes; el procesamiento de imágenes en este caso fue realizado usando un programa de Mathworks Matlab 7.0 R14. A continuación se presentan dichos programas:

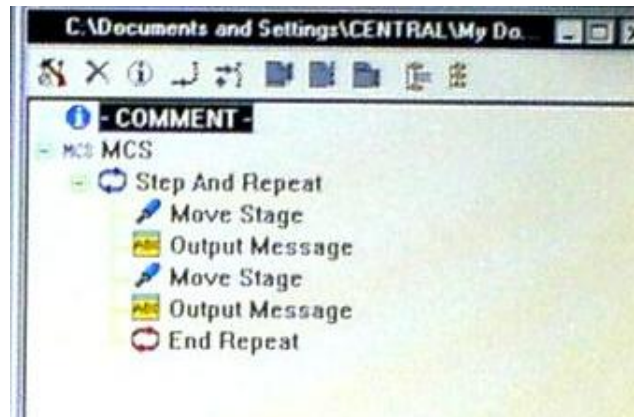


Figura A.6.3 Programa CNC de desplazamiento entre dos puntos

En la Figura A.6.3, se muestra el programa CNC, que es relativamente sencillo de modificar, ya que en el nemónico “Step And Repeat”, se encuentra especificado el número de repeticiones para el desplazamiento entre las posiciones que se indican en el nemónico de “Move Stage”, los “Output Message”, son utilizados para crear un retraso de aproximadamente 200 milisegundo en el equipo. Lo cual es suficiente para capturar la imagen con una aplicación externa.

Con respecto al programa de Matlab a continuación se incluye el código fuente

```

000      clear all
010      clc
020      n pics = 100;
030      path = 'c:\Maestria\test1\pics\';
040      name = 'test_i';

050      for n=1:n pics
060          pic = [path,name,int2str(n),'.jpg'];

070          RGB =imread(pic);
080          [h,l,d]= size(RGB);
090          RGB1 = imcrop(RGB, [213 160 243 190]);
100          RGB2 = imcrop(RGB, [400 160 430 190]);
110          RGB3 = imcrop(RGB, [290 290 310 310]);
120          clear RGB pic
130          BW1 = edge(RGB1,'sobel',0.8);
140          BW2 = edge(RGB2,'sobel',0.8);
150          BW3 = edge(RGB3,'sobel',0.8);
160          clear RGB1 RGB2 RGB3

170          [x1,y1]=find(BW1>0.9,1);
180          x1 = 213+x1 - 1/2;
190          y1 = h/2 - 160+y1;

200          [x2,y2]=find(BW2>0.9,1);
210          x2 = 400+x2-1/2;
220          y2 = h/2-160+y2;

230          [x3,y3]=find(BW3>0.9,1);
240          x3 = 290+x3-1/2;
  
```

```

250         y3 = h/2-290+y3;
260         clear BW1 BW2 BW3
270         p_pix(n,:) = [x1,y1; x2,y2; x3,y3];
280         p_mm(n,:) = 0.00775*p_pix(n,:);
290         h(n) = det([x1^2+y1^2 y1 1; x2^2+y2^2 y2 1; x3^2+y3^2 y3 1])
/ (2*det([x1 y1 1;x2 y2 1;x3 y3 1]));
300         k(n) = det([x1 x1^2+y1^2 1; x2 x2^2+y2^2 1; x3 x3^2+y3^2 1])
/ (2*det([x1 y1 1;x2 y2 1;x3 y3 1]));
310         clear x1 x2 x3 y1 y2 y3
320     end
330         u_x = mean(h)
340         u_y = mean(k)
350         std_x = std(h)
360         std_y = std(k)

```

Se puede observar que el programa esta dividido en hasta la línea 070, donde se realiza la lectura de las imágenes, la sección de la 080 a la 160 es para cortar las imágenes en 3 secciones y aplicar el operador de Sobel, en la sección de la 170 a 260 se detectan los 3 puntos con los que se realizara el cálculo del círculo, de la 290 a la 320 se calcula el centro del círculo y de la 330 a la 360 se calculan las medias y desviaciones estándares.

A.3 Programa para la medición de la sensibilidad del CCD y la curva de transferencia de fotones

Tal como se menciona en la sección 2.3, el siguiente programa es utilizado para procesar las imágenes ya capturadas y obtener la curva de transferencia de fotones, esto fue realizado en Mathworks Matlab 7.0 R14.

```

000     n_pics = 100
010     path = 'c:\Maestria\test1\pics\'
020     namei = 'test_i'
030     namej = 'test_j'
040     for n=1:n_pics
050         pic_i = [path,namei,int2str(n),'.jpg'];
060         pic_j = [path,namej,int2str(n),'.jpg'];
070         RGB =imread(pic_i);
080         [h,l,d]= size(RGB);
090         CROPi = imcrop(RGB, [l/2-50 h/2-50 l/2+50 h/2+50]);
100         clear RGB h l d
110         RGB =imread(pic_j);

