



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Área Académica de Computación y Electrónica

Licenciatura en Ingeniería en Electrónica

***Optimización del proceso de ensamble electrónico
automatizado en una línea SMT, análisis de eficiencia y
reducción de tiempos.***

T E S I S

***Que para obtener el grado de:
Licenciada en Ingeniería en Electrónica***

P R E S E N T A:

Joana Itzel Canales Santiago

Director De Tesis:

Dr. José Luis González Vidal

Codirector De Tesis:

Dr. Heberto Gómez Pozos



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 1 de junio de 2026

Número de control: ICBI-D/1021/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica **Joana Itzel Canales Santiago**, quien presenta el trabajo de titulación **"Optimización del proceso de ensamble electrónico automatizado en una línea STM, análisis de eficiencia y reducción de tiempos"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas

Secretario: Dr. Heberto Gómez Pozos

Vocal: Dr. José Luis González Vidal

Suplente: Dr. Esteban Rueda Soriano

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184

Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

Agradecimiento

A mi papá que siempre ha estado conmigo apoyándome desde el día que inicio mi carrera, cada desvelada acompañándome y cada sacrificio ha valido toda la pena, gracias por mostrarme el valor de la disciplina.

A mi madre que me enseñó la verdadera fortaleza que en mi había.

A mi hermano que a su manera pudo motivarme para seguir adelante y ha estado conmigo desde siempre.

Al sol que siempre ilumina mi vida y este largo camino desde el día uno, tu apoyo incondicional me impulsa cada día a querer continuar.

A mis amigas y amigos que me acompañaron en esta carrera, siempre los llevaré en mi corazón.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, mi casa de estudios por brindarme la formación académica y logro hacer que llegara hasta este momento.

Al Dr. José Luis González Vidal, asesor de tesis, por haberme brindado la confianza y su orientación para la realización de este trabajo, gracias por su tiempo y paciencia.

A mi gran equipo de trabajo, en especial a mis 2 grandes mentores que me ayudaron y transmitieron todo su conocimiento, siempre estarán presentes en mi vida, gracias a todo su apoyo y su aportación para que este proyecto se lleve a cabo.

Y a todas y cada una de las personas que siempre confiaron en el proceso tanto como yo, su aportación a todo esto es también de mucha importancia.

Resumen

El presente trabajo aborda la optimización del proceso de ensamble electrónico mediante tecnología SMT (*Surface Mount Technology*) en una línea de producción automatizada, con el objetivo de reducir defectos y mejorar la confiabilidad de las tarjetas electrónicas ensambladas. La investigación fue desarrollada en un entorno industrial real, permitiendo analizar directamente las diferentes etapas del proceso de manufactura electrónica, incluyendo impresión de soldadura en pasta, colocación automática de componentes, soldadura por reflow e inspección óptica automatizada.

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron defectos recurrentes tales como puentes de soldadura, insuficiencia de soldadura, desplazamiento de componentes y soldaduras frías, los cuales generaban retrabajos, incremento de costos y disminución de la eficiencia del proceso. Mediante herramientas de análisis industrial y de calidad, como, diagrama de Ishikawa y metodología A3, se determinaron las principales causas raíz asociadas a variaciones en parámetros críticos de operación.

Con base en los resultados obtenidos, se propuso una estrategia de optimización enfocada en la estandarización y control de parámetros de impresión SMT, calibración de equipos pick and place, optimización del perfil térmico del horno de reflow y optimización de impresión de soldadura en pasta.

La implementación de las mejoras permitió disminuir significativamente la incidencia de defectos en la línea SMT.

Finalmente, esta investigación demuestra la importancia de la integración entre manufactura electrónica, automatización industrial y control de procesos para incrementar la competitividad y eficiencia en líneas de producción SMT modernas.

Abstrac

This work addresses the optimization of the electronic assembly process through Surface Mount Technology (SMT) in an automated production line, with the aim of reducing defects and improving the reliability of assembled electronic boards. The research was developed in a real industrial environment, allowing direct analysis of the different stages of the electronic manufacturing process, including solder paste printing, automatic component placement, reflow soldering, and automated optical inspection.

During the development of the project, recurring defects such as solder bridges, insufficient solder, component misalignment, and cold solder joints were identified, generating rework, increased production costs, and reduced process efficiency. By industrial and quality analysis tools, such as the Ishikawa diagram and A3 methodology, the main root causes associated with variations in critical operating parameters were determined.

Based on the obtained results, an optimization strategy was proposed focusing on the standardization and control of SMT printing parameters, calibration of pick and place equipment, optimization of the reflow oven thermal profile, and optimization of solder paste printing.

The implementation of the proposed improvements significantly reduced the incidence of defects in the SMT line.

Finally, this research demonstrates the importance of integrating electronic manufacturing, industrial automation, and process control in order to increase competitiveness and efficiency in modern SMT production lines.

Tabla de contenido

Contenido

Agradecimiento	2
Resumen.....	3
Abstrac	4
Tabla de contenido.....	5
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	10
Capítulo 1. Marco teórico.	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Problemática.....	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.1. Historia del ensamble de montaje superficial (SMT)	15
1.1.1. Válvulas termoiónicas	15
1.1.2. Placa de circuito impreso (PCB)	16
1.1.2.1. Historia de la placa de circuito impreso (PCB)	17
1.1.2.2. Tipos de placa de circuito impreso (PCB)	18
1.2. Componentes SMD	19
1.2.1. Resistencias	20
1.2.2. Capacitores.....	21
1.2.3. Capacitores de tantalio.....	22
1.2.4. Capacitores electrolíticos de aluminio.....	23
1.2.5. Inductores	24
1.2.6. Diodos y transistores.	25
1.2.7. Circuitos integrados.	26
1.2.7.1. Terminales de circuitos integrados.....	27
1.2.7.2. SOIC	29
1.2.7.3. VCO	29
1.2.7.4. PLCC	30
1.2.7.5. QFP.....	31
1.3. Proceso de ensamble SMT	32

1.3.1.	Impresión de soldadura en pasta.....	32
1.3.2.	Soldadura en pasta	33
1.3.2.1.	Propiedades de la soldadura en pasta.....	34
1.3.2.2.	Clasificación de la soldadura en pasta.....	35
1.3.2.3.	Recomendaciones para la soldadura en pasta	38
1.3.3.	Esténcil.....	39
1.3.3.1.	Diseño de esténcil.	40
1.3.4.	Squeegee blades.....	46
1.3.5.	Parámetros de impresión.	47
1.3.5.1.	Ciclo de impresión.....	48
1.3.5.2.	Montaje de la placa.	49
1.3.5.3.	Velocidad de impresión.	50
1.3.5.4.	Presión de impresión.	51
1.3.5.5.	Ángulo de impresión.	51
1.3.5.6.	Velocidad de separación de la plantilla.	52
1.3.5.7.	Limpieza de esténcil.....	53
1.3.6.	Inspección.....	54
1.3.7.	Máquina Pick and Place.....	55
1.3.7.1.	Historia.	56
1.3.7.2.	Composición/Funcionamiento.	57
1.3.8.	Sistema de Inspección Óptica Automatizada (AOI).....	59
1.3.8.1.	Composición/Funcionamiento.	60
1.3.9.	Horno de reflujo.	60
1.3.9.1.	Funcionamiento.	61
1.3.9.2.	Reflujo y perfiles.	61
	Capítulo 2 Metodología y desarrollo.....	64
2.	Análisis del proceso de ensamble SMT en la línea de producción de una empresa. 64	
2.2.1.	Despachador de tarjetas.	67
2.2.2.	Impresión de soldadura en pasta.	68
2.2.3.	Inspección de soldadura en pasta (SPI).....	69
2.2.4.	Colocación de componentes (Pick & Place).	70
2.2.5.	Horno de reflujo.	71
2.2.6.	Inspección Óptica Automatizada (AOI).....	73

2.3. Defectos y posibles causas que se tienen hasta el momento en el proceso de ensamble SMT	74
2.3.1. Clasificación de defectos detectados y sus posibles causas.....	74
2.4. Parámetros críticos de operación	78
2.4.1. Parámetros en la impresión de soldadura en pasta.	78
2.4.2. Parámetros de la colocación de componentes.....	79
2.4.3. Parámetros en el proceso de soldadura por reflow	80
2.4.4. Parámetros en inspección y control de calidad.	81
2.5. Propuesta e implementación de soluciones en el proceso de ensamble SMT.....	83
2.5.1. Optimización de impresión de soldadura en pasta.....	85
2.5.1.1. Estandarización de parámetros.	85
2.5.1.2. Climatizador de pasta.	90
2.5.1.3. Funcionamiento.	91
2.5.1.4. Objetivo.	92
2.5.1.5. Componentes principales.....	92
2.5.1.6. Beneficios obtenidos.....	93
2.5.2. Optimización de colocación automática de componentes.....	95
2.5.3. Optimización del horno de reflujo.	100
Capítulo 3. Conclusiones y recomendaciones.....	103
Glosario	104
Bibliografía.....	108

Índice de figuras

Figura 1. Estructura interna de la válvula termoiónica [5].	16
Figura 2. Esquema de un circuito impreso multicapa.	19
Figura 3. Estructura de una resistencia smd [13].	20
Figura 4. Tamaños de encapsulados de componentes smd pasivos [17].	21
Figura 5. Composición de un capacitor smd [13].	22
Figura 6. Estructura de un capacitor de tantalio [13].	23
Figura 7. Tipo de encapsulados para capacitores electrolíticos de aluminio [13].	24
Figura 8. Estructura de chip inductor smd multicapa [13].	25
Figura 9. Tipos de encapsulados para diodos y transistores [14].	25
Figura 10. Características de un circuito integrado de montaje superficial [8].	26
Figura 11. Tipos de Pads vista transversal.	27
Figura 12. Configuraciones de terminales de circuitos integrados SMD [13].	29
Figura 13. Algunos ejemplos de encapsulados de circuitos integrados smd [13].	30
Figura 14. Encapsulado de un PLCC - 44 [14].	31
Figura 15. Encapsulado de un QFP - 48 [14].	31
Figura 16. Soldadura en pasta sobre pcb [18].	32
Figura 17. Impresión de pasta con navajas y esténcil [18].	33
Figura 18. Clasificación de soldadura en pasta. [18].	38
Figura 19. Partículas de soldadura por tipos [18].	39
Figura 20. Relación aspecto – área.	42
Figura 21. Formas de aperturas de esténcil.	43
Figura 22. Modificaciones de apertura para componentes tipo chips [27].	43
Figura 23. Tecnologías para esténciles [28].	45
Figura 24. Sistema de alineación de esténcil y PCB [27].	46
Figura 25. Rasquetas o navajas [27].	47
Figura 26. Configuración de la impresora [27].	48
Figura 27. Pines de soporte para PCB.	50
Figura 28. Parámetros de impresión con navajas.	52
Figura 29. Ejemplo del fenómeno “orejas de perro”.	53
Figura 30. Obstrucción de la pasta en aperturas de esténcil.	54
Figura 31. Ejemplo de inspección de soldadura 3D.	55
Figura 32. Máquina NeoDen7 de recogida y colocación típica [30].	56
Figura 33. 6 boquillas de vacío en 6 cabezales - NeoDen7 [30].	57
Figura 34. Alimentador neumático en NeoDen7 [30].	58
Figura 35. Cámara de visión artificial utilizada en AOI [32].	59
Figura 36. Perfil típico de reflujo sin plomo [27].	63
Figura 37. Diagrama de bloques de la línea de ensamble SMT.	64
Figura 38. Diagrama de flujo del proceso de ensamble SMT.	65
Figura 39. Línea de ensamble SMT de empresa.	67
Figura 40. Despachador de tarjetas, funcionando por medio de ventosas.	68
Figura 41. Interior de máquina de impresión de pasta.	69
Figura 42. Máquina SPI en línea de ensamble SMT.	70
Figura 43. Vista del interior de la máquina SMT.	71

Figura 44. Horno de reflujo.	72
Figura 45. Máquina de Inspección Óptica Automatizada (AOI).....	73
Figura 46. Imagen tomada de microscopio (defecto Tombstoning en un circuito).	75
Figura 47. Componente con defecto (corto entre terminales).	76
Figura 48. Imagen vista desde microscopio (defecto insuficiencia de soldadura).	77
Figura 49. Imagen tomada de microscopio (defecto desalineación de componente).	77
Figura 50. Parámetros de impresión de soldadura en pasta.	79
Figura 51. Parámetros en horno de reflujo para una tarjeta.	81
Figura 52. Interfaz de AOI.....	82
Figura 53. Reporte de apoyo para identificación de problemas proporcionada por la herramienta A3.	83
Figura 54. Diagrama de Ishikawa enfocado a los defectos en el proceso de ensamble SMT.	84
Figura 55. Parámetros de impresión de pasta que presentan defectos.....	86
Figura 56. Parámetros de coordenadas de impresión.	86
Figura 57. Gráfica de tarjetas con falla de 25 tarjetas estudiadas.	87
Figura 58. Insuficiencia de soldadura detectada en SPI.....	87
Figura 59. Desplazamiento de soldadura detectada en SPI.	88
Figura 60. Nuevos parámetros de impresión de pasta para pruebas.....	88
Figura 61. Nuevos valores de coordenadas para la impresión de pasta.	89
Figura 62. Resultado de impresión correcta mostrada en SPI.	89
Figura 63. Defecto puente de soldadura detectado en SPI (bridge).....	90
Figura 64. Termómetro digital colocado en máquina empastadora para monitoreo de temperatura.	94
Figura 65. Climatizador de pasta.	94
Figura 66. Climatizador de pasta conectada a máquina empastadora.	95
Figura 67. Personal de mantenimiento realizando revisión de máquina.	96
Figura 68. Revisión de boquillas de máquinas montadoras.....	96
Figura 69. Preproducción de máquina montadora (desplazamiento de coordenadas). ..	97
Figura 70. Corrección de coordenadas en componentes de tarjeta.	98
Figura 71. Ajuste de velocidad y fuerza de levantamiento de componente.	98
Figura 72. Levantamiento correcto del componente con boquilla.	99
Figura 73. Ajuste de presión de boquilla en levantamiento de componente.	99
Figura 74. Colocación de termopares en tarjeta pcb para realización de perfil.	100
Figura 75. Gráfica correcta de un buen perfil de soldadura.	101
Figura 76. Ensamble de lote piloto para corrección de errores.	101
Figura 77. Operación de máquinas montadoras durante producción.....	102

índice de tablas

Tabla 1. Tipos de soldadura en pasta según IPC (J-STD-005). [21]	39
Tabla 2. Extensiones de archivos Gerber [26].	42

Capítulo 1. Marco teórico.

1.1. Antecedentes

En el ámbito de la electrónica, a lo largo de los años se ha visto relativamente cambiante respecto a años anteriores, esto debido al gran avance tecnológico que ha padecido de cambios significativos siendo así una gran primicia para el auge de la electrónica.

No obstante, la electrónica por sí misma tiene diversas aplicaciones en diferentes contextos, pero poco se habla dentro de la industria que hoy en día toma relevancia por su gran impulso a la evolución de los procesos de fabricación de circuitos impresos y dispositivos electrónicos.

En el marco de estos procesos se encuentran dos tipos de ensambles que a lo largo del tiempo se han consolidado como primordiales en la industria de fabricación de circuitos; esto son ensamble de tarjetas electrónicas barrenadas (Pass Through Hole, PTH) y el ensamble de dispositivos de montaje superficial (Surface Mount Device, SMD), ambos enfocados en tecnologías diferentes pero que a su vez asumen soluciones concretas. A la vez que la tecnología avanza lo hacen de igual forma los ensambles, es por eso que el ensamble PTH pasó a formar parte de un método tradicional a diferencia del montaje SMD que se ha afianzado como la técnica preeminente dentro de la industria [15].

La tecnología de montaje superficial (SMT) como su nombre lo indica, se basa en la colocación de componentes electrónicos sobre una placa de circuito impreso (pcb), esta tecnología trabaja en conjunto con muchas herramientas para que se tengan resultados eficientes, gracias a todos los avances que ha logrado esta tecnología ha hecho que sea un técnica de producción estándar para muchas industrias, pues bien en los últimos años, la necesidad de reducir costos de producción, fabricar componentes más pequeños y lograr una mayor densidad funcional ha llevado a que la tecnología tradicional de montaje por orificio pasante (THT) sea reemplazada de manera progresiva por la tecnología de montaje superficial (SMT) [2].

El proceso SMT parte de la colocación automática de componentes electrónicos en la placa de circuito impreso esto lo hace con ayuda de máquinas automatizadas que son altamente precisas. De igual forma este proceso trabaja con ayuda de hornos de reflujo pues al trabajar con soldadura en pasta esta se debe fundir a ciertas temperaturas para que un ensamble sea ejecutado de buena manera y con buenos resultados. Así con este proceso trabajado en conjunto se logra tener producciones en gran cantidad siendo el apto para muchas industrias que se dedican al ramo electrónico [2].

Pese a que la tecnología avanza a pasos agigantados este proceso no se queda estancado, por lo cual sigue en constante cambio y es así como el proceso SMT genera contrapartes o defectos recurrentes, que afectan desde la soldadura hasta los propios componentes los cuales pueden derivar en rechazos, reprocesos, pérdida de materiales y problemas funcionales en campo. Debido a esto, los procesos de esta tecnología se han vuelto más estrictos en cuanto al control de funcionalidad de los componentes, los parámetros utilizados tanto térmicos como mecánicos y eléctricos. Estos controles se pueden implementar gracias a normativas internacionales de calidad especializadas en electrónica, como la IPC [16].

Las normas IPC facilitan la producción de electrónica confiable y de alta calidad mediante el desarrollo de estándares de confianza que impulsan el éxito de la industria electrónica global. Implementadas en toda la industria. Las normas IPC ayudan a garantizar una calidad, confiabilidad y consistencia superiores en la fabricación de productos electrónicos [1].

En este ámbito surge la necesidad de mejorar y optimizar los procesos de ensamble electrónico, implementando metodologías basadas en un análisis exhaustivo que permitan la reducción de defectos, aumenten la calidad del producto, tengan una mejor eficiencia en el ensamblaje y aumentar la competitividad dentro de la industria de manufactura electrónica.

La siguiente investigación se desarrolla en este contexto, tomando como punto de referencia una línea de ensamble SMT real dentro de una empresa dedicada a la fabricación de tarjetas electrónicas. El propósito es analizar puntos críticos de los

procesos y proponer mejoras que ayuden a la reducción de errores y de tiempos dentro de la producción y así ayudar con la calidad y eficiencia de los productos ensamblados.

1.2. Problemática

El ensamble electrónico mediante la tecnología montaje superficial (SMT) es un proceso automatizado que conlleva varias etapas para llegar a un producto final. Cada etapa posee características que son fundamentales para que dicho proceso se cumpla sin dificultades.

Las etapas cruciales de este proceso son: la impresión de pasta, el montaje automatizado de los componentes mediante máquinas especializadas y el horno por reflujo (reflow), por mencionar algunas. Todas estas etapas deben ser estandarizadas para cumplir ciertos parámetros o rangos específicos para tener una buena calidad y obtener buena funcionalidad en cada proyecto de ensamble.

En la línea SMT de una empresa se ha realizado el análisis de todos los procesos involucrados y, se identificaron algunos problemas recurrentes que se tienen a pesar de contar con máquinas innovadoras especializadas para este tipo de ensamble, de igual forma se observa percances con las estandarizaciones.

Dentro de los problemas más importantes se encuentra la soldadura fría, desplazamiento en los componentes y cortos de soldadura en ciertos puntos. Todo esto genera varias consecuencias como los retrabajos, incrementa la cantidad de producto no conforme, hay un aumento en el costo de producción y el desperdicio de material.

Estos problemas son aleatorios, por lo que se debe realizar un estudio detallado en cada proceso, recopilar información relevante y obtener el análisis de cada uno, para así conocer en dónde está la causa raíz de cada defecto encontrado y establecer propuesta de mejora que tengan como objetivo establecer criterios estandarizados y optimizar los parámetros a utilizar. Todo esto buscando mejorar la eficiencia en la línea de producción SMT, obteniendo calidad, control y buena funcionalidad en todos los productos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar el proceso de ensamble de montaje superficial (SMT) de la línea de producción de una empresa, mediante un análisis complejo de los parámetros establecidos fundamentales para este proceso, para la implementación de mejoras que reduzcan los defectos en los ensambles.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1.- Realizar el análisis del proceso de ensamble SMT que se tiene en la línea de producción de una empresa.
- 2.- Identificar los defectos y las causas de estos que se tienen hasta el momento en el proceso de ensamble SMT.
- 3.- Analizar los parámetros críticos de operación, tales como el perfil térmico del horno de reflujo, la programación electrónica del pick and place, la aplicación de pasta de soldadura y el control de inspección óptica (AOI).
- 4.- Proponer e implementar soluciones en el proceso del ensamble electrónico SMT de la empresa, buscando la mejora continua.

1.1. Historia del ensamble de montaje superficial (SMT)

La evolución de los ensamblados de montaje superficial (SMT) es el resultado de tres cuartos de siglo de historia de la electrónica. Una pieza importante para los procesos de ensamble fue el diseño de componentes electrónicos, pues bien, muchas propuestas para el ensamble de componentes electrónicos han fracasado debido a la falta de disponibilidad de los componentes adecuados a un precio económico. De esta forma se entiende que el rumbo que toma el desarrollo de los componentes está determinado por la capacidad actual de las tecnologías utilizadas en su fabricación, a su vez la atracción del mercado y la necesidad de producir un cambio fueron partes fundamentales para el progreso de esta tecnología [3].

1.1.1. Válvulas termoiónicas

Se considera que la electrónica pudo desarrollarse gracias al nacimiento de la válvula de triodo termoiónico en 1906, a pesar de que en la década de 1880 se habían fabricado los dispositivos activos como lo son las resistencias de carbono y los condensadores electrolíticos de aluminio, no fue hasta el momento cuando la válvula del triodo termoiónico que la electrónica pudo despegar y así mismo esta reinó durante los siguientes 50 años [3].

Las válvulas termoiónicas también llamadas tubos de vacío, son dispositivos que controlan la corriente eléctrica mediante la emisión termoiónica, en la que los materiales calentados liberan electrones. Estos dispositivos constan de electrodos contenidos en una envoltura de vidrio o metal evacuado. Los componentes principales incluyen un cátodo que se calienta para emitir electrones y un ánodo que recoge estos electrones, permitiendo que fluya la corriente. vacío utiliza un vacío para ayudar a los electrones a moverse libremente desde el cátodo calentado hasta el ánodo, sin interferencia de moléculas de aire. Esta configuración minimiza la probabilidad de colisión de los electrones con las moléculas de aire, garantizando un flujo de electrones eficaz. Los tubos

de vacío desempeñaron un papel crucial en el desarrollo de los primeros aparatos electrónicos, como radios, televisores y los primeros ordenadores, gracias a su capacidad para amplificar señales y actuar como rectificadores [4]. En la Figura 1 se muestra la estructura interna de la válvula termoiónica.

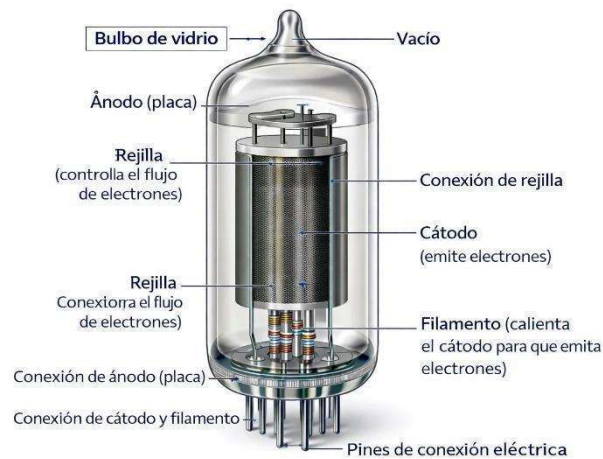


Figura 1. Estructura interna de la válvula termoiónica [5].

1.1.2. Placa de circuito impreso (PCB)

Poco después de la segunda guerra mundial aparecieron 2 grandes herramientas que desplazaron a la válvula termoiónica, se trata del transistor y la placa de circuito impreso, estos contribuyeron en la evolución de la electrónica con un concepto nuevo en cual se hacía énfasis en componentes con extremos de cables, debido a esto se retrasa un poco el nacimiento de los ensambles de montaje superficial [3].

La placa de circuito impreso hoy en día se encuentra en todos los dispositivos electrónicos. La función de los PCB es proporcionar las conexiones eléctricas entre los distintos componentes que se montan en él. Como los dispositivos electrónicos se hacen

cada día más complejos, y requieren más componentes, los PCB también, y cada día son más densos en el conexionado de componente [6].

1.1.2.1. Historia de la placa de circuito impreso (PCB)

En 1903, el inventor alemán Albert Hanson registró una patente en el Reino Unido, introduciendo una idea innovadora para utilizar “cables” en las centrales telefónicas. Su propuesta consistía en emplear láminas metálicas para formar los conductores, cubriéndose por ambos lados con papel de parafina y añadiendo orificios pasantes en los cruces de las líneas, con el fin de lograr la conexión eléctrica entre diferentes capas. Este procedimiento era distinto al de la fabricación actual de PCB, ya que en aquella época aún no existía la resina fenólica ni la técnica de grabado químico. El diseño de Hanson puede considerarse un antecedente directo de los circuitos impresos modernos y un punto de partida fundamental para su desarrollo [7].

Luego de esto Charles Ducas desarrolla la idea de imprimir patrones de circuito sobre un sustrato aislante y luego aplicar el recubrimiento para fabricar conductores para cableado. En esa época surgió el término "PCB".

En 1936, el austriaco Paul Eisler [Viena [(Austria), 1907 – Londres (Reino Unido), 1992)], reconocido como “el padre de los circuitos impresos”, introdujo en el Reino Unido la tecnología basada en láminas de aluminio, creando la primera placa de circuito impreso destinada a una radio. El procedimiento que ideó guarda gran semejanza con el utilizado actualmente en la fabricación de PCB. Este proceso, conocido como método sustractivo, consiste en retirar las partes metálicas que no son necesarias [11].

En 1948, Estados Unidos reconoció oficialmente la PCB para uso comercial, lo que representó un punto clave en su historia y favoreció notablemente su desarrollo y adopción, a pesar de que en ese momento pocos equipos electrónicos la utilizaban.

En 1948, Estados Unidos reconoció oficialmente el PCB para uso comercial, impulsando su desarrollo y aplicación. Entre 1950 y 1990, la industria de PCB experimentó un rápido crecimiento y consolidación. En la década de 1950, la aparición de los transistores permitió reducir el tamaño de los dispositivos electrónicos y facilitar la incorporación de PCB, mejorando la confiabilidad. Motorola desarrolló placas de doble cara con vías galvanizadas (1953) y Toshiba creó el laminado revestido de cobre (1955), lo que permitió la producción de PCB multicapa a gran escala. Durante las décadas de 1960 y 1970, las PCB se utilizaron ampliamente, evolucionando hacia mayor densidad, precisión y fiabilidad [7].

1.1.2.2. Tipos de placa de circuito impreso (PCB)

PCB de una cara: son los más básicos y poseen ciertas limitaciones ya que al solo tener una sola cara no debe haber cruce de pistas, debido a esto es rentable y fácil de fabricar.

PCB de doble cara: Poseen un patrón conductor en ambas caras de la placa, por lo que es indispensable establecer una conexión eléctrica entre ellas. Dichas conexiones se conocen como vías, las cuales consisten en orificios recubiertos con material conductor que enlazan los patrones de ambas superficies en puntos específicos. Gracias a que este tipo de placas ofrecen el doble de área útil para trazos y permiten que las conexiones se crucen sin interferencias, resultan especialmente adecuadas para el diseño de circuitos electrónicos complejos.

PCB multicapa: Para aumentar el área de conexión, los PCB pueden incluir varias capas conductoras unidas mediante material aislante. Estas placas multicapa, que suelen tener entre 4 y 8 capas, pueden llegar hasta 100, aunque su costo limita su uso. Las vías permiten conectar las distintas capas; cuando no es necesario enlazarlas todas, se emplean vías ciegas (que salen por un solo lado) o vías enterradas (que conectan solo capas internas). En este tipo de PCB, normalmente se reservan capas específicas como plano de tierra y plano de alimentación, pudiendo existir varios voltajes de alimentación según el número de los componentes del circuito, en la figura 2 se observan las diferentes

capas internas separadas por capas llamadas core, que son placas del impreso con cobre en ambos lados para las conexiones eléctricas y, capas de un material aislante de resina y fibra de vidrio utilizado para unir las placas de circuito impreso [6].

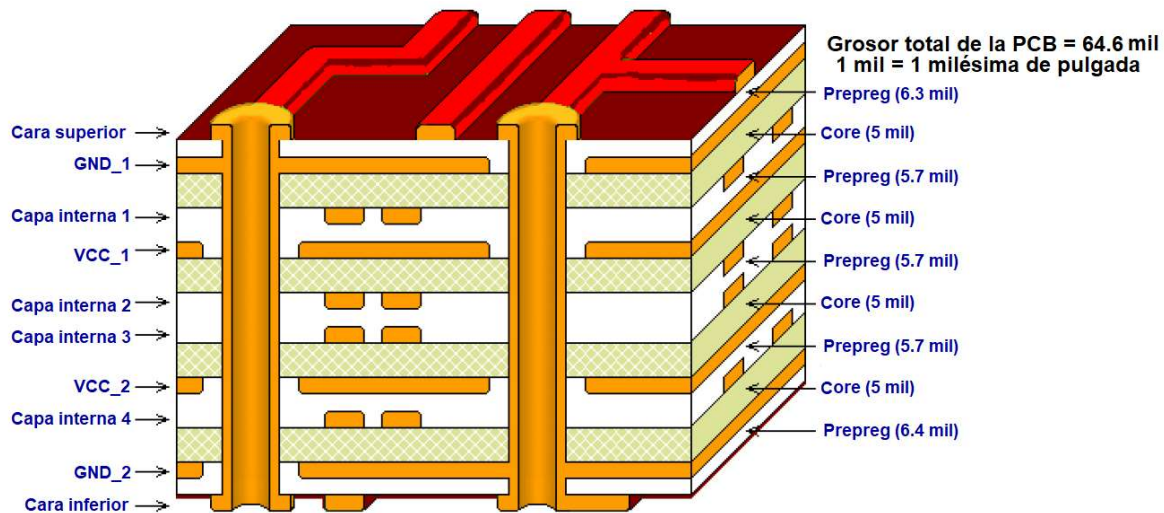


Figura 2. Esquema de un circuito impreso multicapa.

1.2. Componentes SMD

Los componentes SMD o de montaje superficial son llamados así porque se montan directamente sobre la placa pcb, a comparación de los componentes de orificio pasante (THT), que como su nombre indica atraviesan la placa pcb. Debido a estas diferencias, los componentes smd son ahora más utilizados debido a sus ventajas como su tamaño pequeño que permite diseños más sólidos y compactos, así como también su eficiencia. Hay muchos tipos de componentes smd cada uno con funciones diferentes y funciones específicas, hay desde componentes básicos hasta componentes avanzados.

Componentes pasivos rectangulares. En este grupo se encuentran englobados resistencias, capacitores e inductores principalmente.

1.2.1. Resistencias

Compuestas de una película gruesa que consta de una capa de material resistivo de óxido de rutenio impresa sobre una pequeña placa de alúmina como sustrato y protegida por un revestimiento vidriado. El contacto eléctrico se establece en cada extremo con un compuesto complejo de platino, paladio y plata. Al paso del tiempo las resistencias se hicieron más robustas y fiables pues en la actualidad cumplen con los estrictos estándares de soldabilidad requeridos para la soldadura por reflujo sin errores. La estructura de una resistencia se muestra en la Figura 3.

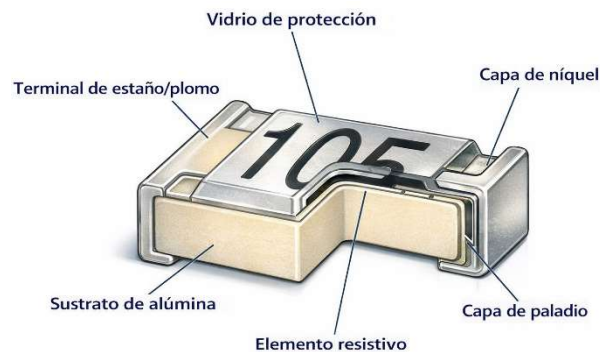


Figura 3. Estructura de una resistencia smd [13].

Las marcas en la resistencia se tratan de un sistema de numeración EIA de tres dígitos (Electronic Industries Association) donde los dos primeros números representan el valor de la resistencia y el último es el multiplicador que quiere decir el número de ceros agregados después del valor [13].

Las resistencias de montaje superficial (SMD) se encuentran disponibles en todas las dimensiones estandarizadas para este tipo de componentes y, en muchos casos, su valor se identifica mediante la codificación “000”. Los encapsulados más utilizados corresponden a los formatos 1206 y 0805. El encapsulado 1206 presenta dimensiones aproximadas de 3,2 mm de longitud, 1,6 mm de ancho y 0,6 mm de altura, con una potencia máxima de disipación de 0,25 W a 70 °C. Por su parte, el encapsulado 0805 tiene una longitud de 2,0 mm y un ancho de 1,25 mm, con una potencia máxima de 0,125 W a la misma temperatura de referencia.

Las resistencias SMD poseen una geometría rectangular similar a la de los capacitores smd, lo que permite que sean procesadas bajo los mismos criterios de diseño, ensamblaje y reparación dentro de las tarjetas de circuito impreso. Así mismo algunos inductores también utilizan estos tamaños de encapsulados [14].

En la Figura 4 se puede observar la comparación de los tamaños de encapsulado para resistencias y capacitores que existen. Nótese que la numeración en el apartado “Tipo” es de tipo imperial mientras que los demás apartados las medidas son en milímetros.

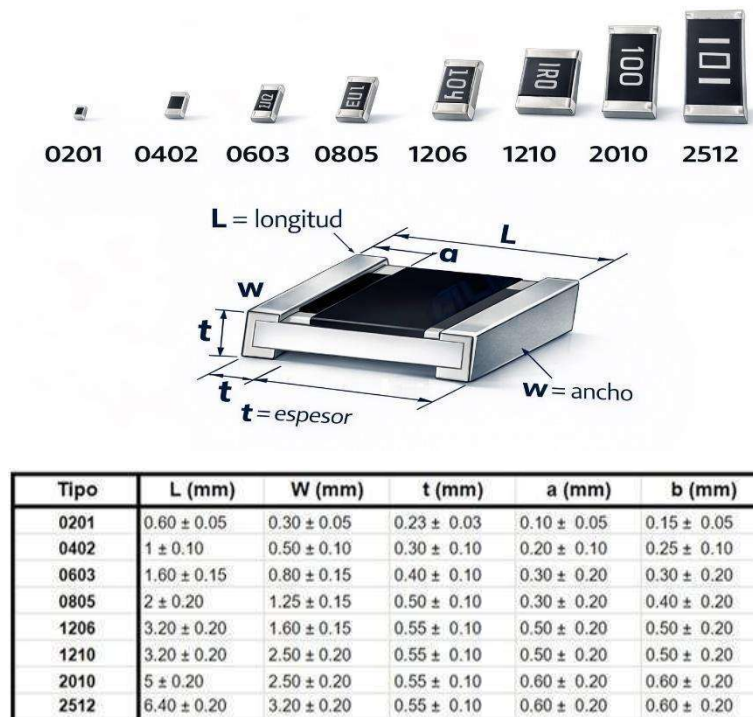


Figura 4. Tamaños de encapsulados de componentes smd pasivos [17].

1.2.2. Capacitores

Los capacitores smd son similares a las resistencias, los contactos finales de los capacitores están compuestos por una barrera de níquel. Estos componentes varían de espesor con el valor ya que su composición consta de pequeñas láminas de material cerámico dieléctrico que son recubiertas con metal en la zona central y extendidas hasta uno de sus bordes para permitir el contacto eléctrico. Posteriormente, estas láminas se apilan de forma que los bordes metalizados queden orientados de manera alternada

hacia extremos opuestos, en la figura 5 se puede apreciar la composición del capacitor smd.

El conjunto se somete a un proceso de cocción a temperaturas cercanas a los 1400 °C, dando lugar a una estructura monolítica. La capacitancia resultante depende tanto del número de capas, que puede variar entre 2 y 50, como de su espesor aproximado de 0,025 mm. Los terminales están formados por una película gruesa de platino y plata, lo que permite su soldadura directa sobre las pistas de la tarjeta de circuito impreso. Por lo general los capacitores a diferencia de las resistencias no están marcados o codificados ya que el proceso de impresión podría alterar los parámetros [13].

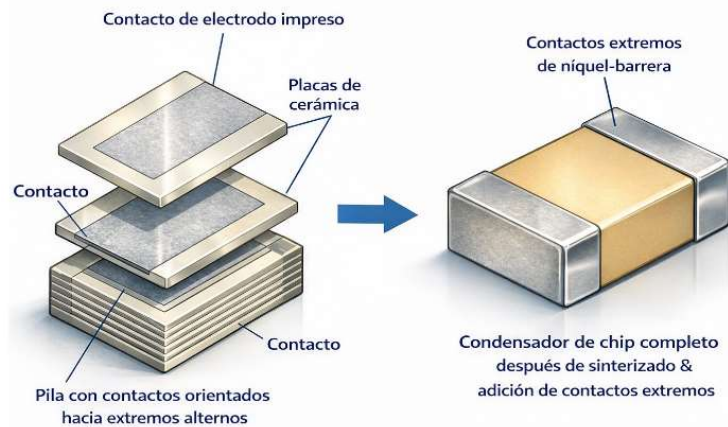


Figura 5. Composición de un capacitor smd [13].

1.2.3. Capacitores de tantalio

Los capacitores de tantalio de montaje superficial (SMD) se fabrican en diversos formatos de encapsulado, algunos de los cuales no presentan el valor de capacitancia impreso en su superficie. La identificación de la polaridad positiva se realiza mediante una línea o una letra “M” de color blanco. El tipo de encapsulado utilizado está determinado principalmente por el valor de la capacitancia y la tensión nominal del componente. Los valores eléctricos de estos condensadores se indican mediante sistemas de codificación que emplean dígitos o caracteres alfanuméricos. En el caso de la codificación numérica, el primer dígito representa la primera cifra del valor de capacitancia, el segundo dígito

corresponde a la segunda cifra, mientras que el tercer dígito indica el número de ceros que deben añadirse al valor expresado en picofaradios (pF) [14].

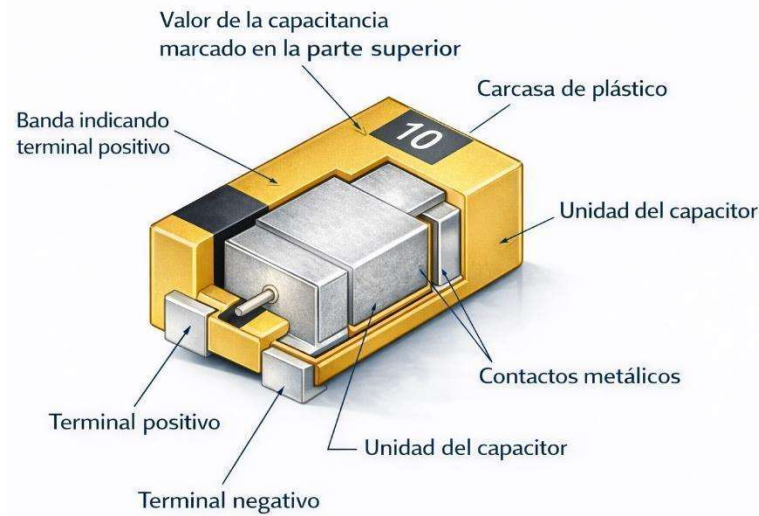


Figura 6. Estructura de un capacitor de tantalio [13].

1.2.4. Capacitores electrolíticos de aluminio

El capacitor electrolítico de aluminio ha permanecido como una alternativa competitiva frente a los capacitores de tantalio, evolucionando de manera satisfactoria para cumplir con los requerimientos de los semiconductores de silicio (SM). Aunque las dimensiones de los encapsulados aún no se encuentran completamente estandarizadas, se distinguen principalmente dos configuraciones: montaje vertical y montaje horizontal.

Los primeros capacitores electrolíticos de aluminio, que empleaban dieléctricos líquidos, presentaban limitaciones asociadas a las elevadas temperaturas del proceso de soldadura por ola. No obstante, los diseños actuales han superado dichas restricciones, ofreciendo mayores niveles de fiabilidad y valores de capacitancia significativamente altos, que pueden alcanzar hasta 1000 μF . Adicionalmente, se dispone de versiones no polarizadas, las cuales resultan especialmente útiles en diversas aplicaciones electrónicas [13].

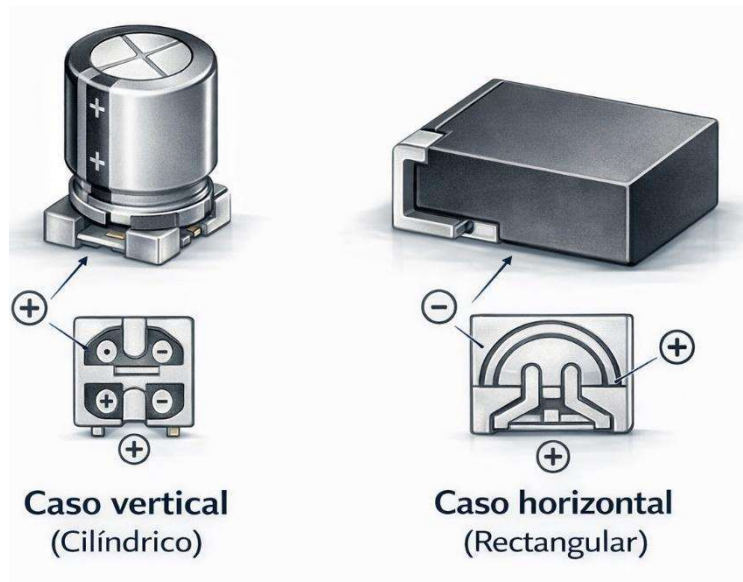


Figura 7. Tipo de encapsulados para capacitores electrolíticos de aluminio [13].

1.2.5. Inductores

Los inductores de montaje superficial representan un componente relevante en el diseño de circuitos electrónicos debido a la amplia variedad de tipos disponibles y a la posibilidad de obtener valores incrementales precisos. El inductor de chip más común es el bobinado con núcleo de ferrita, encapsulado en resina epóxica, el cual se ofrece en distintos tamaños y configuraciones según el fabricante. Sus valores de inductancia suelen abarcar desde fracciones de μH hasta aproximadamente $1000 \mu\text{H}$, con factores de calidad moderados y resistencias en corriente continua que aumenta para valores elevados.

Estos inductores mantienen su inductancia constante hasta alcanzar la saturación del núcleo, momento en el cual esta disminuye de manera significativa. Debido a estas características, resultan adecuados para aplicaciones como osciladores y filtros. No obstante, al no existir inductores ideales, pueden presentarse efectos no deseados como campos dispersos, los cuales pueden mitigarse mediante el uso de inductores con blindaje magnético [13].

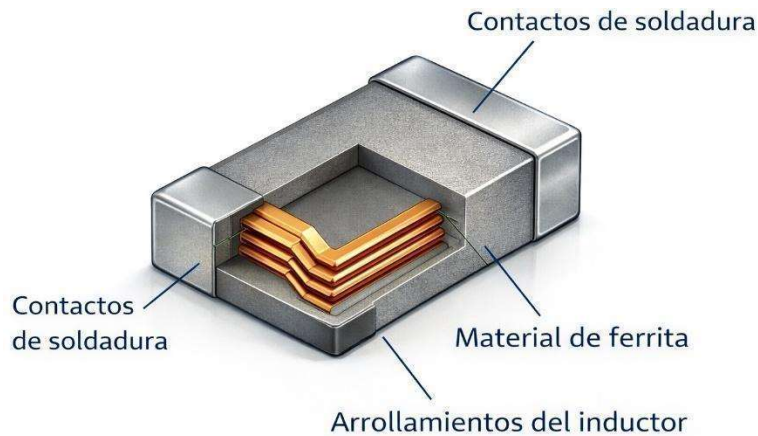


Figura 8. Estructura de chip inductor smd multicapa [13].