```

```

120         [h,l,d]= size( RGB)
130         CROPj = imcrop( RGB, [l/2-50 h/2-50 l/2+50 h/2+50]);
140         clear RGB h l d pic_i pic_j

150         [h,l,d] = size(CROPi);
160         N= h*l;
170         diffs(n) = CROPi-CROPj;
180         std_RMS(n) = std(diffs);

190         t= reshape(CROPi,1,size(CROPi,1)*size(CROPi,2))
200         clear CROPi
210         CROPi= t
220         clear t

230         t= reshape(CROPj,1,size(CROPj,1)*size(CROPj,2))
240         clear CROPj
250         CROPj= t
260         clear t

270         u_a(n) = mean(CROPi);
280         u_b(n) = mean(CROPj);
290         sig(n) = ((1/(2*(N-1)))*
sum(((CROPi-u_a(n))-(CROPj-u_b(n))).^2))^0.5;

300         clear CROPi CROPj N

310     end
320     loglog(u_a,sig)

```

De la línea 000 a la 140 se realiza la captura y recorte de las imágenes a secciones al centro de la pantalla de 100 x 100 píxeles, de la línea 150 a la 180 se calcula las diferencias y el ruido RMS, de la línea 190 a 320 se hace el cálculo de la media y desviación estándar para la curva de transferencia de fotones.

A.4 Programa para la reducción de error en el desplazamiento usando Método A.

La parte de desplazamiento se realiza utilizando un programa de CNC, como a continuación en la Figura A.6.4(a) se presenta. Mientras el programa de procesamiento de imágenes se realiza a través de un programa usando el módulo de NI Vison Builder para aplicaciones de visión, de este se muestra la pantalla con el código fuente en la Figura A.6.4(b)

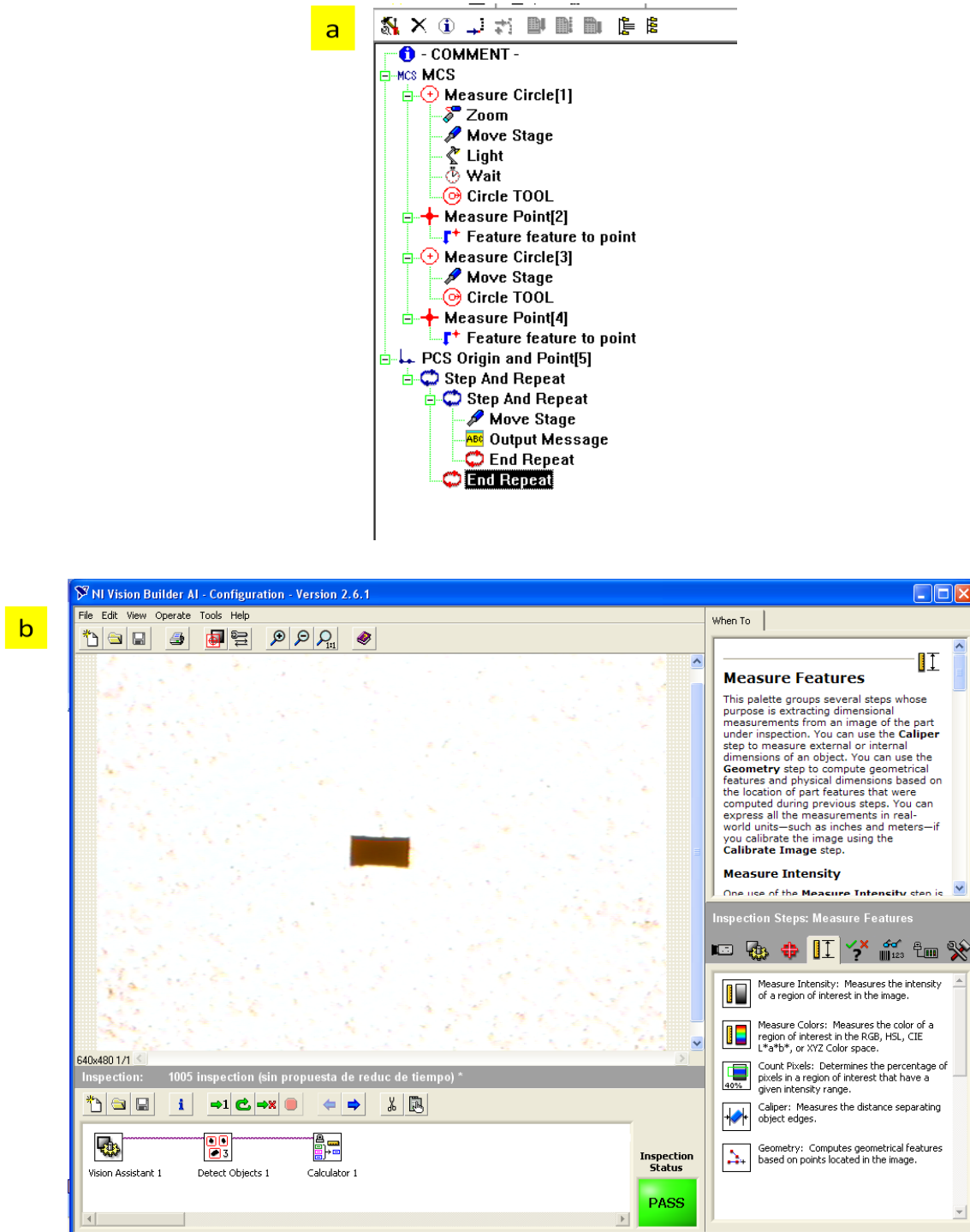


Figura A.6.4 (a) Programa CNC de desplazamiento de la pieza, (b) programa de reconocimiento del objeto, detección del centroide y cálculo de la orientación

A.5 Programa para la reducción de error en el desplazamiento usando Método B.