1.2.6. Diodos y transistores.

La mayoría de los diodos y transistores de uso general se encuentran disponibles en versiones de montaje superficial (SMD), principalmente en encapsulados SOT-23, SOT-89 y SOT-143. En términos generales, los parámetros eléctricos de los diodos y transistores SMD son equivalentes a los de sus contrapartes en encapsulados convencionales.

Los encapsulados SOT-23 y SOT-143 se emplean comúnmente en dispositivos con una capacidad de disipación de potencia comprendida entre 200 y 400 mW, mientras que el encapsulado SOT-89 se utiliza en aplicaciones que requieren una mayor disipación, la cual puede variar entre 500 mW y 1 W. Adicionalmente, los diodos emisores de luz (LED) de montaje superficial se encuentran disponibles en encapsulados tipo SOT-23. Todos los transistores SMD incorporan sistemas de marcaje mediante códigos, los cuales permiten su identificación [14].

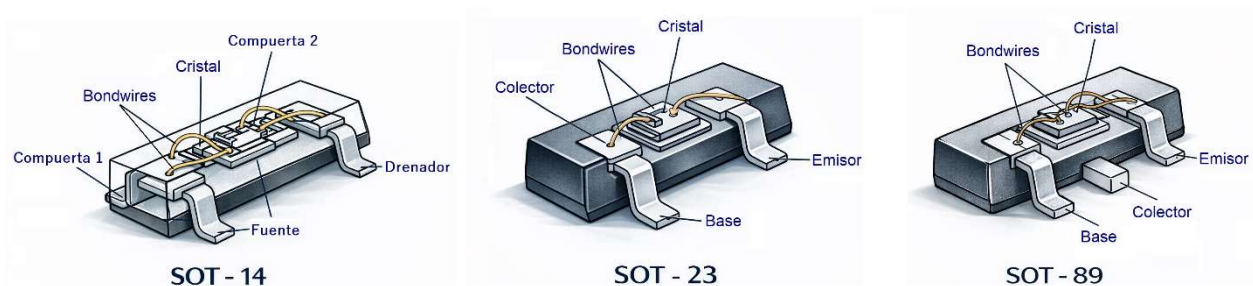


Figura 9. Tipos de encapsulados para diodos y transistores [14].

1.2.7. Circuitos integrados.

Los circuitos integrados electrónicos SMD surgen como una solución y en respuesta a la evolución de los procesos de fabricación de las placas de circuitos electrónicos, en éstas los dispositivos o sus bases sockets, son soldadas sobre la superficie de la placa del circuito, evitando la perforación de esta, con lo que se abaten costos y tiempos de producción, puesto que se ahorra el proceso de barrenado y las brocas. En la figura 10 se muestran los detalles de un circuito integrado de montaje superficial. La figura 11 muestra un fragmento de una placa de circuito impreso con dos pads, el primero para circuito integrado de SMT y el segundo para THT [8-9].

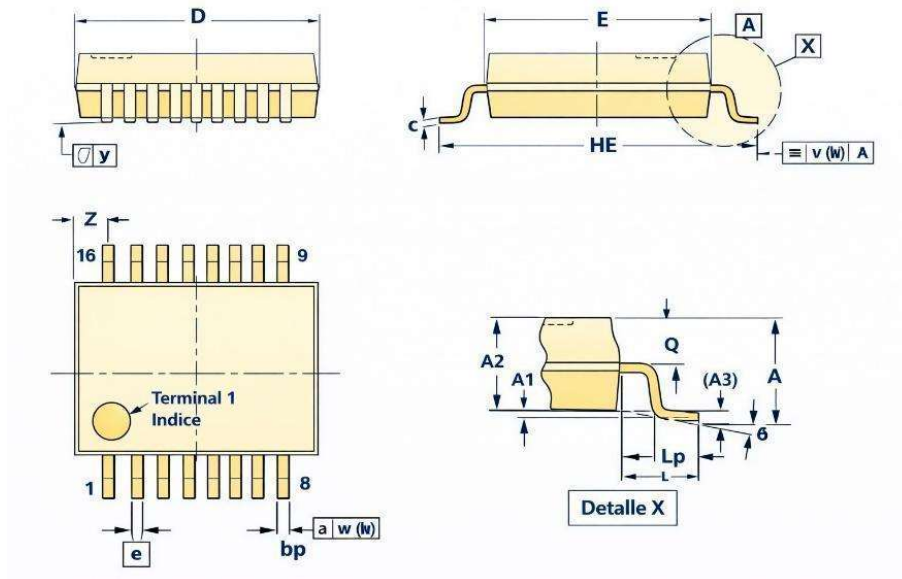


Figura 10. Características de un circuito integrado de montaje superficial [8].

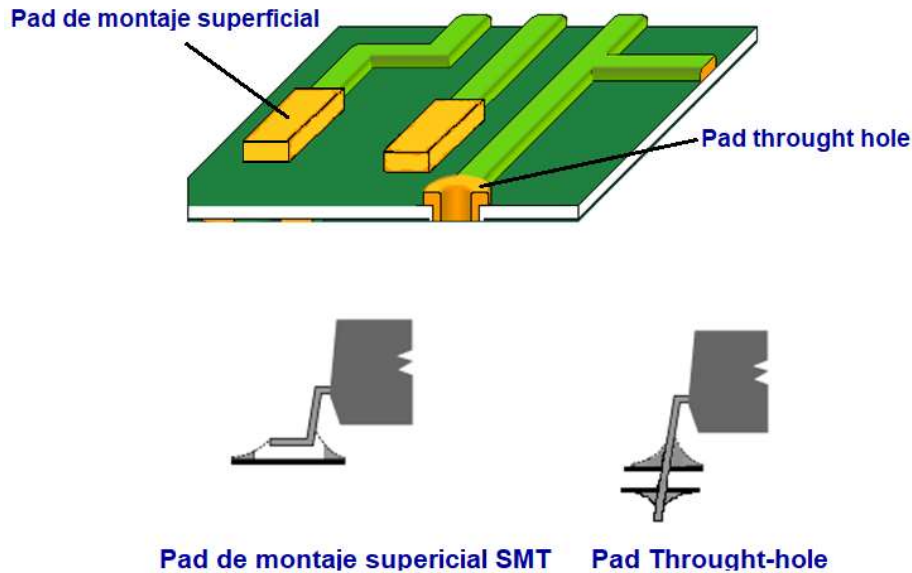


Figura 11. Tipos de Pads vista transversal.

Los primeros circuitos integrados de montaje superficial (SMD) comenzaron a desarrollarse a principios de la década de 1970 mediante técnicas híbridas. En la actualidad, una gran cantidad de nuevos diseños de circuitos integrados se fabrican exclusivamente bajo esta tecnología, debido a sus ventajas en términos de miniaturización y eficiencia en los procesos de ensamblaje.

Los circuitos integrados encapsulados en formatos SMD presentan compatibilidad eléctrica con aquellos que utilizan encapsulados tipo DIL (Dual In-Line), por lo que conservan la misma designación comercial. La principal diferencia entre ambos radica en el sufijo de identificación del encapsulado; por ejemplo, el dispositivo LM324 en encapsulado DIL se identifica como LM324N, mientras que su equivalente en encapsulado SMD tipo SO se identifica como LM324D [14].

1.2.7.1. Terminales de circuitos integrados.

El diseño de los terminales ha evolucionado para adaptarse a los requerimientos del montaje superficial. A lo largo del desarrollo de los circuitos integrados se han empleado diversos tipos de terminales, siendo el más utilizado el conocido como “ala de gaviota”, el cual ha demostrado una alta confiabilidad durante su implementación. Este tipo de

terminal se caracteriza por doblarse hacia abajo desde el cuerpo del circuito integrado hasta la superficie de la tarjeta de circuito impreso y posteriormente hacia el exterior, formando una unión solapada.

El diseño de ala de gaviota facilita las labores de ensamblaje manual debido a su amplia superficie para soldadura. Asimismo, permite una adecuada visibilidad, lo que favorece la inspección de las uniones soldadas y la medición de voltajes mediante el uso de sondas apropiadas. No obstante, una de sus principales desventajas radica en el mayor espacio requerido para alojar los terminales extendidos, lo que incrementa el área ocupada por el dispositivo en la tarjeta de circuito impreso.

Los errores de coplanaridad pueden representar un inconveniente durante los procesos de soldadura automatizada; sin embargo, su impacto suele ser menor en operaciones de ensamble manual, salvo en casos donde los terminales presentan deformaciones significativas. El diseño de terminal tipo “J” permite una reducción del espacio ocupado, aunque los encapsulados de los circuitos integrados tienden a incrementar su tamaño para alojar este tipo de conexión. Además, la visibilidad y la inspección de las uniones soldadas resultan más complejas en comparación con otros diseños.

Actualmente, los terminales tipo “J” se emplean con frecuencia en encapsulados PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier); no obstante, existe una tendencia hacia la utilización de terminales tipo ala de gaviota con dimensiones más reducidas. Por otro lado, los terminales tipo “I” continúan utilizándose debido a su buena resistencia mecánica y su diseño compacto. Sin embargo, para garantizar una adecuada soldabilidad, es necesario que estas terminales sean cortadas con precisión para mantener la misma longitud y que las superficies metálicas expuestas sean estañadas, cumpliendo así con los estándares establecidos para procesos de soldadura [13].

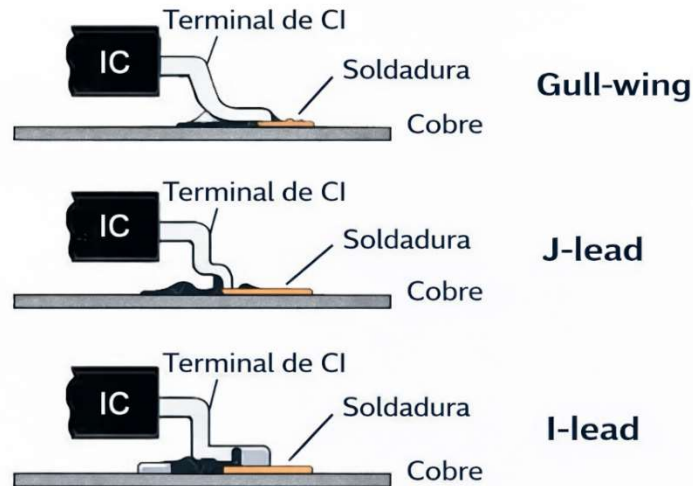


Figura 12. Configuraciones de terminales de circuitos integrados SMD [13].

1.2.7.2. SOIC

Los encapsulados de circuitos integrados de montaje superficial (CI) se han estandarizado en un conjunto relativamente reducido de formatos; sin embargo, es posible encontrar variantes y encapsulados específicos que difieren de los considerados como estándares industriales. Entre los encapsulados más comunes se encuentran los pertenecientes a la familia **SOIC** (Small Outline Integrated Circuit), los cuales se fabrican con un número de terminales que generalmente oscila entre 8 y 28 pines, dependiendo de la complejidad del dispositivo [14].

1.2.7.3. VCO

El encapsulado **VSO** (Very Small Outline) se emplea en circuitos integrados (CI) que requieren un número elevado de terminales, generalmente superior a 28 pines. La separación entre pines en este tipo de encapsulado es de 0,76 mm o 0,75 mm, de acuerdo con las especificaciones indicadas en las hojas de datos del circuito integrado correspondiente [14].

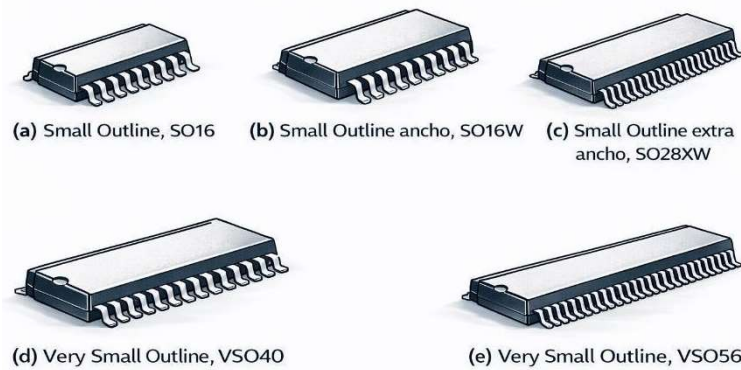


Figura 13. Algunos ejemplos de encapsulados de circuitos integrados smd [13].

1.2.7.4. PLCC

Por otro lado, los encapsulados **PLCC** (Plastic Leaded Chip Carrier) se utilizan en circuitos integrados con un número de pines superior a 28, siendo común su aplicación en dispositivos de hasta 44 pines o más. En este tipo de encapsulado, los terminales se distribuyen en los cuatro lados del dispositivo y se doblan hacia la parte inferior de la carcasa. Esta configuración proporciona una resistencia mecánica relativamente elevada frente a esfuerzos externos.

No obstante, una de las principales desventajas del encapsulado PLCC es su mayor altura, con un valor estándar aproximado de 4,57mm, así como la complejidad en el diseño de las pistas de soldadura, las cuales presentan una separación de 1,27 mm y se ubican debajo del encapsulado. Estas características dificultan tanto el proceso de soldadura como la inspección óptica posterior de las uniones.

El número de terminales de un circuito integrado se indica directamente en la designación del encapsulado; por ejemplo, la nomenclatura PLCC-20 corresponde a un dispositivo que cuenta con 20 pines [14].

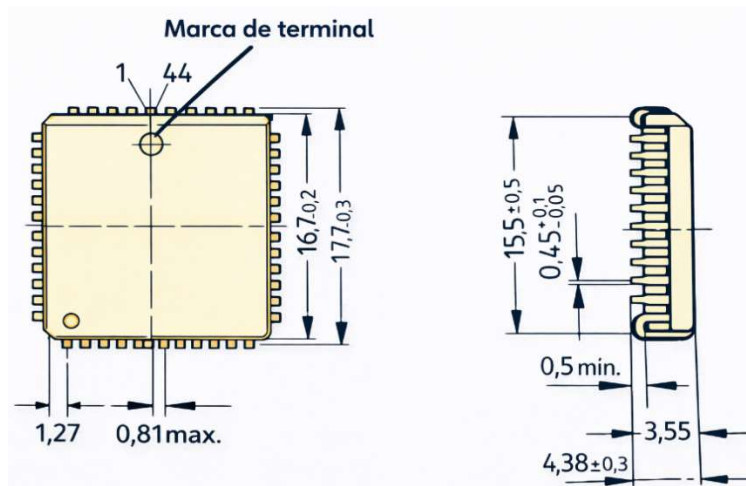


Figura 14. Encapsulado de un PLCC - 44 [14].

1.2.7.5. QFP

El encapsulado **QFP** (Quad Flat Package) se caracteriza por presentar los terminales extendidos hacia el exterior del cuerpo del dispositivo, a diferencia del encapsulado PLCC, en el cual los pines se doblan hacia la parte inferior. Este tipo de encapsulado permite una separación entre terminales considerablemente reducida, con tramas típicas de 1,0 mm, 0,85 mm, 0,75 mm y hasta 0,65 mm, lo que posibilita la fabricación de dispositivos altamente compactos. Gracias a estas características, los encapsulados QFP pueden albergar un número elevado de pines, superando en muchos casos los 100 terminales [14].

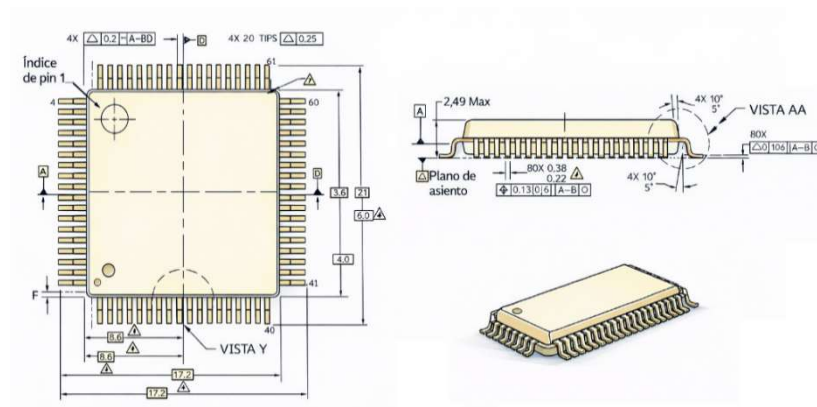


Figura 15. Encapsulado de un QFP - 48 [14].

1.3. Proceso de ensamble SMT

1.3.1. Impresión de soldadura en pasta

Una de las etapas más críticas dentro del proceso de montaje superficial es la aplicación de la pasta de soldadura sobre la tarjeta de circuito impreso (PCB). El propósito de esta operación es depositar de manera precisa y uniforme la cantidad adecuada de pasta en cada uno de los pads destinados a la soldadura de los componentes. Este procedimiento se realiza comúnmente mediante la serigrafía de la pasta a través de una plantilla o estencil, sin embargo, también puede llevarse a cabo mediante sistemas de impresión por inyección.

Diversos estudios señalan que una deficiente regulación de esta etapa del proceso es responsable de una parte significativa de los defectos asociados al ensamble electrónico. El método más utilizado para la aplicación de soldadura en pasta es mediante impresoras de plantillas esto lo hace con ayuda de navajas o cuchillas.

Las navajas son los elementos encargados de ejercer la presión necesaria para forzar el paso de la pasta de soldadura a través de las aperturas de la plantilla y depositarla sobre la superficie de la PCB. Estas herramientas suelen fabricarse de metal, aunque también existen versiones elaboradas en materiales poliméricos como el poliuretano [18].

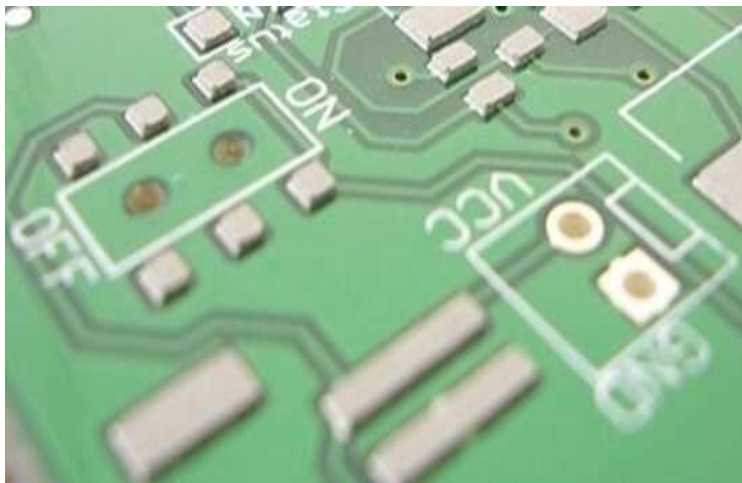


Figura 16. Soldadura en pasta sobre pcb [18].

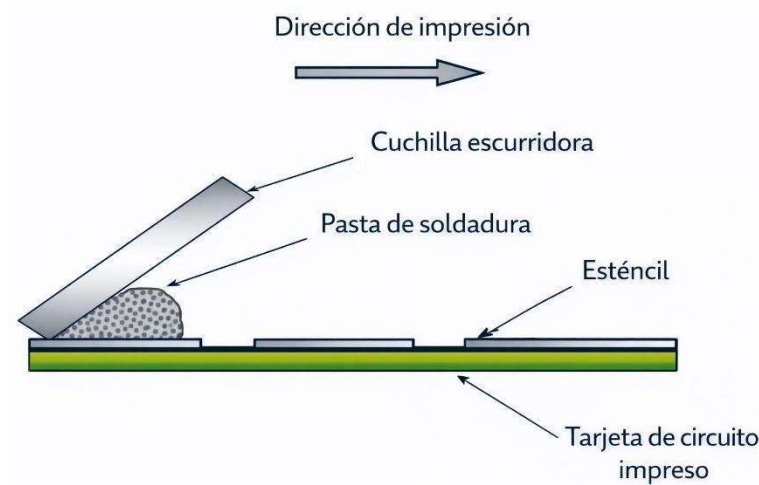


Figura 17. Impresión de pasta con navajas y estencil [18].

1.3.2. Soldadura en pasta

Es un material compuesto por polvo de aleación metálica y un fundente de consistencia viscosa, premezclados para facilitar su aplicación sobre las tarjetas de circuito impreso (PCB). Su textura espesa y adherente permite una deposición precisa mediante técnicas como la impresión con estencil o la dispensación, además de mantener los componentes en su posición durante el proceso de montaje superficial (SMT), lo que favorece una producción de alta velocidad y volumen.

Durante el proceso de soldadura por reflujo, la pasta es sometida a temperaturas superiores a su punto de fusión, lo que activa el fundente y permite la eliminación de óxidos presentes en las superficies metálicas, posibilitando la fusión del polvo de soldadura y la formación de uniones metálicas confiables. Las características del polvo de soldadura, particularmente el tipo de aleación y el tamaño de partícula, influyen directamente en el comportamiento térmico, la calidad de la unión inter metálica y las limitaciones del proceso de impresión. Por su parte, el fundente está constituido por colofonias, activadores, aditivos reológicos y disolventes, cuya combinación define sus propiedades reológicas y su eficacia en la eliminación de óxidos.

1.3.2.1. Propiedades de la soldadura en pasta

El polvo de soldadura empleado en la pasta de soldadura puede estar compuesto por distintas aleaciones, siendo las más utilizadas las mezclas con plomo (principalmente estaño-plomo) y las aleaciones libres de plomo, como la SAC305, compuesta por estaño, plata y cobre. En ambos casos, el estaño constituye el elemento principal debido a su bajo punto de fusión y a sus adecuadas propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y al esfuerzo cortante.

Las aleaciones con plomo presentan ventajas como una menor temperatura de fusión y una buena capacidad para formar uniones metálicas resistentes con materiales comúnmente empleados en las tarjetas de circuito impreso, como el cobre y el aluminio. No obstante, debido a los riesgos asociados a la salud y al medio ambiente, su uso ha sido progresivamente reemplazado por alternativas libres de plomo. Entre estas, la aleación SAC305 se ha consolidado como una de las más empleadas, aunque presenta un punto de fusión más elevado en comparación con las aleaciones eutécticas tradicionales.

En la aleación SAC305, la adición de plata contribuye a mejorar la resistencia mecánica de la unión soldada, mientras que el cobre favorece la humectación y ayuda a reducir el punto de fusión. Además de estas aleaciones, existen otras formulaciones que incorporan elementos como antimonio, bismuto, indio o níquel, con el objetivo de optimizar la calidad de la unión. La selección de la aleación adecuada depende de las propiedades mecánicas y térmicas requeridas, la compatibilidad con los metales base, los estándares electrónicos aplicables y el tipo de dispositivo a fabricar [19].

1.3.2.2. Clasificación de la soldadura en pasta

1.3.2.2.1. *Por tipo de Flux/fundente*

El fundente es un material de naturaleza metalúrgica que desempeña diversas funciones y constituye un elemento esencial en los procesos de unión de metales. Puede actuar como estabilizador, agente de flujo y agente de limpieza química. En el caso de la pasta de soldadura, su función principal es la de agente limpiador durante el proceso de unión.

El fundente opera como un agente reductor que acondiciona la superficie metálica mediante la eliminación de óxidos, residuos y contaminantes. Este proceso prepara la superficie, reduce la probabilidad de oxidación tanto del metal base como del material de aporte y favorece la humectación del metal fundido. La adecuada humectación es fundamental en la soldadura, ya que disminuye la tensión superficial del material fundido y facilita su correcta dispersión sobre las superficies a unir.

En el ámbito electrónico se emplean distintos tipos de fundentes, comúnmente clasificados en tres categorías principales: fundentes solubles en agua, fundentes de tipo “no-clean” y fundentes tradicionales a base de colofonia. Cada categoría presenta características particulares, ventajas y limitaciones, por lo que su selección depende de los requerimientos del proceso y de la aplicación específica en la fabricación electrónica [19].

- El fundente tipo **no-clean** o sin limpieza es el más empleado en la industria, ya que genera residuos mínimos después del proceso de reflujo y, por lo general, no requiere etapas adicionales de limpieza, lo que lo hace adecuado para producciones de alto volumen y diseños de PCB con requerimientos estándar de limpieza.
- Por otro lado, el fundente **soluble en agua** se distingue por su elevada capacidad de limpieza y buena soldabilidad. Sin embargo, los residuos generados tras el reflujo deben eliminarse mediante lavado con agua, por lo que se utiliza

principalmente en aplicaciones donde se demandan superficies con altos niveles de limpieza.

- Finalmente, el fundente a **base de colofonia** proporciona una adecuada fiabilidad y excelentes propiedades de humectación. No obstante, suele dejar residuos visibles sobre la superficie, los cuales, dependiendo de la aplicación, pueden requerir procesos de limpieza adicionales mediante el uso de disolventes [20].

1.3.2.2.2. Por aleación.

- Pasta de soldadura **sin plomo**. En la actualidad, la pasta de soldadura libre de plomo constituye la opción más utilizada en la industria electrónica. Este tipo de pasta emplea aleaciones como la SAC305, las cuales cumplen con las normativas ambientales vigentes y proporcionan una adecuada resistencia mecánica en las uniones soldadas. No obstante, su aplicación requiere el uso de perfiles de reflujo a temperaturas más elevadas en comparación con las aleaciones tradicionales.
- Pasta de soldadura **con plomo**. Basada en aleaciones como Sn63/Pb37, presenta la ventaja de fundirse a temperaturas más bajas y ofrecer una mejor fluidez durante el proceso de soldadura. Debido a estas características, su uso se limita principalmente a actividades de prototipado, trabajos de reparación o aplicaciones especiales donde las normativas ambientales lo permiten [20].

1.3.2.2.3. Por tipo (tamaño de partículas)

En la actualidad en el mundo de la electrónica se busca reducir cada vez más el tamaño en los componentes electrónicos, esto a su vez hace que reduzca el espacio de la soldadura SMT. Estos puntos se han vuelto cada vez más relevantes en la impresión de pasta ya que cada vez se vuelve más difícil de realizar haciendo que una buena impresión

de pasta dependa la mayoría de las veces de las aperturas del estencil y del tamaño de las partículas de la pasta a utilizar.

Por esta razón los fabricantes de pasta se preparan constantemente para afrontar estas dificultades, esto lo hacen con ayuda de la IPC con su norma J-STD-005 que consiste en una clasificación de la soldadura en pasta de acuerdo con el tamaño de sus partículas, estos los maneja por “tipos” y los hay desde el tipo 1 hasta el tipo 8, cada una con funciones y recomendaciones específicas para el propósito que se requiera. Las más utilizada en la industria hasta hoy en día son el tipo 4 y tipo 5 ya que éstas ofrecen una buena calidad de impresión para componentes pequeños, así como también ofrecen una transferencia más sencilla de las partículas de aleación a través de las aberturas del estencil. A continuación, se muestra una tabla con los tipos de pasta y algunas de sus características [21].

Categoría IPC	Tamaño del polvo (micras)	Tamaño mínimo de apertura (mil)	Diámetro interno de la aguja/boquilla (mm)
Tipo 1	150-75 μ	30	1.50
Tipo 2	75-45 μ	15	0.75
Tipo 3	45-25 μ	9	0.45
Tipo 4	38-20 μ	7.5	0.38
Tipo 5	25-15 μ	5	0.25
Tipo 6	15-5 μ	3	0.15

Tipo 7	11-2 μ	2.5	0.11
Tipo 8	8-2 μ	2.0	0.08

Tabla 1. Tipos de soldadura en pasta según IPC (J-STD-005). [21]



Figura 18. Clasificación de soldadura en pasta. [18].

1.3.2.3. Recomendaciones para la soldadura en pasta

- **Buena elección de pasta.** Para saber qué tipo de pasta elegir de acuerdo con las necesidades que se tenga es necesario tener en cuenta que en el proceso de impresión de soldadura se aplica la denominada “regla de las cinco bolas”, la cual establece que, de manera ideal, al menos cinco partículas de soldadura deben cubrir el ancho de la abertura más pequeña del estencil. Este criterio permite garantizar una adecuada liberación de la pasta y una deposición uniforme sobre los pads de la tarjeta de circuito impreso. En la figura 19 se muestra cómo se ven las partículas de la soldadura en 3 tipos de pasta y como sería su comportamiento para distintos encapsulados de componentes SMD. [23]

Size Standard	0603	0402	03015	0201
Type 4				
Type 5				
Type 6				

Figura 19. Partículas de soldadura por tipos [18].

- **Almacenamiento.** Para prolongar la vida útil de la pasta, es necesario mantenerla en refrigeración a una temperatura de 2-10°C, esto ayuda a que el fundente este estabilizado y retrasa su deterioro, de igual forma es importante que el recipiente que contenga la pasta se mantenga cerrado siempre que no se esté utilizando y evite dejarla fuera de refrigeración por periodos largos.
- **Manipulación.** Antes de utilizar la pasta debemos dejarla a temperatura ambiente por al menos 8 horas antes de su uso y no destapar el frasco hasta que se vaya a utilizar. Al momento de destapar el frasco hay que revolver bien la pasta hasta que logremos una mezcla homogénea esto para asegurar una buena distribución al momento de usarse [20].
- **Temperatura y humedad.** Se recomienda que dentro de la impresora haya una temperatura de 22-28°C y una humedad de 30-60%.

1.3.3. Esténcil.

El esténcil o plantilla es una lámina delgada generalmente de acero inoxidable a la que se le realizan aberturas y cortes de acuerdo con el diseño del pcb que se va a trabajar. El esténcil es una de las herramientas más fundamentales para la impresión de soldadura en pasta ya que con este la pasta queda depositada con precisión y con la cantidad justa en los pads de cada PCB, asegurando la unión de soldadura entre pad y terminal del

componente. Es por esto por lo que para llegar a una buena soldadura es importante un buen diseño de estencil que contengan las especificaciones adecuadas para cada PCB [18].

1.3.3.1. Diseño de estencil.

Archivos Gerber. Es un tipo de formato utilizado en el diseño electrónico este no corresponde a un único documento, sino que constituye el estándar empleado en la fabricación de circuitos impresos. Los distintos archivos generados al finalizar el diseño contienen la información necesaria sobre conexiones eléctricas, pistas, vías y pads. Se trata de archivos vectoriales compuestos por una serie de comandos que describen un conjunto de elementos gráficos organizados en capas. Asimismo, incluyen las especificaciones necesarias para el proceso de perforado del PCB. [24]

Los datos Gerber corresponden a un formato de archivo que define un lenguaje de comunicación entre el software de diseño y los sistemas de fotoplotter utilizados en la fabricación de circuitos impresos. Pero estos archivos no solo son utilizados para la fabricación de circuitos, sino que también para la fabricación de estenciles, este formato permite generar las herramientas necesarias para la elaboración de estos mediante procesos de grabado químico. Asimismo, los archivos Gerber son empleados en la producción de estenciles fabricadas mediante corte láser o procesos de electro formado.

Existen dos formatos estándar del archivo Gerber disponibles:

- * RS-274X: En este formato, ampliamente utilizado en la actualidad, la información correspondiente a la lista de aperturas se encuentra integrada directamente dentro del archivo de datos, lo que simplifica el intercambio de información y reduce la posibilidad de errores durante la fabricación.

- * RS-274D: Este formato requiere, además del archivo principal que contiene las coordenadas X-Y para la definición de la imagen en la plantilla, un archivo adicional e independiente con la lista de aperturas Gerber. Dicho archivo complementario especifica las dimensiones y formas de las aperturas necesarias para generar la imagen del circuito [25].

En la siguiente tabla se muestran algunas extensiones y su función de algunos archivos contenidos en el formato Gerber.

Nombre de archivo, extensión	Función
.brd	Archivo de proyecto de placa base
.rou	Ruta de corte del contorno del tablero
.drl	Datos de perforación
.GTS	Mascara de soldadura superior
.GBS	Mascara de soldadura inferior
.GD1	Dibujo de agujeros
.GG1	Guia de perforación
.GTL	Capa superior de cobre
.GBL	Capa inferior de cobre
.GTO	Superposición superior
.GBO	Superposición inferior
GP1, GP2, GP3...	Capas internas

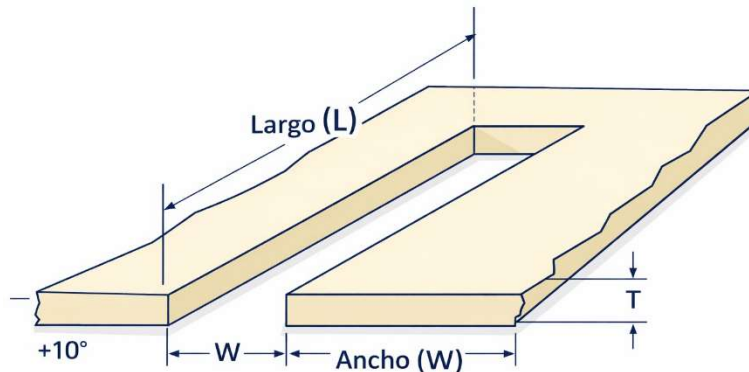
Tabla 2. Extensiones de archivos Gerber [26].

Grosor del estencil.

El espesor del estencil constituye un parámetro fundamental para asegurar una adecuada liberación de la pasta de soldadura a través de las aperturas y, para obtener el volumen correcto necesario para formar la unión soldada deseada. Generalmente, el grosor de la plantilla se encuentra en un rango aproximado de 4 a 8 milésimas de pulgada (mil).

Cuando el estencil presenta un espesor excesivo en relación con el tamaño de las aperturas, puede producirse una retención de la pasta en las paredes internas debido a los efectos de la tensión superficial, lo que afecta la calidad del depósito y, en consecuencia, la integridad de la unión soldada.

La Figura 20 presenta la expresión matemática que permite diferenciar entre la relación de aspecto y la relación de área de las aperturas del estencil.



$$\text{Relación de aspecto} = \frac{\text{Ancho de la apertura}}{\text{Espesor del estencil}} = \frac{W}{T}$$

$$\text{Relación de área} = \frac{\text{Área de la apertura}}{\text{Área de las paredes de la apertura}} = \frac{L \times W}{2 \times (L + W) \times T}$$

Figura 20. Relación aspecto – área.

La relación de aspecto y la relación de área son dos parámetros diferentes, utilizados para caracterizar las aperturas de las plantillas en el ensamblaje de componentes electrónicos, particularmente en los procesos de impresión de soldadura en pasta. Cada uno cumple una función específica y aporta información diferente sobre el diseño del estencil. A continuación, se describe cada uno:

Relación de aspecto de las aberturas del estencil. La relación de aspecto corresponde al resultado de la división de la altura de la abertura (grosor del estencil), entre el ancho o diámetro de la abertura.

Relación de aspecto = Altura de la abertura (grosor de la plantilla) / Ancho o diámetro de la abertura.

Este parámetro permite evaluar la proporción geométrica de la abertura, comparando su altura con su dimensión lateral. Es útil para estimar la facilidad con la que la pasta de soldadura puede transferirse a través de la abertura [25].

Relación de área de las aberturas del estencil. La relación de área se define como el resultado de la división entre el área de la abertura de la plantilla y el área del pad correspondiente en la placa de circuito impreso (PCB).

Relación de área = Área de la abertura / Área de la almohadilla

Este parámetro permite determinar la proporción entre el tamaño de la abertura y el área del pad donde se depositará la pasta de soldadura. Su finalidad es asegurar que se transfiera el volumen adecuado de pasta, evitando defectos asociados tanto a la insuficiencia como al exceso de material [18].

Aperturas del estencil.

La IPC-7525A nos habla de directrices de diseño de estenciles, ésta es muy utilizada por los diseñadores de estenciles y nos dice que como guía general el tamaño de las aberturas de las plantillas se debe reducir respecto al tamaño de los pads de la tarjeta PCB. Ya sea reducir o modificar la forma de abertura del estencil ayuda a optimizar los procesos de impresión de pasta, pues estas recomendaciones reducen los errores como las bolas de soldaduras ocasionadas por pasta colocada fuera de lugar o desalineación entre abertura y pad. Hay muchas maneras de realizar aberturas en los estenciles, va a depender del diseño de cada pcb y lo que sea más factible para este. Por ejemplo, en resistencias y capacitores existen varias formas posibles para realizar aberturas y son muy eficientes para reducir el exceso de soldadura atrapada debajo de los componentes y así asegurar una buena soldadura entre terminal del componente y pad del pcb. [25]

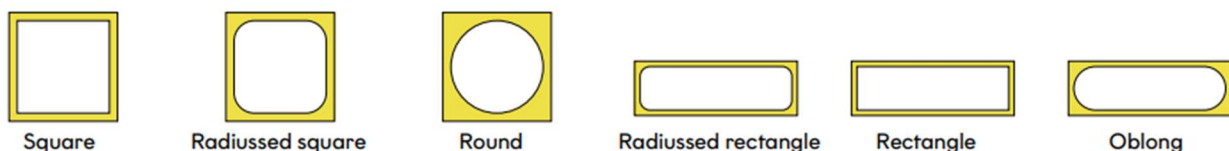


Figura 21. Formas de aberturas de estencil.

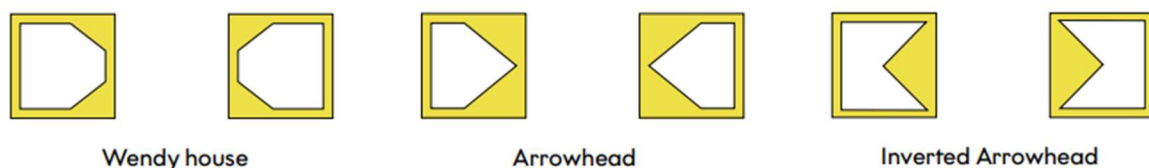


Figura 22. Modificaciones de apertura para componentes tipo chips [27].

Tecnologías de fabricación del estencil.

La fabricación de estenciles puede realizarse mediante procesos de tipo aditivo o sustractivo. En los métodos aditivos, como el electroformado, el metal se deposita progresivamente hasta conformar la lámina del estencil. En cambio, en los procesos sustractivos se elimina material de una lámina base para generar las aberturas requeridas. El corte por láser y el grabado químico son ejemplos representativos de este tipo de técnica.

Grabado químico. Las plantillas grabadas químicamente se fabrican a partir de láminas metálicas fotocopiables laminadas por ambas caras y cortadas al tamaño requerido; mediante una herramienta fotográfica alineada con precisión, se transfieren las imágenes de las aperturas, las cuales se ajustan considerando el factor de grabado, que compensa el desgaste lateral producido durante el proceso químico.

Posteriormente, la lámina se revela y se somete a un grabado químico por ambas caras para formar las aperturas especificadas. Este método también permite generar escalones en la plantilla, facilitando una superficie uniforme que mejora el deslizamiento de la pasta de soldadura y la limpieza de la espátula.

Corte laser. Las plantillas cortadas con láser se fabrican a partir de la información digital generada por el software del equipo de corte, eliminando la necesidad de utilizar herramientas fotográficas, a diferencia del proceso de grabado químico.

Una característica inherente de este método es la formación de paredes de apertura con geometría cónica. De manera estándar, y salvo especificación contraria, las aperturas se diseñan con mayor dimensión en el lado de contacto con la tarjeta electrónica y menor dimensión en el lado de la espátula, con el propósito de optimizar la liberación de la pasta de soldadura.

Electroformado. Es un proceso de fabricación aditivo empleado en la producción de plantillas, el cual combina el uso de una resina fotoimprimible con un procedimiento de

galvanoplastia. Inicialmente, se deposita una capa de resina fotoimprimible sobre un mandril metálico, cuyo espesor es superior al grosor final requerido para la plantilla. Posteriormente, se transfieren las aperturas sobre la resina y se realiza el revelado, conservando pilares de resina en las zonas donde se desean formar las aberturas. El mandril con dichos pilares se introduce en un baño de niquelado, donde se lleva a cabo el electro depósito de níquel hasta alcanzar el espesor especificado. Finalmente, se retiran los pilares de resina y se separa la lámina de níquel obtenida del mandril, completando así la fabricación de la plantilla [25].

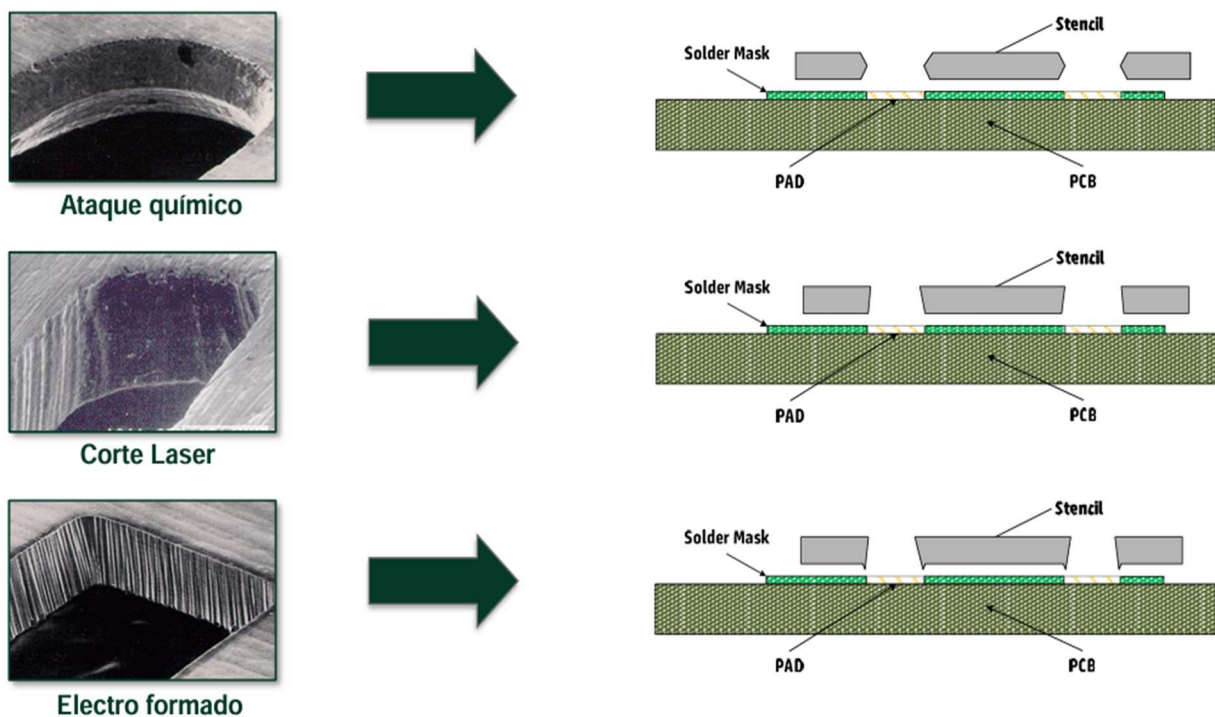


Figura 23. Tecnologías para estenciles [28].

Alineación del estencil.

Para asegurar una buena impresión se necesita tener una buena alineación entre estencil y pcb, por este motivo se añaden marcas de alineado para utilizarse como puntos de referencia, estas marcas son conocidas como fiduciales y deben ser colocados tanto en el pcb como en el estencil. Así mismo estas marcas deben de tener un diámetro de 1 a 3 mm y debe haber un espacio libre del borde del pcb hacia adentro de mínimo 3 mm. Se

recomienda colocar 2 fiduciales locales en diagonal y fuera del área de donde se encuentren los componentes SMD [18].

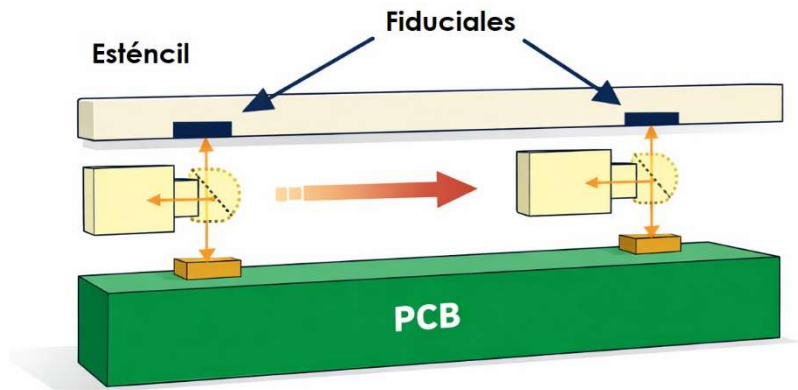


Figura 24. Sistema de alineación de estencil y PCB [27].