La parte de desplazamiento se realiza utilizando un programa de CNC, como a continuación en la Figura A.6.5(a) se presenta. Mientras el programa de procesamiento de imágenes se realiza a través de un programa usando el módulo de NI Vision Builder para aplicaciones de visión, de este se muestra la pantalla con el código fuente en la Figura A.6.5(b), este cuenta con una etapa de detección de fiduciales en la parte inferior de la pantalla seguido por la detección del centroide del chip y desplegado de datos.

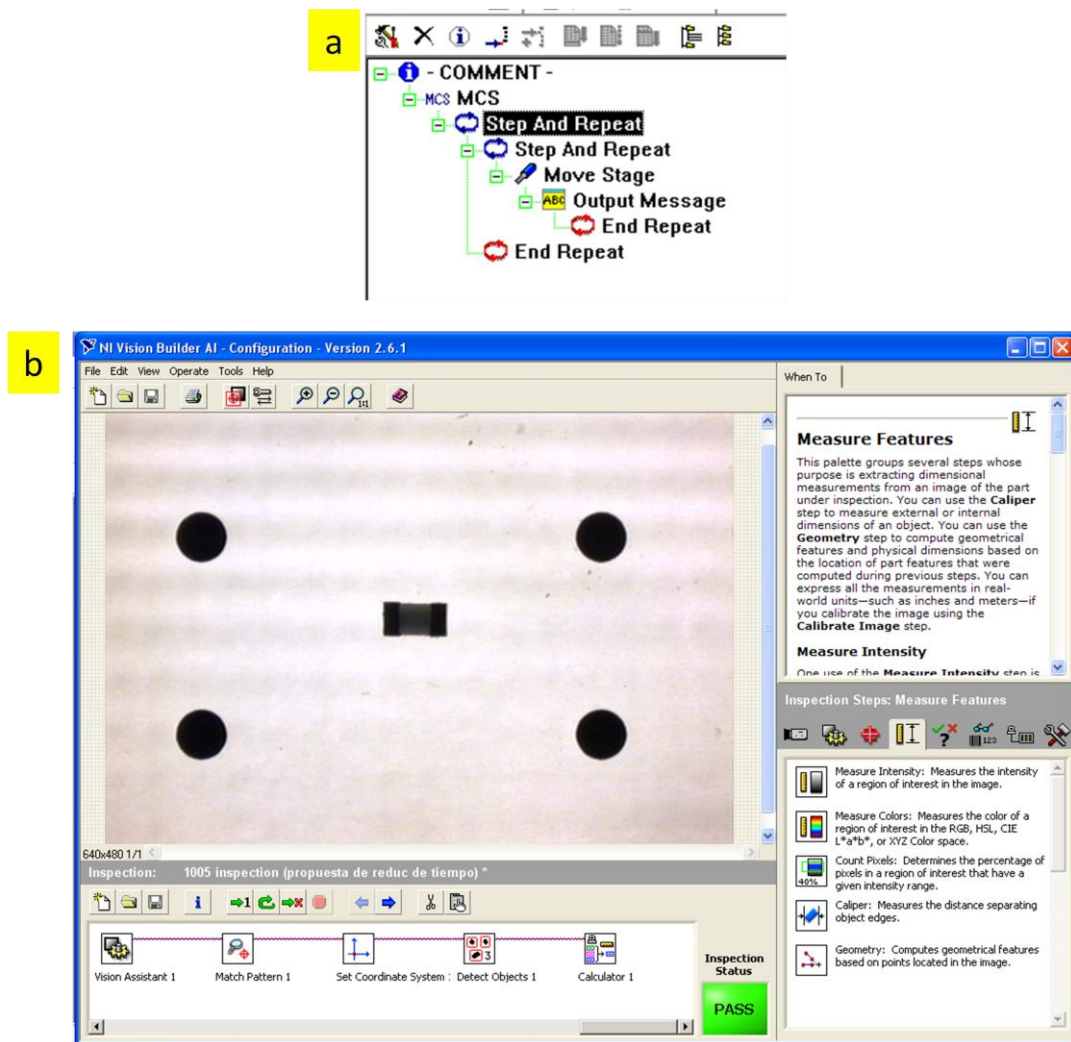


Figura A.6.5 (a) Programa CNC de desplazamiento de la pieza, (b) programa de reconocimiento del objeto, detección del centroide y cálculo de la orientación partiendo de la orientación de las fiduciales