1.3.4. Squeegee blades.

En el proceso de impresión de pasta con estencil, las squeegee Blades también conocidas como rasquetas o navajas, son una herramienta utilizada para depositar la soldadura en pasta en la placa PCB que funcionan mediante la presión ejercida en ellas hacia el estencil. Existen principalmente dos tipos de materiales empleados en las rasquetas: goma o poliuretano y metálicas.

Las láminas de rasquetas metálicas son las más utilizadas en la actualidad, ya que operan con menor presión en comparación con las de goma. Esta característica reduce la posibilidad de extraer pasta de soldadura de las aperturas de la plantilla durante el proceso de impresión. Además, al estar fabricadas en metal, presentan mayor resistencia al desgaste, lo que disminuye la necesidad de mantenimiento o reafileado periódico.

Su uso se ha incrementado significativamente debido a la creciente incorporación de componentes de paso fino, donde se requiere mayor precisión y control en el depósito de soldadura en pasta.

Las hojas de las rasquetas metálicas se fabrican comúnmente en acero inoxidable y pueden presentarse en dos configuraciones: de espesor uniforme, generalmente de 0,150 mm, o con diseño de borde rebajado. En este último caso, el material base posee

un espesor aproximado de 0,300 mm, el cual se reduce progresivamente hasta 0,150 mm en el borde activo para optimizar el desempeño durante la impresión.

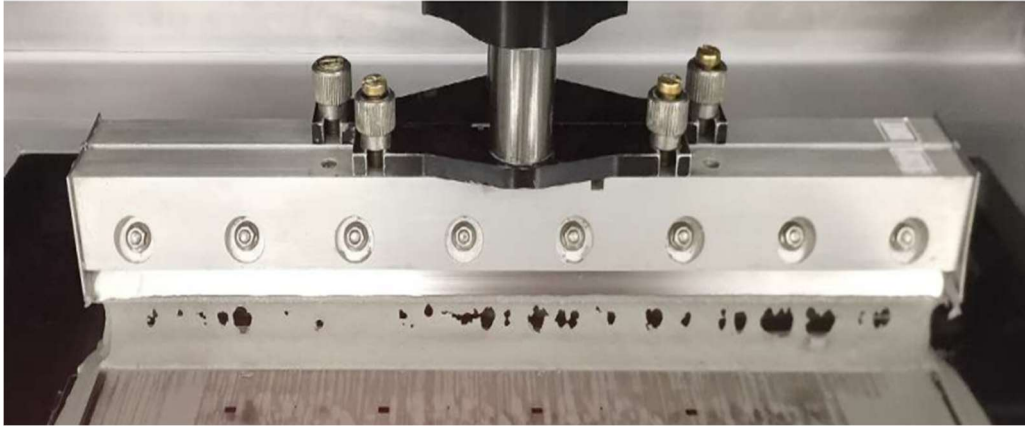


Figura 25. Rasquetas o navajas [27].

1.3.5. Parámetros de impresión.

Para que una impresión de paste en el proceso SMT se lleve a cabo de manera eficiente depende de muchos factores como los siguientes:

- Configuración de la impresora
- Planitud de la PCB y acabado soldable
- Pasta de soldadura, su estado y tamaño de la esfera de soldadura
- Cuchilla de la espátula o sistema de suministro de pasta
- Condiciones ambientales
- Experiencia del operador
- Diseño y optimización de la plantilla

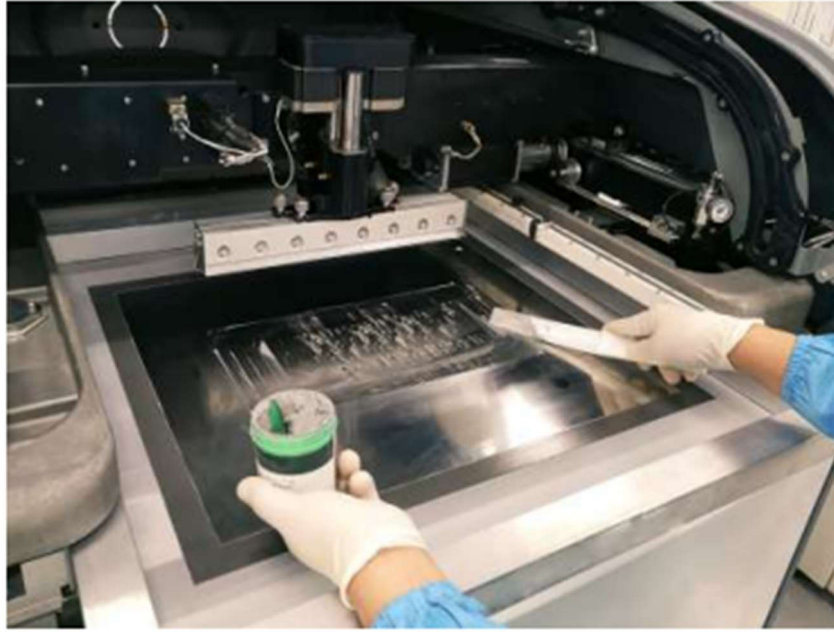


Figura 26. Configuración de la impresora [27].

1.3.5.1. Ciclo de impresión.

El ciclo de impresión en el proceso SMT comprende una serie de operaciones que la impresora debe ejecutar para garantizar un depósito adecuado de soldadura en pasta sobre la PCB. Estas operaciones incluyen: el transporte y posicionamiento de la tarjeta PCB en contacto con la plantilla o estencil, la alineación precisa entre el estencil y la tarjeta, la aplicación de la pasta mediante el desplazamiento de las navajas y el llenado de las aperturas, la separación controlada de la tarjeta, la inspección opcional de los depósitos y la limpieza inferior de la plantilla después de un número determinado de ciclos.

La secuencia típica de operación en una impresora integrada en línea es la siguiente:

1. Ingreso y posicionamiento de la PCB.
2. Sujeción de la placa.
3. Localización de puntos de referencia (fiduciales) mediante el sistema de visión.
4. Alineación automática del estencil.
5. Elevación del PCB hasta lograr contacto con la plantilla.
6. Ejecución del barrido de la rasqueta para depositar la pasta.

-
7. Descenso del PCB y separación controlada.
 8. Liberación y salida de la PCB por la banda transportadora.

Este procedimiento es aplicable tanto a impresoras en línea como a equipos independientes, aunque estos últimos pueden requerir manipulación manual. Existen variaciones en los sistemas de fijación, alineación y limpieza según el grado de automatización.

El éxito del proceso de impresión SMT depende de múltiples factores, entre los cuales destacan: la configuración de la impresora, la planicidad y acabado superficial de la PCB, las características de la soldadura en pasta, el tipo de navajas o sistema de suministro, las condiciones ambientales, la experiencia del operador y el diseño optimizado de la plantilla.

Las impresoras pueden clasificarse en manuales, semiautomáticas y totalmente automáticas. La selección del equipo adecuado depende principalmente del paso de los componentes, el volumen de producción y el nivel de calidad requerido.[27]

1.3.5.2. Montaje de la placa.

La tarjeta PCB es transportada hacia el interior y exterior de la impresora, generalmente mediante un sistema de cintas transportadoras. Una vez que la placa ingresa al área de trabajo, se posiciona con precisión y se detiene en el punto establecido mediante topes mecánicos o sensores ópticos. Resulta indispensable que la PCB permanezca firmemente fijada para evitar desplazamientos laterales y, al mismo tiempo, que cuente con el soporte necesario para resistir las fuerzas descendentes generadas durante el recorrido de las navajas (Figura 27). De no garantizarse esta sujeción adecuada, pueden presentarse deformaciones del sustrato y filtraciones de pasta de soldadura por debajo de la plantilla.

El sistema de soporte ubicado bajo la placa puede configurarse de distintas maneras, entre las cuales destacan:

- Placas de herramental específicas equipadas con pines de alineación diseñados para un modelo particular de PCB.

-
- Matrices universales de pines de soporte, ya sean ajustadas manualmente o programables.

La selección del método de soporte depende de los requerimientos de la aplicación. Sin embargo, proporcionar un respaldo adecuado durante la impresión de la segunda cara puede representar un desafío, especialmente cuando la primera cara ya tiene componentes o cuando la PCB presenta un espesor reducido o características de flexibilidad elevada [27].



Figura 27. Pines de soporte para PCB.

1.3.5.3. Velocidad de impresión.

La velocidad de impresión es un parámetro crítico que debe evaluarse cuidadosamente durante la configuración del proceso. Como criterio inicial, se debe considerar la abertura más pequeña presente en la plantilla y su orientación respecto a la dirección de impresión. Una velocidad excesiva puede provocar un llenado incompleto o deficiente de las aperturas, generando depósitos de pasta irregulares y afectando la calidad de la unión soldada.

La velocidad de desplazamiento de la escobilla influye directamente en el tiempo disponible para que la pasta de soldadura fluya y llene adecuadamente las aperturas de

la plantilla y las almohadillas de la PCB. De manera general, se emplea una velocidad aproximada de 25 mm/s; sin embargo, este valor puede ajustarse en función del tamaño y geometría de las aperturas, así como de las características reológicas de la pasta de soldadura utilizada.

1.3.5.4. Presión de impresión.

Durante el ciclo de impresión, es fundamental aplicar una presión adecuada a lo largo de la lámina de la espátula con el fin de garantizar una limpieza eficiente de la superficie del estencil. Una presión insuficiente puede ocasionar arrastre de la pasta sobre la plantilla, depósitos deficientes y una transferencia incompleta hacia la PCB.

Por el contrario, una presión excesiva puede generar extrusión de pasta a través de aperturas de mayor tamaño, incrementar el desgaste tanto del estencil como de la lámina de la espátula, e incluso favorecer la filtración de pasta entre la plantilla y la PCB.

De manera referencial, un ajuste común de presión corresponde a aproximadamente 500 gramos por cada 25 mm de longitud de la lámina, aunque este valor puede variar según las condiciones específicas del proceso y los materiales empleados. [18]

1.3.5.5. Ángulo de impresión.

De manera general, las cuchillas o navajas deben colocarse formando un ángulo aproximado de 60° respecto a la superficie de la plantilla. Durante la carrera de impresión, es necesario aplicar una fuerza descendente suficiente para garantizar que la pasta de soldadura se desplace adecuadamente y logre el llenado completo de las aperturas, especialmente aquellas de menor dimensión.

La reducción del ángulo de la cuchilla a aproximadamente 45° incrementa la fuerza hacia abajo, lo que puede favorecer un mayor llenado de las aperturas, como se muestra en la figura 28. No obstante, debe evitarse la aplicación de una presión excesiva bajo esta configuración, ya que podría comprometer el sellado entre la plantilla y la PCB, generando defectos como sangrado de pasta, formación de puentes de soldadura y posibles cortocircuitos.[27]

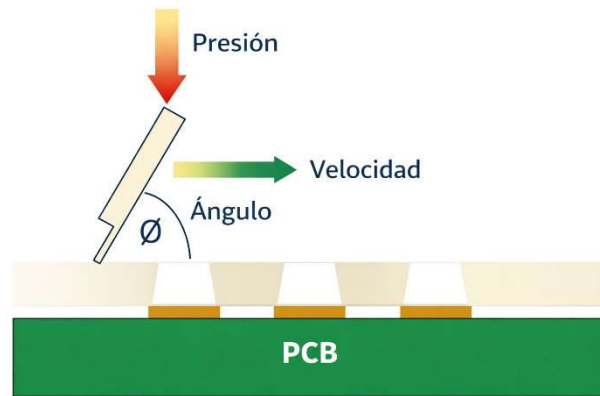


Figura 28. Parámetros de impresión con navajas.

1.3.5.6. Velocidad de separación de la plantilla.

La velocidad de separación corresponde al ritmo al que la PCB se despegue de la plantilla una vez finalizada la impresión de pasta. Generalmente, se recomienda una velocidad máxima de aproximadamente 3 mm/s, aunque este valor puede variar en función del tamaño de las aperturas de la plantilla.

Si la separación se realiza a una velocidad excesiva, la pasta de soldadura puede no liberarse completamente de las aperturas, lo que origina la formación de bordes elevados o irregularidades alrededor de los depósitos impresos, fenómeno comúnmente denominado “orejas de perro” (Figura 29). [18]

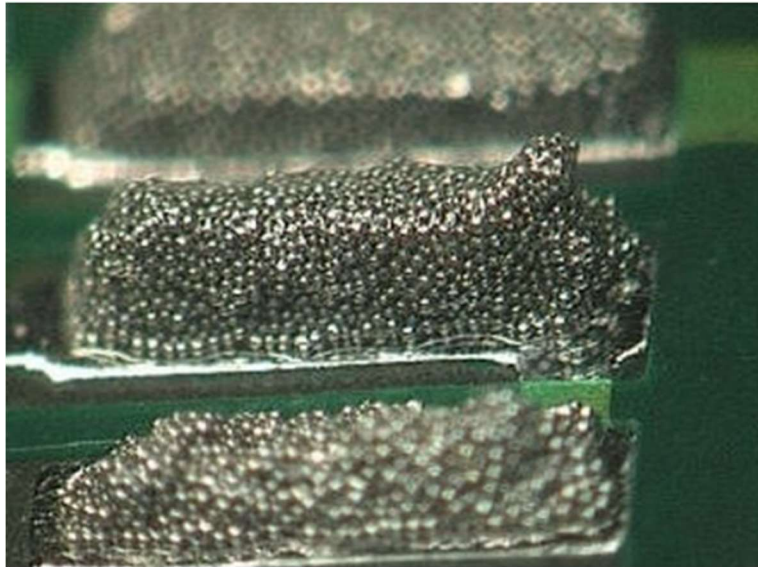


Figura 29. Ejemplo del fenómeno “orejas de perro”.

1.3.5.7. Limpieza de estencil.

La frecuencia de limpieza depende del paso más fino de los componentes, la calidad de la PCB, la alineación del proceso y las condiciones ambientales. Factores como exudado de pasta, desalineación, presión inadecuada de la espátula o liberación deficiente pueden provocar acumulación de residuos en la parte inferior de la plantilla, como se muestra en la Figura 30, lo que incrementa defectos como sangrado, puentes, cortocircuitos y formación de bolas de soldadura. El uso de estenciles con nanorrecubrimiento puede reducir la frecuencia requerida de limpieza.

La limpieza puede realizarse manualmente o mediante sistemas automáticos integrados en impresoras modernas, los cuales operan a intervalos programables. Estos sistemas suelen emplear papel sin pelusa que, en combinación con limpieza en seco, húmeda o asistida por vacío, permite remover eficazmente la pasta y los contaminantes, asegurando la calidad del proceso de impresión.

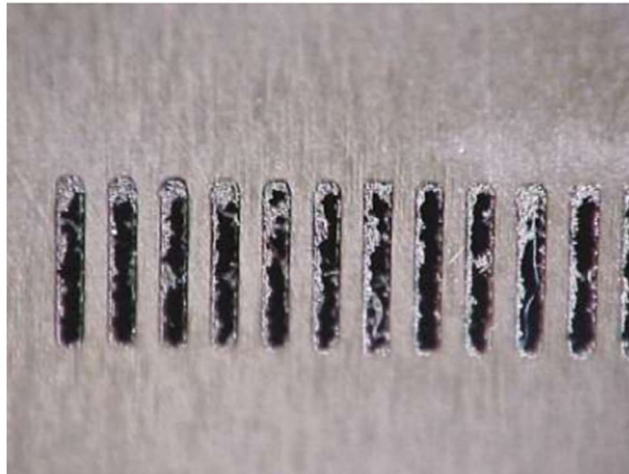


Figura 30. Obstrucción de la pasta en aperturas de estencil.

1.3.6. Inspección.

El control de calidad es una parte fundamental del proceso SMT ya que generalmente los fallos de funcionamiento de una pcb se deben a una impresión incorrecta de pasta. Generalmente los defectos en una línea de producción SMT se pueden corregir antes del ensamble, esto previene pérdidas en costo ya que es mejor identificar los defectos antes del reflujo en comparación que si se identificaran después.

Con el objetivo de asegurar que el volumen de pasta de soldadura depositado sea el requerido, libre de defectos y consistente a lo largo del proceso, es indispensable implementar un sistema de inspección exhaustivo y confiable. A medida que los componentes electrónicos evolucionan hacia dimensiones más reducidas y configuraciones más complejas, el control del proceso de impresión se vuelve más crítico y exigente. Por esta razón, se recomienda realizar una inspección completa de cada PCB impresa antes de iniciar la etapa de colocación de componentes, con el fin de garantizar la calidad y repetibilidad del proceso de ensamble.

Los sistemas de inspección de soldadura más utilizados son la 2D y 3D. Los sistemas de inspección 2D identifican que la pasta esté correctamente colocada en el área deseada e identifica los cortocircuitos, este sistema es bueno, pero no permite verificar el volumen ni la forma de la pasta. La inspección tridimensional (3D) de pasta de soldadura no solo

permite evaluar la cobertura sobre las áreas de soldadura y detectar posibles cortocircuitos, sino que también posibilita la medición precisa de la geometría y el volumen de los depósitos aplicados, proporcionando un control más completo y cuantitativo del proceso de impresión. [18]

En la figura 31 se muestra una inspección en SPI.

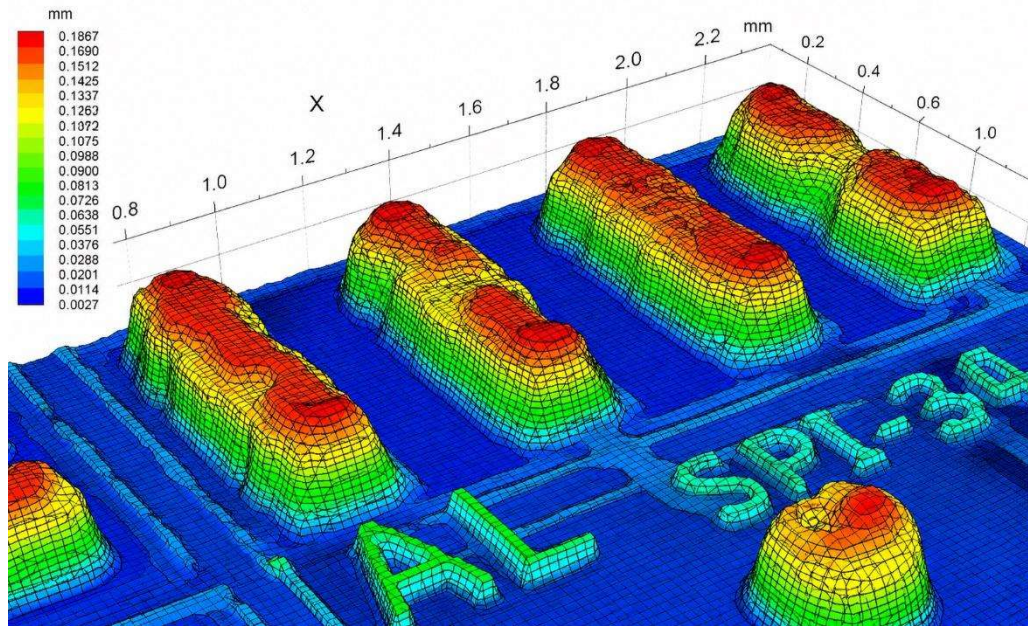


Figura 31. Ejemplo de inspección de soldadura 3D.

1.3.7. Máquina Pick and Place.

Una máquina de montaje SMT tipo *pick and place* es un equipo automatizado empleado en la industria de tecnología de montaje superficial para colocar componentes electrónicos sobre tarjetas de circuito impreso (PCB). Su funcionamiento consiste en utilizar un cabezal especializado que recoge los componentes desde carretes o bandejas de alimentación y los posiciona con alta precisión en los puntos establecidos de la PCB. Todo el proceso es controlado mediante un sistema computarizado que dirige los movimientos del cabezal, garantizando una colocación exacta de cada componente. Estas máquinas permiten optimizar la velocidad y precisión en el ensamblaje de tarjetas electrónicas, aspecto fundamental en la industria SMT, donde se manejan altos volúmenes de producción. Podemos ver un ejemplo de esta máquina en la figura 32.



Figura 32. Máquina NeoDen7 de recogida y colocación típica [30].

1.3.7.1. Historia.

El desarrollo de las máquinas de recogida y colocación comenzó en la década de 1960, junto con los primeros avances de la tecnología de montaje superficial (SMT). En aquella época, la colocación de componentes en las placas de circuito impreso (PCB) se realizaba de forma manual, lo que implicaba un proceso lento, demandante y con alta probabilidad de errores. Con el objetivo de incrementar la precisión y la productividad, surgieron las primeras máquinas automatizadas de recogida y colocación.

En sus inicios, estos equipos tenían capacidades limitadas y únicamente podían posicionar unos cuantos componentes por minuto. No obstante, gracias a la evolución tecnológica, las máquinas actuales son capaces de montar cientos e incluso miles de componentes por minuto con un elevado nivel de exactitud. En la actualidad, estos sistemas son fundamentales dentro de la industria SMT, ya que participan de manera decisiva en la fabricación de numerosos dispositivos electrónicos, como teléfonos inteligentes, computadoras y otros equipos electrónicos de consumo.

1.3.7.2. Composición/Funcionamiento.

Las máquinas de recogida y colocación integran diversas tecnologías avanzadas que permiten posicionar con exactitud los componentes de montaje superficial sobre las placas de circuito impreso (PCB). Entre las tecnologías más importantes se encuentran las siguientes:

Sistema de visión: Gran parte de estas máquinas cuentan con sistemas de visión artificial que facilitan la detección e identificación tanto de los componentes como de las PCB. Generalmente, estos sistemas están formados por cámaras y software especializado encargado de procesar imágenes para reconocer la ubicación y orientación correcta de cada componente.

Sistema de boquillas (nozzles): El cabezal de colocación incorpora boquillas diseñadas específicamente para tomar y posicionar los componentes electrónicos. Dependiendo del diseño de la máquina, estos sistemas pueden utilizar vacío, sujetadores mecánicos u otros mecanismos que permiten manipular los componentes de forma segura y precisa.

Sistema de control de movimiento: El desplazamiento preciso del cabezal y de las diferentes partes de la máquina se logra mediante sistemas de control de movimiento. Normalmente, estos sistemas emplean servomotores y controladores especializados que garantizan movimientos exactos y repetitivos durante el proceso de ensamblaje. [29]



Figura 33. 6 boquillas de vacío en 6 cabezales - NeoDen7 [30].

Alimentador: Dentro de la industria de tecnología de montaje superficial (SMT), el alimentador SMT desempeña una función fundamental al proporcionar los componentes electrónicos a las máquinas de recogida y colocación y a otros equipos del proceso (Figura 34). Generalmente, está compuesto por carretes o bandejas de suministro desde donde los componentes son entregados de forma controlada al cabezal de colocación. Para transportar los componentes de manera eficiente, estos sistemas pueden emplear distintos mecanismos, entre ellos bandas, rodillos o placas vibratorias. [29]

Con el avance de la tecnología de alimentación, el formato en cinta se ha consolidado como el método más utilizado para suministrar componentes en las máquinas *pick and place*. En las primeras generaciones de estos equipos, los cabezales de alimentación eran considerablemente más grandes y pesados, por lo que no estaban diseñados para desplazarse dentro del sistema. Debido a ello, la tarjeta PCB se colocaba sobre una plataforma móvil que se encargaba de posicionar las diferentes áreas de la placa frente al cabezal de alimentación superior para realizar el ensamblaje. [30]



Figura 34. Alimentador neumático en NeoDen7 [30].

1.3.8. Sistema de Inspección Óptica Automatizada (AOI).

En la actualidad, la tecnología SMT se ha consolidado como el método principal para el ensamblaje de placas de circuito impreso en la industria electrónica, ya que permite incrementar la productividad y optimizar el desempeño al colocar los componentes directamente sobre la superficie de la PCB.

Con la tendencia hacia dispositivos electrónicos cada vez más compactos y componentes de menor tamaño, asegurar la precisión y calidad en el proceso de ensamble SMT representa un reto importante. En este contexto, las máquinas AOI dentro del proceso SMT adquieren una gran relevancia, debido a que permiten realizar inspecciones automáticas que garantizan la calidad del ensamble.

El AOI (*Automated Optical Inspection*) es un sistema de inspección automatizada que utiliza tecnología óptica para verificar distintos aspectos de los componentes electrónicos montados en una PCB, tales como su posición, polaridad y calidad de soldadura.

Para ello, el equipo emplea cámaras y sistemas de iluminación que capturan imágenes de la tarjeta en tiempo real. Posteriormente, mediante software de procesamiento de imágenes, estas son analizadas y comparadas con parámetros o modelos previamente establecidos, permitiendo detectar componentes defectuosos o problemas relacionados con la soldadura. En la figura 35 se puede apreciar mejor la cámara de visión utilizada en el AOI. [31]



Figura 35. Cámara de visión artificial utilizada en AOI [32].

1.3.8.1. Composición/Funcionamiento.

Captura de imágenes. El sistema AOI utiliza cámaras de alta resolución para obtener imágenes de diferentes zonas del PCB. Estas imágenes incluyen detalles como la ubicación de los componentes, polaridad, marcas de referencia y uniones de soldadura. Gracias a su resolución, es posible identificar incluso componentes de dimensiones reducidas.

Procesamiento de imágenes. Una vez obtenidas las imágenes, estas son procesadas mediante algoritmos especializados que analizan características específicas, como la posición del componente, su orientación, desplazamientos y la calidad de las soldaduras.

Comparación y análisis. El equipo compara la información obtenida con estándares previamente definidos para determinar si existen defectos de ensamble o problemas de soldadura. En caso de encontrar anomalías fuera de especificación, el sistema las registra y genera una alerta.

Retroalimentación y corrección. Cuando el AOI detecta un defecto, puede activar acciones automáticas o notificar al operador para realizar una inspección o reparación manual. Este procedimiento contribuye a reducir la producción de tarjetas no conformes y mejora el control de calidad dentro del proceso SMT. [31]

1.3.9. Horno de reflujo.

Un horno de reflujo es un equipo utilizado para fundir la pasta de soldadura y permitir la unión de los componentes electrónicos a las placas de circuito impreso (PCB) durante el proceso de ensamblaje SMT. A diferencia de las técnicas de soldadura convencionales, este tipo de horno emplea un calentamiento controlado que garantiza uniones de soldadura homogéneas y de alta calidad, incluso en tarjetas electrónicas de gran complejidad.

Los hornos de reflujo son fundamentales en el proceso de ensamblaje electrónico, ya que permiten automatizar y estandarizar la soldadura, disminuyendo la posibilidad de errores humanos y mejorando la productividad. Además, proporcionan un calentamiento uniforme, aspecto indispensable en PCB con alta densidad de componentes y dispositivos de tamaño reducido, como microchips y resistencias.

1.3.9.1. Funcionamiento.

El proceso de soldadura por reflujo inicia con la aplicación de pasta de soldadura, compuesta por una mezcla de fundente y partículas de soldadura, sobre la superficie de la PCB. Posteriormente, los componentes electrónicos son colocados sobre los pads correspondientes y la tarjeta se introduce en un horno de reflujo. Dentro del horno, el conjunto es calentado de manera gradual por diferentes etapas hasta fundir la soldadura, permitiendo así la formación de uniones mecánicas y eléctricas resistentes. [33]

1.3.9.2. Reflujo y perfiles.

Durante el proceso de soldadura por reflujo, la pasta de soldadura previamente depositada se funde para generar las uniones eléctricas y mecánicas entre las terminales de los componentes y las almohadillas del sustrato. Actualmente existe una amplia variedad de fabricantes de pasta de soldadura, cada uno con formulaciones específicas que pueden requerir ligeros ajustes en el perfil térmico de reflujo para obtener resultados óptimos.

En los inicios de la tecnología de montaje superficial, el calentamiento se realizaba principalmente mediante hornos infrarrojos. Aunque estos equipos han evolucionado considerablemente con el paso de los años, en la actualidad es más común el uso de hornos de convección de aire forzado para efectuar el reflujo de la pasta de soldadura. Asimismo, la tecnología de fase de vapor también ha sido utilizada con éxito, especialmente en procesos de soldadura libre de plomo, debido a que el fluido empleado posee un punto de ebullición constante que permite distribuir uniformemente la temperatura en toda la PCB.

La correcta configuración del perfil de reflujo, tanto para la pasta de soldadura como para los componentes utilizados, es un factor esencial para asegurar el éxito del ensamblaje SMT. Los fabricantes de pasta proporcionan perfiles recomendados que sirven como referencia inicial; sin embargo, dependiendo de las características de la tarjeta electrónica, pueden requerirse pequeños ajustes para alcanzar niveles adecuados de calidad.

Para optimizar el perfil térmico, es indispensable comprender el comportamiento de la temperatura sobre la PCB durante el proceso. Por esta razón, se utilizan perfiladores térmicos equipados con termopares, los cuales permiten monitorear distintos puntos críticos y verificar que se alcancen las temperaturas necesarias para lograr el reflujo adecuado de la soldadura.

El perfil de reflujo se divide generalmente en cuatro etapas principales:

- **Precalentamiento:** Consiste en incrementar gradualmente la temperatura de la tarjeta y los componentes para evitar daños ocasionados por choque térmico.
- **Remojo:** En esta etapa se estabiliza la temperatura del ensamble, permitiendo equilibrar las diferencias térmicas entre los distintos componentes.
- **Reflujo:** Ocurre cuando la temperatura supera el punto de liquidus de la soldadura. Normalmente, el ensamble permanece entre 40 y 60 segundos por encima de esta temperatura para asegurar la correcta fusión de todas las uniones de soldadura.
- **Enfriamiento:** Esta fase permite reducir la temperatura de manera controlada, evitando la formación excesiva de compuestos intermetálicos que podrían fragilizar las uniones de soldadura [27].

A continuación, en la figura 36 tenemos un ejemplo de la gráfica del perfil de un horno de reflujo.

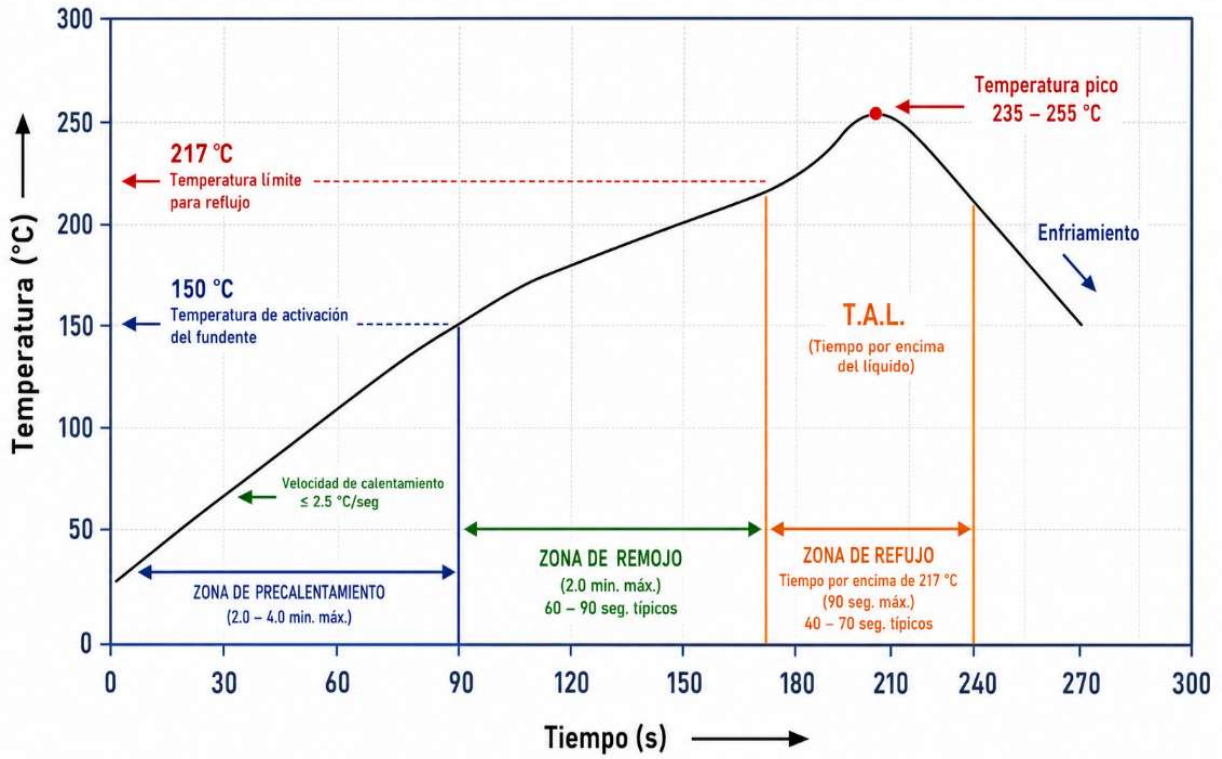


Figura 36. Perfil típico de reflujo sin plomo [27].

Capítulo 2 Metodología y desarrollo

2. Análisis del proceso de ensamble SMT en la línea de producción de una empresa.

La línea de ensamble SMT de la empresa que se analizará, se dedica a la fabricación de tarjetas electrónicas para controles de temperatura, la producción tiene un volumen alto por lo que la empresa requiere de cierta cantidad de tarjetas mensuales, a su vez se necesita tener un ensamble casi perfecto para no tener pérdidas a lo largo de los procesos.

En la Figura 37, se muestra un diagrama de bloques sobre como esta distribuida la línea de ensamble.

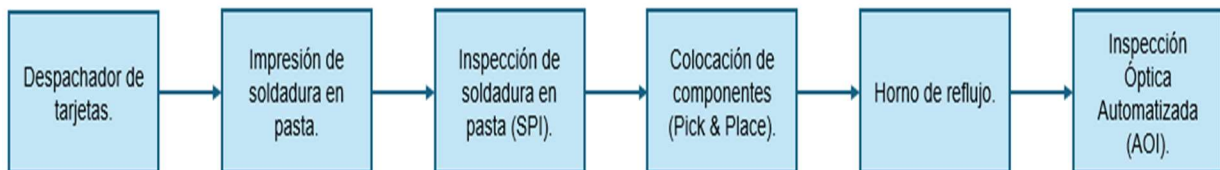


Figura 37. Diagrama de bloques de la línea de ensamble SMT.

Cada estación o apartado es importante y cumple una función crucial para la realización de todo el proceso, puesto que, si alguna estación falla o para, la línea no puede seguir trabajando hasta que se resuelva el inconveniente que se tenga.

En el siguiente diagrama de flujo (Figura 38) se muestra cómo funciona el proceso de ensamble SMT partiendo desde la recepción e inspección de materiales.

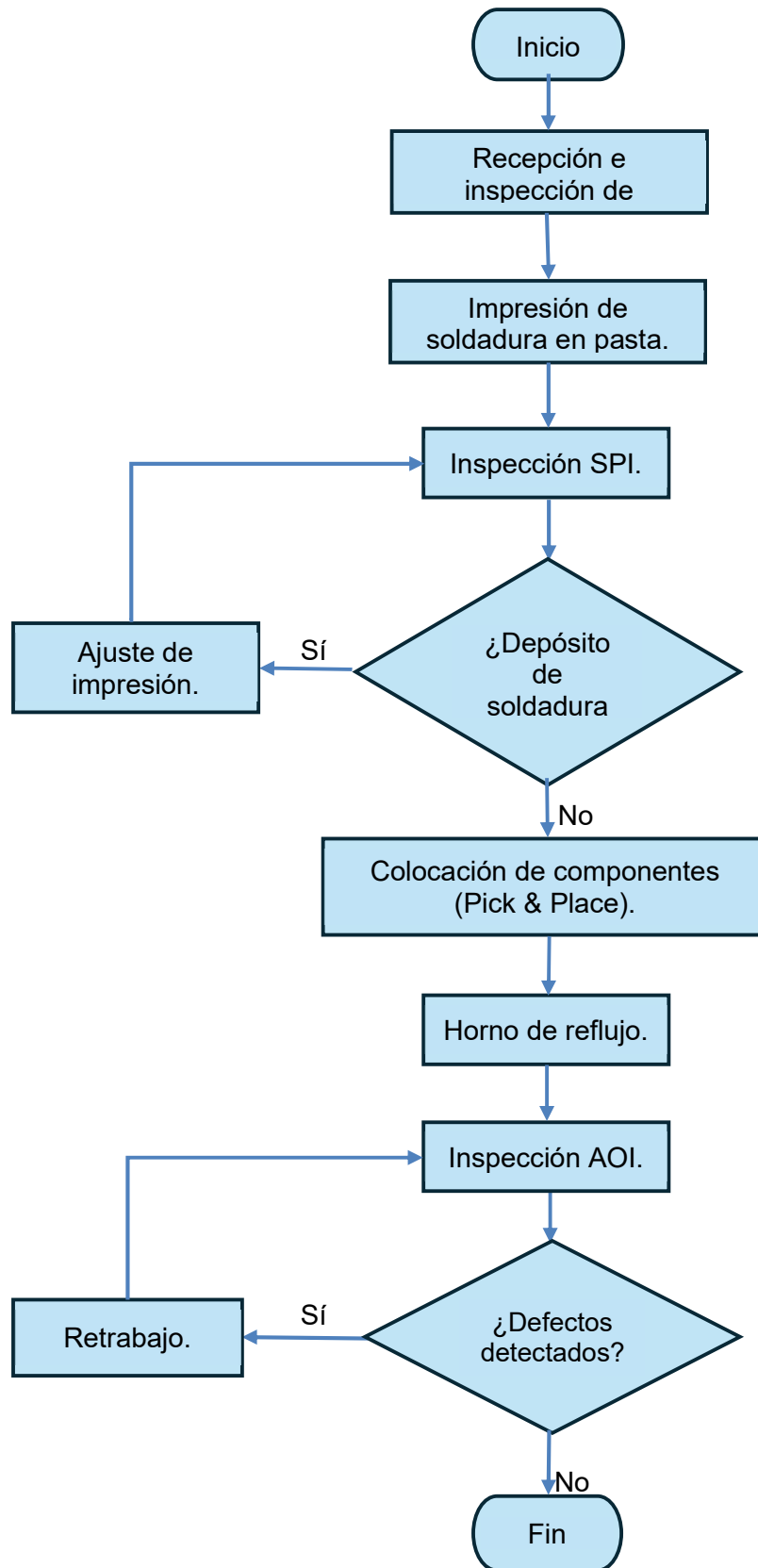


Figura 38. Diagrama de flujo del proceso de ensamble SMT.

El proceso de ensamble SMT inicia con la recepción de materiales que se utilizarán en la producción. Entre estos materiales se encuentran los componentes SMT y las tarjetas PCB, estas últimas ya vienen con el diseño del cliente y con todas las especificaciones requeridas, listas para únicamente ser ensambladas y soldadas.

En cada lote de producción se cuenta con una documentación en la cual se encuentran todo lo que se necesita saber de cada tarjeta, por ejemplo; nombre del producto, modelo, versión, revisión, volumen de producción, tipos de materiales a utilizar, cantidades por material, números de parte, fabricantes autorizados, designadores, especificaciones importantes de la tarjeta, etc.

Con ayuda de esta documentación, el responsable de calidad hace la recepción de los materiales, el objetivo es revisar minuciosamente todos los componentes que se van a utilizar en la producción, esto debido a que todo el material que se surte debe estar autorizado en las hojas de producción.

Una vez que el material es liberado por calidad se inicia el setup que consta de la preparación de maquinaria, equipo, herramientas, material, etc., que se utilizará en la producción del producto.

A continuación, se muestra una imagen en la Figura 39, de la distribución de la línea de ensamble SMT y posteriormente se describe cada etapa.



Figura 39. Línea de ensamble SMT de empresa.

2.2.1. Despachador de tarjetas.

Es la primera estación de la línea, aquí se revisa principalmente que las tarjetas PCB se encuentren en buen estado y sin algún defecto para que puedan ser ensambladas. Una vez aceptadas las tarjetas se colocan en el despachador el cual funciona como almacenaje y es automatizado, éste funciona por medio de ventosas las cuales mediante aire succiona las tarjetas para ser colocadas por los rieles y puedan ser transportadas a la siguiente máquina o estación. El despachador funciona en conjunto con la máquina mostrada en la Figura 41, puesto a que espera su señal para poder realizar el movimiento de mandar la tarjeta almacenada a la siguiente estación.

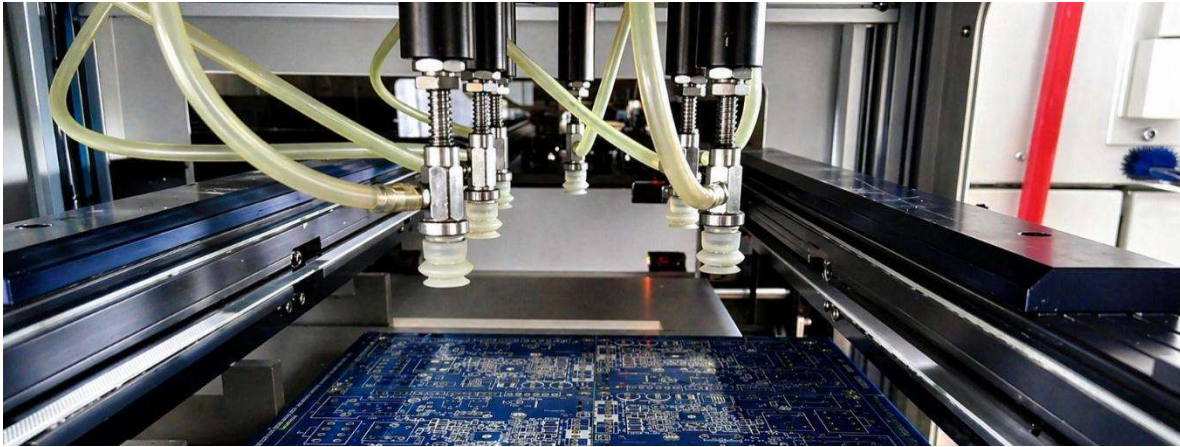


Figura 40. Despachador de tarjetas, funcionando por medio de ventosas.

2.2.2. Impresión de soldadura en pasta.

En esta estación pasan las tarjetas PCB para la impresión de soldadura en pasta, cada modelo que se fabrica tiene sus propios parámetros de impresión, así como también su propio estencil (Figura 41).

Las cuchillas que se utilizan son las de metal puesto a que se obtienen buenos resultados con ellas, debido al material de la que están hechas se tiene cuidado con los parámetros de presión que ejerce en el estencil.

El tipo de estencil que se utiliza es de corte láser por los beneficios que se obtienen con él, ya que deja una impresión de pasta más sólida y compacta.

La pasta que se utiliza es del tipo 4, es no clean y está libre de plomo. Esta se mantiene en refrigeración mientras no se está utilizando.

El depósito de la soldadura en pasta en la PCB es controlado por los parámetros establecidos en la impresión. Cada proyecto o tarjeta posee sus propios parámetros, dependiendo de los tipos de componentes que lleve y las especificaciones del pcb.

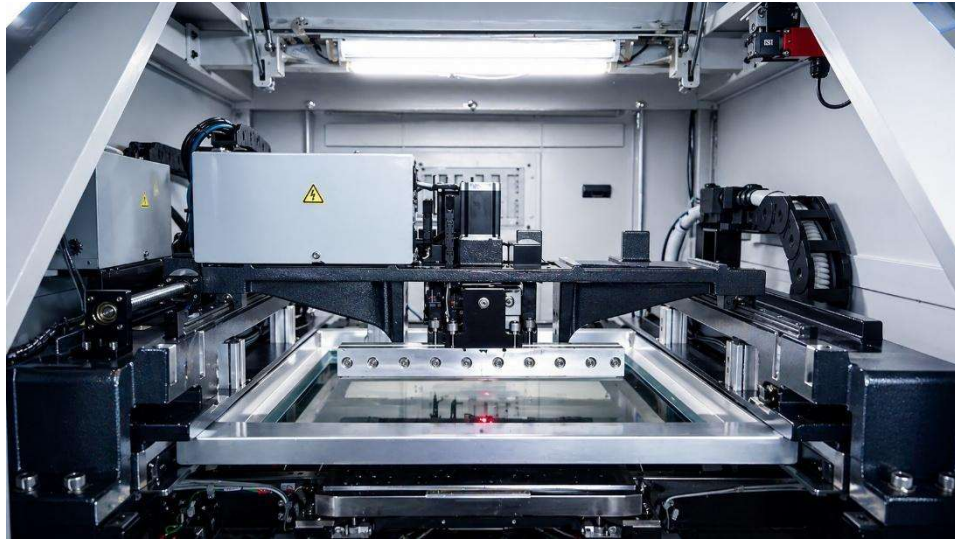


Figura 41. Interior de máquina de impresión de pasta.

2.2.3. Inspección de soldadura en pasta (SPI).

En la empresa donde se ha realizado el estudio se utiliza máquinas de inspección 3D esto es por su alta confiabilidad en sus análisis e inspecciones, haciendo que las lecturas sean más intuitivas y entendibles para los operadores.

Una vez que se ha realizado la impresión de pasta en la tarjeta se realiza la inspección de ésta, es necesario verificar que el volumen, la alineación y la altura sean correctas, si este es el caso la producción puede iniciar normal.

Por otra parte, si en la primera inspección se detecten errores o defectos de pasta, el proceso de impresión debe ser detenido y se deben analizar las posibles causas de los errores para ser corregidos en el momento, esto se debe realizar hasta que la tarjeta no contenga errores de pasta para poder iniciar con la producción. La Figura 42 muestra una fotografía de una máquina SPI en línea de ensamble.



Figura 42. Máquina SPI en línea de ensamble SMT.

2.2.4. Colocación de componentes (Pick & Place).

Antes de iniciar la producción, es necesario haber realizado previamente el setup de las máquinas de ensamble de componentes. Existen muchos tipos de máquinas ensambladoras (Pick & Place), pero la mayoría posee la misma interfaz de trabajo. Así como las demás máquinas, en éstas se tiene un programa especial para cada producto o modelo, se debe seleccionar el que se vaya a utilizar en cada producción, una vez seleccionado se asegura de que todos los componentes a utilizar para cada modelo están montados en las máquinas, esto se realiza con ayuda de toda la documentación que se entrega para la fabricación de cada producto.

Cuando se tienen listos todos los componentes montados en los feeders o alimentadores, ahora se deben verificar posiciones y números de parte, todo programa en máquina debe de coincidir siempre con la documentación, ya que

cualquier error puede afectar toda la producción. Cuando ya se encuentre todo en su lugar se puede iniciar la producción.

Siempre se realizan 3 tarjetas de liberación en cada inicio de producción, estas se realizan para la validación de todos los componentes y para descartar posibles errores. Cuando estas tarjetas son aprobadas se puede iniciar con la producción normal del producto a realizar.

También siempre se realiza una inspección previa cuando la tarjeta ya esté en posición dentro de la máquina, en esta inspección se revisa que todas las posiciones sean correctas para cada componente que va a colocar la máquina, de igual forma se realiza una inspección después de que se realizó el montaje de los componentes para asegurarse de que no hubo ningún error durante la colocación, cuando estas pruebas son favorables se puede continuar a la siguiente estación. En la figura 43 se muestra el interior de una máquina pick & place.

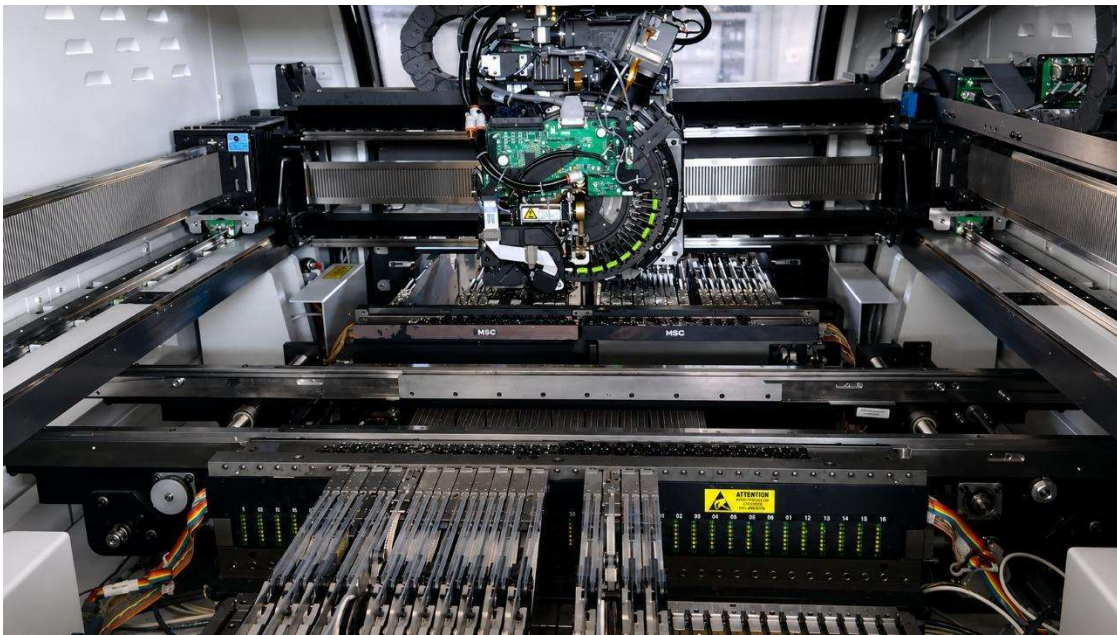


Figura 43. Vista del interior de la máquina SMT.

2.2.5. Horno de reflujo.

En esta estación los componentes que fueron montados previamente son soldados a la tarjeta mediante reflujo de temperatura. En la empresa analizada se utiliza un

horno de reflujo de 9 zonas mostrado en la Figura 44, el cual trabaja con perfiles de reflujo, éstos se deben realizar con un previo análisis de cada producto, ya que el horno trabaja a altas temperaturas que en ocasiones puede afectar a los componentes montados en las tarjetas pcb si no se realizan correctamente; para realizar dichos perfiles de reflujo es necesario consultar los datasheet de todos los componentes que serán colocados en la tarjeta pcb y concentrarse en los componentes más críticos, ya que cada uno posee una tolerancia de temperatura, por esto se requiere analizar que componentes soporta la máxima y mínima temperatura puesta a que de estos depende como se realizara el perfil de reflujo. Cada proyecto o producto tiene su propio perfil de reflujo. Cuando se inicia producción hay que elegir el programa en la máquina correspondiente para cada proyecto.



Figura 44. Horno de reflujo.

2.2.6. Inspección Óptica Automatizada (AOI).

Después de que las tarjetas salen del horno con los componentes ya soldados es necesario que sean inspeccionadas en la máquina de inspección óptica automatizada (AOI), mostrada en la figura 45. En esta se observa que la soldadura sea la ideal, que los componentes estén bien colocados, que no se halla colocado un componente erróneo, desplazado, levantado, de cabeza o con polaridad invertida, que ningún componente lleve cortos, insuficiencias o excesos de soldadura.

Esta estación es crucial ya que es la parte final del ensamble, y es aquí donde se separan las tarjetas que tienen que ser reprocesadas o reparadas.

Al finalizar los lotes de producción se crean los reportes de todas las fallas que se tuvieron en el ensamble, se tiene un porcentaje de error permitido en cada lote.



Figura 45. Máquina de Inspección Óptica Automatizada (AOI).

2.3. Defectos y posibles causas que se tienen hasta el momento en el proceso de ensamble SMT

Durante el análisis del proceso de producción en la línea de ensamble de SMT se detectaron varios defectos que al finalizar cada lote de producción se ve afectada la calidad y la confiabilidad de los circuitos ensamblados. En el estudio realizado se llega al punto de que estos defectos son aleatorios debido a las variaciones que se tienen en los parámetros críticos de operación, además de que se presentan en diferentes puntos del proceso.

2.3.1. Clasificación de defectos detectados y sus posibles causas.

Se realizó una recolección de datos en producción para saber cuáles son los defectos más repetitivos, para esto se tomaron los datos de la máquina AOI y se identificaron los siguientes:

1.- Efecto lápida (Tombstoning): Este defecto se trata del levantamiento de una de las terminales del componente, comúnmente ocurre en encapsulados 0402 mostrado en la Figura 46.

Este defecto puede tener diferentes causas:

- Mala impresión de pasta. Esto debido a que en uno de los 2 pads del componente se esté colocando más pasta que en el otro, haciendo que en el horno de reflujo la soldadura fluya más del lado que contenga más pasta ocasionando el levantamiento del componente.
- Mala colocación del componente en las máquinas montadoras. Por mala programación de coordenadas o por fuerza de colocación fuera de rango.
- Perfil de reflujo inadecuado. Temperatura de pico baja o soldadura fría.



Figura 46. Imagen tomada de microscopio (defecto Tombstoning en un circuito).

2.- Puentes de soldadura (Solder Bridges): Es la unión de 2 o más pads del componente mediante soldadura, ocasionando un corto circuito, como se observa en la Figura 47.

Posibles causas:

- Mala impresión de pasta. Exceso de pasta por desgaste o mala limpieza de estencil.
- Presión inadecuada de las navajas o squeegee de la máquina de impresión de pasta.
- Desalineación del estencil respecto a la tarjeta pcb.

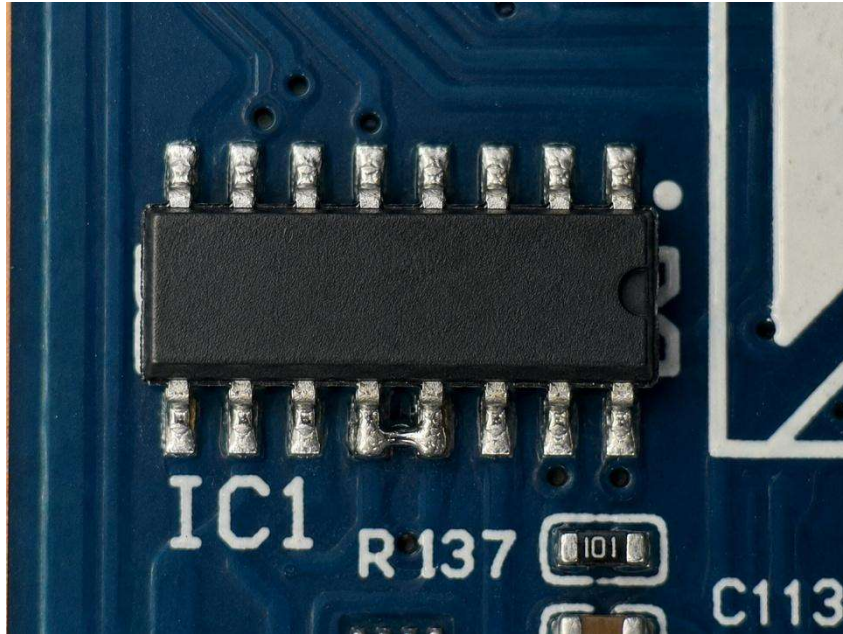


Figura 47. Componente con defecto (corto entre terminales).

3.- Soldadura insuficiente: Poca cantidad de soldadura en los pds del pcb, ocasionando mal conexión entre pad y la terminal del componente provocando mal funcionamiento del circuito por falso contacto mostrado en la Figura 48.

Posibles causas:

- Mala impresión de pasta. Por obstrucción en las aberturas del esténcil o mala limpieza.
- Presión inadecuada de las navajas o squeegee de la máquina de impresión de pasta.
- Variación en la viscosidad de la soldadura en pasta. Malas condiciones ambientales. Temperatura del ambiente y humedad inadecuada que pueda afectar la soldadura en pasta.

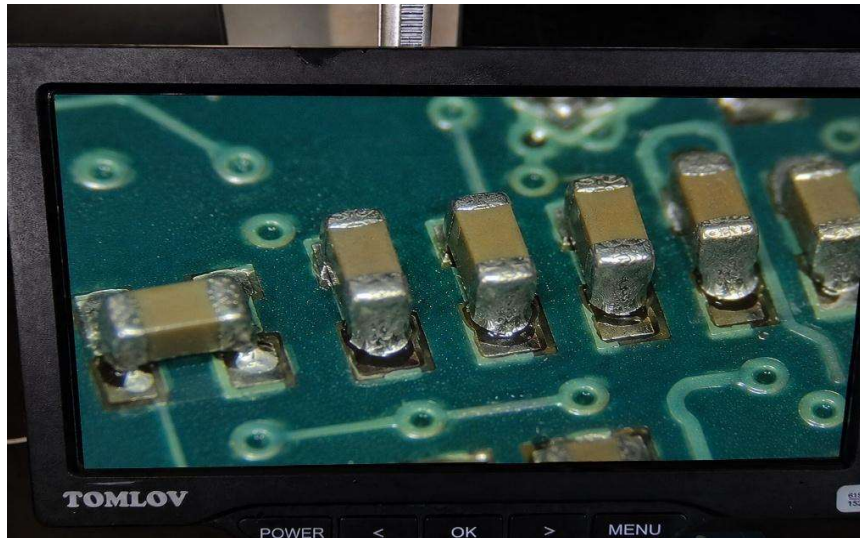


Figura 48. Imagen vista desde microscopio (defecto insuficiencia de soldadura).

4.- Desalineación de componentes y faltantes de componentes: Mala colocación del componente respecto a los pads de la tarjeta PCB (Figura 49).

- Error en el ensamble. Debido a mala programación de las coordenadas del pcb.
- Problemas con los feeders. Mala calibración de los alimentadores en los cuales se colocan los rollos de los componentes.

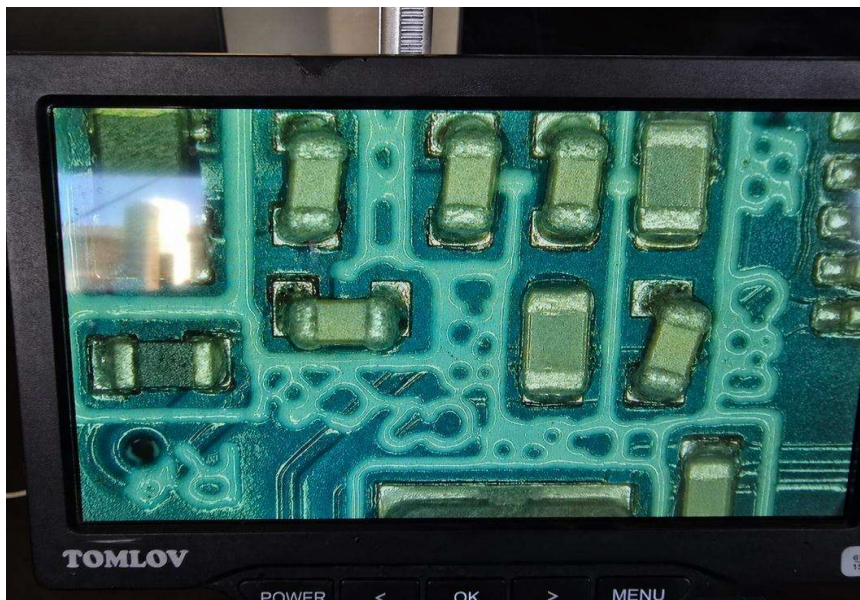


Figura 49. Imagen tomada de microscopio (defecto desalineación de componente).

2.4. Parámetros críticos de operación

Dentro del proceso de ensamble de tecnología de montaje superficial (SMT), existen un conjunto de parámetros críticos que influyen principalmente en la calidad del producto final, su funcionamiento, la correcta colocación de los componentes y la buena unión de la soldadura en los pads del PCB. Para poder garantizar la confiabilidad del producto terminado y disminuir la generación de defectos durante la producción es necesario el control adecuado de todos estos parámetros críticos. Después del análisis de la línea de producción en la empresa se detectaron los siguientes parámetros críticos por área.

2.4.1. Parámetros en la impresión de soldadura en pasta.

La etapa de impresión de pasta es una de las más críticas ya que es el punto de partida para la línea de producción SMT. Los parámetros identificados son los siguientes:

- Esténcil. El buen diseño del esténcil adecuado para cada tarjeta PCB es de gran importancia para asegurar una buena impresión, en este punto influye mucho el espesor con que es fabricado, pues depende el volumen de pasta depositada.
- Presión de las squeegee. Esto directamente afecta la transferencia de pasta al PCB ya que una presión excesiva de las navajas puede depositar pasta sobrada, por otro lado, poca presión puede generar insuficiencia.
- Velocidad de impresión. Influye en la uniformidad del depósito, ya que a grandes velocidades pueden generar discontinuidad en la impresión y provocar excesos de soldadura.
- Alineación esténcil y PCB. La alineación del esténcil debe ser la ideal respecto al pcb puesto que una mala alineación podría generar pasta

desplazada ocasionando que no fluyan correctamente en las terminales del componente junto con el pad del PCB.

- Condiciones de la soldadura en pasta. El manejo de la pasta puede parecer insignificante en este punto, pero la realidad es que se debe tener el cuidado estrictamente especial de esta para una buena impresión. La soldadura debe estar refrigerada todo el tiempo que no se utilice y durante la producción debe mantenerse a una temperatura ambiente.

En la Figura 50 se muestra la ventana del software para la máquina de impresión de pasta indicando los datos de configuración para soldadura en pasta.

The screenshot shows a software window titled 'Datos de Configuración' (Configuration Data) with several tabs: 'Datos de Configuración', 'Configuración de la Tarjeta', 'Herramental', 'Visión', 'Separación', and 'Cabeza de Limpieza'. The 'Datos de Configuración' tab is active, displaying two main sections: 'Propiedades Comunes' (Common Properties) and 'Parametros del Batido' (Mixing Parameters).

Propiedades Comunes:

- Prog. Barrido:** A button to program the wiping process.
- Barrido (+):** 4.8921 mm
- Barrido (-):** -228.1052 mm
- Cant.de Barridos:** 1
- Print Strokes after Wipe:** 1
- Navaja (Blade):**
 - Force:** 10.6673 kgs
 - Base Speed:** 29.0000 mm /seg
 - Separación de la Navaja:** -2.0000 mm
 - Retardo subida posterior Imp:** 0 ms
 - Altura posterior a la Imp.:** 12.5000 mm
 - Cantidad del salto de la navaja:** 0.0000 mm
 - Recorrido tipo:** Normal (dropdown menu)
 - Embarre:** 0.0000 mm
 - Velocidad:** 25.0000 mm /seg

Parametros del Batido:

- Habilitar en 1er. Tarjeta:** ☒ Usar Batido de Recuperación, ☐ Usar Batido para Rechazo
- Habilitar Batido de recuperación:** ☐
 - T. de Espera:** 5 mins
 - Cant. Barridos:** 2
 - Velocidad:** 25.0000 mm /seg
 - ☒ Usar cronometro de Batido
 - Tiempo:** 10 segs
- Habilitar Batido para rechazo:** ☐
 - T. de Espera:** 20 min
 - Cant. Barridos:** 2
 - Velocidad:** 25.0000 mm /seg
 - ☐ Alinear Tarjeta
 - ☒ Usar Cronometro de Batido
 - Tiempo:** 10 segs

Footer:

Tipo de Alarma	Severidad	Estado	Fecha	Detalles
Alerta de materiales	Precaución	Disparado	Apr 29 2026 07:2...	El solvente del limpiador esta bajo.

Administrador Unidades: Metrico Automático

Figura 50. Parámetros de impresión de soldadura en pasta.

2.4.2. Parámetros de la colocación de componentes.

En esta etapa se realiza la colocación precisa de los componentes electrónicos sobre el PCB, por lo que los parámetros deben garantizar alta exactitud y repetibilidad.

-
- Precisión de posicionamiento (X, Y, θ). Determina la ubicación exacta donde debe poner el componente la máquina.
 - Fuerza de colocación. Una fuerza insuficiente puede generar mala adhesión previa al reflow en el horno.
 - Velocidad de colocación. Influye en la estabilidad del componente durante su posicionamiento.
 - Condición de los feeders (alimentadores). Problemas en la alimentación de componentes pueden generar errores de pick-up o componentes faltantes.

2.4.3. Parámetros en el proceso de soldadura por reflow

El proceso térmico es determinante para la formación de uniones de soldadura confiables, ya que activa la fusión de la pasta y la formación de enlaces metalúrgicos, en la Figura 51 se muestra la ventana de los parámetros en horno de reflujo para una tarjeta.

- Perfil térmico del horno. Compuesto por las etapas de precalentado, remojo, reflow y enfriamiento. Este perfil es único para cada proyecto por lo que se debe realizar basándose en las especificaciones de los componentes que están en la tarjeta.
- Temperatura pico. Debe ser suficiente para fundir la aleación de soldadura sin dañar los componentes.
- Velocidad de transporte del horno. Controlando el tiempo total en que tarda una tarjeta en recorrer todas las zonas del horno.

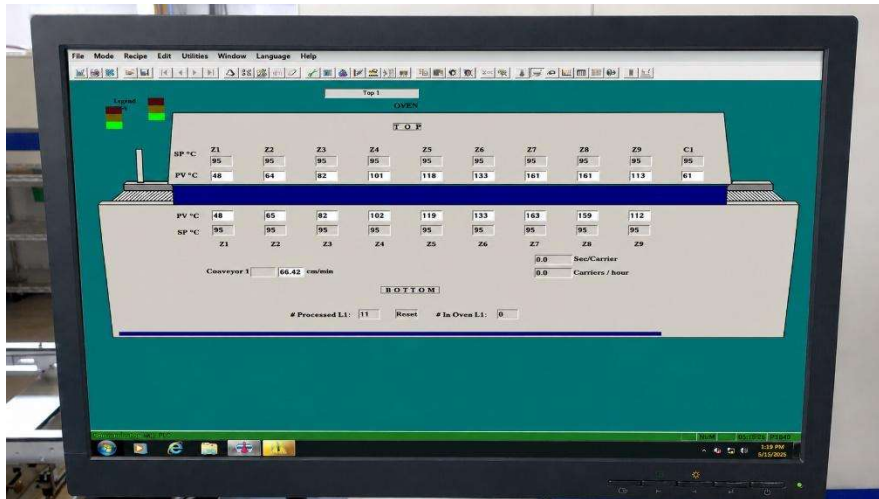


Figura 51. Parámetros en horno de reflujo para una tarjeta.

2.4.4. Parámetros en inspección y control de calidad.

Las etapas de inspección permiten verificar la calidad del ensamble y detectar defectos oportunamente (Figura 52).

Los parámetros críticos incluyen:

- Configuración del sistema AOI. Se deben realizar algoritmos necesarios para la inspección final de las tarjetas ensambladas.
- Basados en normas como IPC-A-610. Estas normas son fundamentales para los criterios que se deben de manejar para la buena calidad del producto terminado.

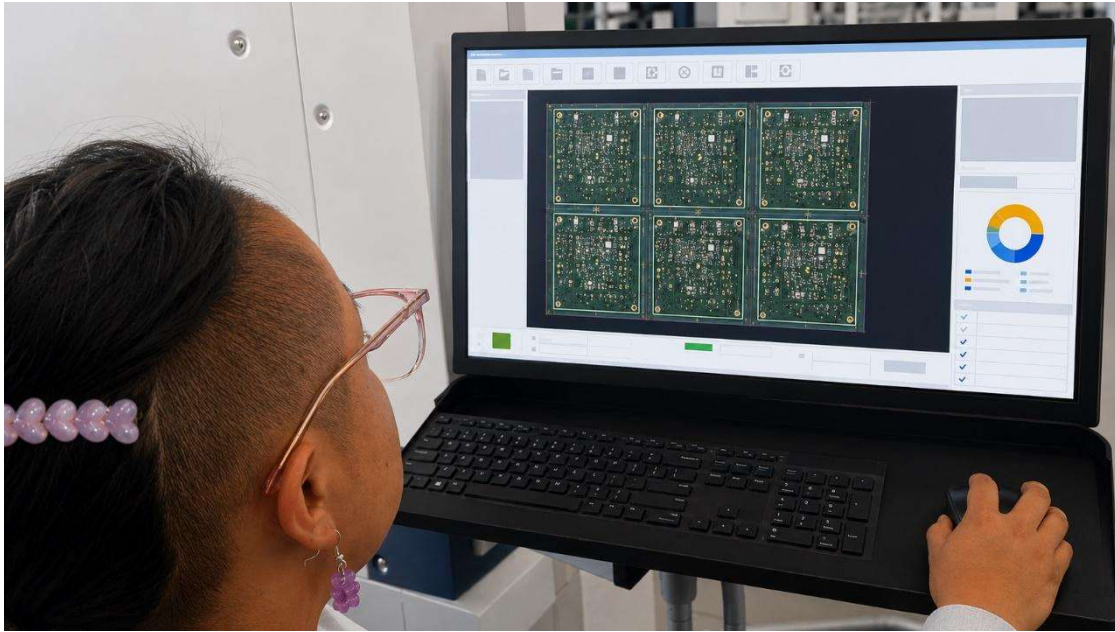


Figura 52. Interfaz de AOI.

2.5. Propuesta e implementación de soluciones en el proceso de ensamble SMT.

Para tener un panorama general sobre las propuestas e implementaciones de soluciones se recurrió a la herramienta A3 ya que nos ayuda a identificar problemas y causas raíz, de igual forma es una metodología que ayuda a establecer acciones correctivas Mostrada en la figura 53.

TITULO: Optimización del proceso de ensamble electrónico automatizado en una línea SMT, análisis de eficiencia y reducción de tiempos.	
1. ANTECEDENTES : Previamente se realizó un análisis complejo sobre la línea de producción de ensamble SMT en una empresa que se dedica a la fabricación de controles de temperatura, debido al aumento considerable de incidencias por defectos de ensamble en producto final. Estos defectos llegan al área de calidad quien ahora requiere de soluciones y mejoras continuas para la reducción de incidencias. El proceso SMT presenta defectos recurrentes como puentes de soldadura, soldadura insuficiente, tombstoning y desalineación de componentes, generando retrabajos y pérdida de productividad que tiene mucho valor económico.	5. MEJORA PROPUESTA : • Optimización de impresión de soldadura en pasta • Optimización de colocación automática de componentes • Optimización de perfil térmico de reflow
2. SITUACIÓN ACTUAL : De acuerdo a lo observado existe variabilidad en impresión de pasta, calibración de Pick and Place y perfil térmico del horno de reflow. Se observan incrementos en defectos detectados por AOI. Debido a lo anterior se tiene entendido que la mayoría de los defectos presentes en los ensambles electrónicos están relacionados con variaciones en parámetros críticos de operación, principalmente en las etapas de impresión de pasta de soldadura, colocación automática de componentes y soldadura por reflow.	6. PLAN (BENEFICIOS ESPERADOS Y RECURSOS): Aumento de calidad del producto. Reducción de costos por retrabajo y scrap. Mayor confiabilidad de los circuitos electrónicos. Incremento de productividad de la línea SMT, optimizando los procesos. Fortalecimiento del control automatizado del proceso.
3. METAS Y OBJETIVOS (Y) : Reducir la tasa de defectos SMT mediante la optimización y control de parámetros críticos del proceso automatizado.	7. SEGUIMIENTO (CONTROL) : Se propone implementar monitoreo continuo mediante: Indicadores KPI SPC (Control Estadístico del Proceso) Auditorías de parámetros SMT Validación periódica de perfil térmico Inspección AOI y SPI
4. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (x) : Máquina: descalibración y desgaste. Método: parámetros no estandarizados. Material: variación en pasta de soldadura. Mano de obra: setup incorrecto. Medio ambiente: humedad y temperatura. Medición: AOI mal configurado.	

Figura 53. Reporte de apoyo para identificación de problemas proporcionada por la herramienta A3.

Con base al análisis realizado en la empresa en la línea de producción SMT se identificó que la mayoría de los defectos detectados presentes en los ensambles electrónicos derivan a la variación de parámetros críticos de operación siendo las principales la impresión de soldadura, el horno de reflujo y la colocación automática de componentes. Se realizó un diagrama de Ishikawa para visualizar estos defectos mostrado en la Figura 54.

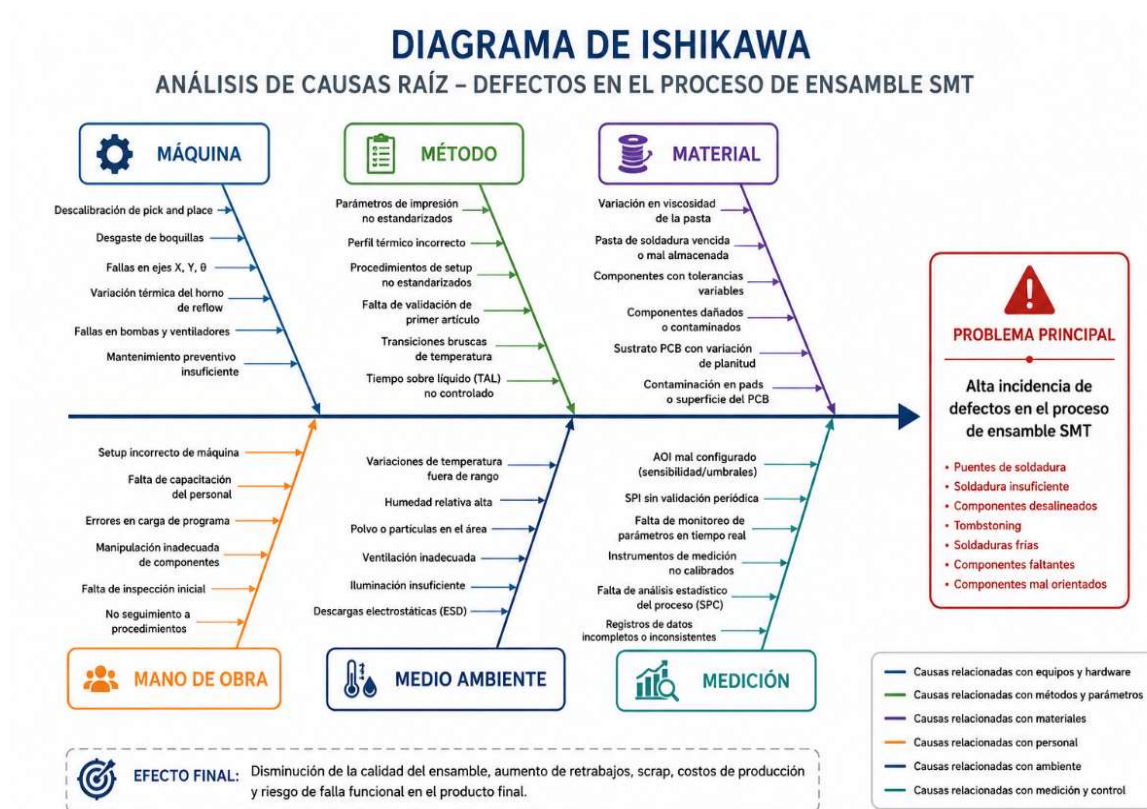


Figura 54. Diagrama de Ishikawa enfocado a los defectos en el proceso de ensamble SMT.

Por lo anterior se puso en práctica una propuesta de optimización orientada al control de procesos automatizados cuyo objetivo principal es reducir las incidencias por defectos en ensamble final evitando scrap, pérdidas económicas, mejorar la estabilidad del proceso y aumentar la confiabilidad de los ensambles electrónicos. Para llegar a estos objetivos se recurrieron a herramientas de monitoreo,

estandarización y análisis de procesos, así como también de información documentada.

Las estrategias generales se dividieron en 4 que fueron las siguientes:

1. Optimización de impresión de pasta de soldadura
2. Optimización de colocación automática de componentes
3. Optimización del perfil de reflujo

A continuación, se mostrará cada estrategia desglosada con sus planes de acción.

2.5.1. Optimización de impresión de soldadura en pasta.

Se propone un control estandarizado de los parámetros de impresión para cada tarjeta o proyecto mediante la realización de ajustes de máquinas, realizando pruebas en conjunto. Para esto se necesita:

- Verificación constante del alineamiento del estencil con el PCB.
- Estandarización de la presión y velocidad del squeegee.
- Control de temperatura y humedad del área de SMT.
- Manejo correcto de la soldadura en pasta.

Todo esto se necesita validar con ayuda del SPI que será la máquina que indique que todo va saliendo bien con la impresión de pasta.

2.5.1.1. Estandarización de parámetros.

Se verificó en los datos de programación de la máquina empastadora cuales son los parámetros que se están tomando en cuenta para la impresión de pasta en las tarjetas pcb en la Figura 55 se muestra los parámetros generales que se encontraron. Y en la figura 56 los parámetros específicos de las coordenadas de la impresión de pasta.

Datos de Configuración	Configuración de la Tarjeta	Herramental	Visión	Separación	Cabeza de Limpieza
Propiedades Comunes Prog. Barrido Barrido (+): 4.8921 mm Barrido (-): -228.1052 mm Cant. de Barridos: 1 Print Strokes after Wipe: 1					
Navaja Force: 10.6673 kgs Base Speed: 29.0000 mm /seg Separación de la Navaja: -2.0000 mm Retardo subida posterior Imp: 0 ms Altura posterior a la Imp.: 12.5000 mm Cantidad del salto de la navaja: 0.0000 mm Recorrido tipo: Normal Embarre: 0.0000 mm Velocidad: 25.0000 mm /seg					
Parametros del Batido ☐ Habilitar en 1er. Tarjeta ☒ Usar Batido de Recuperación ☐ Usar Batido para Rechazo ☐ Habilitar Batido de recuperación T. de Espera: 5 mins Cant. Barridos: 2 Velocidad: 25.0000 mm /seg ☒ Usar cronometro de Batido Tiempo: 10 segs ☐ Habilitar Batido para rechazo T. de Espera: 20 min Cant. Barridos: 2 Velocidad: 25.0000 mm /seg ☐ Alinear Tarjeta ☐ Usar Cronometro de Batido Tiempo: 10 segs					
Tipo de Alarma: Alerta de materiales Severidad: Precaución Estado: Disparado Fecha: Apr 29 2026 07:2... Detalles: El solvente del limpiador esta bajo Administrador Unidades: Metrico Automatico					

Figura 55. Parámetros de impresión de pasta que presentan defectos.

Herramental	Visión	Separación	Cabeza de Impresión	Limpieza	Dispensador	Inspección	Offsets
Offsets de Impresión Frente a Atrás Atrás al Frente Offset de X: 0.0000 Offset de Y: 0.0000 Offset de Theta: 0.0000 0.0000 mm 0.0000 mm 0.0000 grados							
Ubicación de los Offsets de Impresión Estado: No se definieron las posiciones Clear Prog. Posiciones Ajuste manual Ajuste Automático							
Offsets de Impresión Automáticos ☒ Deshabilitado ☐ Offsets Internos Frente a Atrás Atrás al Frente Offset de X: 0.0000 Offset de Y: 0.0000 Offset de Theta: 0.0000 0.0000 mm 0.0000 mm 0.0000 grado Aplicar Limpiar							
☐ Ajuste Automático durante la producción Sensibilidad: Medio Modo de Alarma: Error Deslizamiento Límite: 0.3810 mm ☐ Enseñar pasta antes del Ajuste Automático Minimum Pad Coverage: 70 % Frecuencia: 10 Aplicar a: ☐ Batido Previo ☒ Ambos							
Aceptar Cancelar							
Tipo de Alarma: Alerta de materiales Severidad: Precaución Estado: Disparado Fecha: May 15 2026 07:23:15 Detalles: El solvente del limpiador esta bajo							

Figura 56. Parámetros de coordenadas de impresión.

Se encontraron inconsistencias con estos parámetros ya que al utilizarlos en la impresión de pasta los resultados eran aleatorios en el SPI 3 de cada 5 tarjetas presentaba por lo menos 1 error ya sea de desplazamiento de soldadura mostrado en la Figura 59, errores de puentes de soldadura o insuficiencia este último mostrado en la Figura 58. Estos errores se encuentran resumidos en la gráfica de la Figura 57.



Figura 57. Gráfica de tarjetas con falla de 25 tarjetas estudiadas.

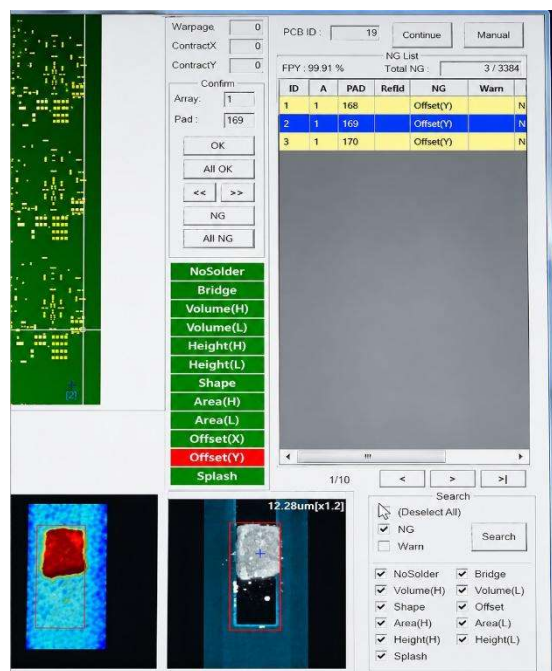


Figura 58. Insuficiencia de soldadura detectada en SPI.

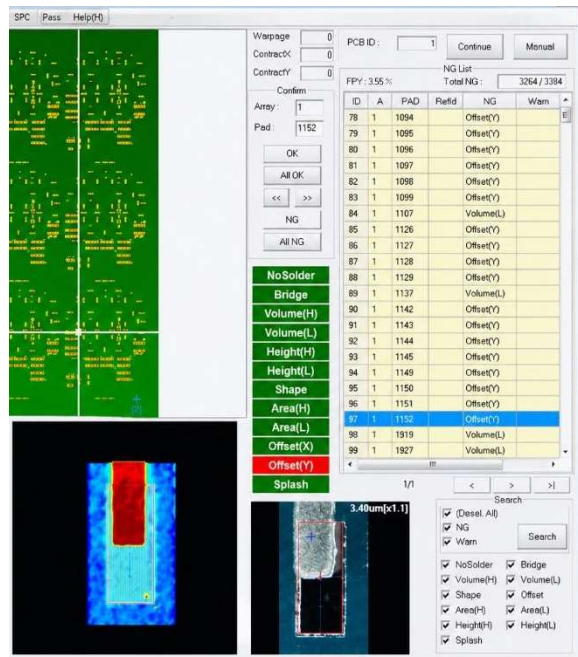


Figura 59. Desplazamiento de soldadura detectada en SPI.

Para corregir estos errores se realizaron pruebas ajustando y estandarizando estos parámetros de impresión, principalmente se movieron las coordenadas de impresión, el forcé de las navajas y la velocidad de impresión para saber con más precisión como alterar estos parámetros se necesitó información del espesor del estencil, el material con el que estaba hecho, la información del espesor de la tarjeta pcb, las medidas exactas y coordenadas de las marcas o fiduciales de la tarjeta. Con toda esta información se llegaron a los parámetros mostrados en la Figura 60 y Figura 61.

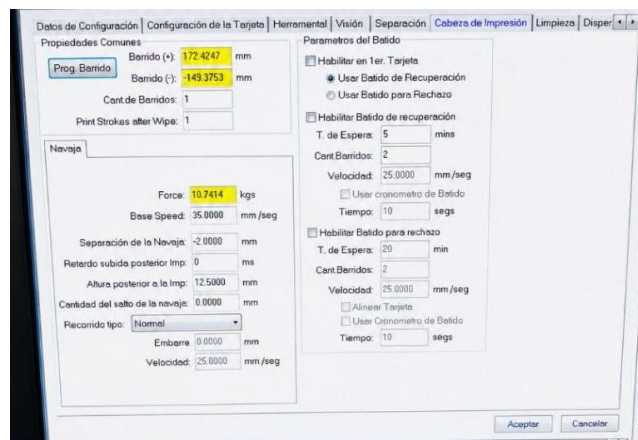


Figura 60. Nuevos parámetros de impresión de pasta para pruebas.

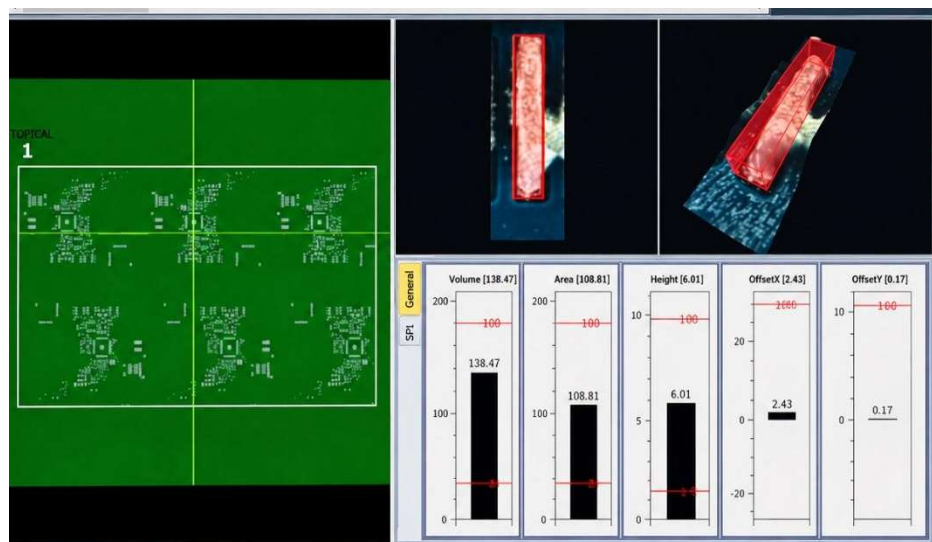


Figura 63. Defecto puente de soldadura detectado en SPI (bridge).

2.5.1.2. Climatizador de pasta.

Con base al análisis de las posibles causas de el ultimo defecto mencionado se llegó a la conclusión de que probablemente eran problemas en la soldadura ya sea por mal manejo o por la temperatura y humedad del ambiente inestable.

A pesar de que en el área de trabajo hay aire acondicionado no se tenía el dato de la temperatura real dentro de la máquina donde se hacia la impresión de la pasta, por consiguiente, se colocaron termómetros digitales en diferentes puntos de la línea, así como también uno dentro de la máquina como se muestra en la Figura 64, con esto se pudo monitorear la temperatura real y se notó que teníamos temperaturas fuera de los rangos ya que para conseguir una buena impresión de pasta esta debe estar en una rango de temperatura de $\pm 23^{\circ}\text{C}$. Cuando no se está trabajando con estas temperaturas y esta se eleva se tiene como consecuencia un cambio en la viscosidad de la pasta haciendo que se vuelva más liquida causando así los puentes de soldadura en la impresión, caso contrario pasa cuando la temperatura es demasiada fría para la pasta y empieza a dejar insuficiencia en los pads de la tarjeta.

Por esta razón se implementó la realización de un climatizador de pasta sencillo, el cual se muestra en la Figura 65.

2.5.1.3. Funcionamiento.

El climatizador adaptado a la máquina empastadora MPM funciona mediante un sistema de control térmico compuesto principalmente por un compresor de refrigeración y una unidad de resistencia eléctrica. Ambos elementos trabajan de manera conjunta para mantener la pasta SMT dentro de un rango de temperatura estable durante el proceso de impresión.

Este sistema opera bajo un principio similar al de un aire acondicionado industrial, donde el aire puede ser enfriado o estabilizado dependiendo de las condiciones internas de la máquina y del ambiente de producción.

El sistema funciona mediante un proceso de enfriamiento basado en un compresor, el cual se encarga de generar y suministrar aire frío de manera controlada hacia la empastadora. El funcionamiento inicia en la etapa de compresión, donde el compresor incrementa la presión y temperatura del gas refrigerante. Posteriormente, el refrigerante caliente circula hacia el condensador, en el cual libera el calor acumulado al ambiente exterior y cambia de estado gaseoso a líquido. Después, el refrigerante pasa por una válvula de expansión que reduce considerablemente su presión y temperatura, permitiendo obtener un fluido frío. En la siguiente etapa, conocida como evaporación, el refrigerante circula a través del evaporador absorbiendo el calor del aire circundante. Como resultado de este proceso, el aire caliente del interior es enfriado y convertido en aire frío controlado. Finalmente, mediante ventiladores y ductos flexibles, el aire frío es impulsado hacia la máquina empastadora para mantener condiciones térmicas adecuadas durante el proceso.

Además del sistema de enfriamiento, el climatizador incorpora una unidad de resistencia eléctrica cuya función principal es regular y estabilizar la temperatura del aire suministrado hacia la empastadora. Esta resistencia actúa como un elemento calefactor controlado automáticamente mediante sensores térmicos, permitiendo mantener condiciones de operación adecuadas durante el proceso. Aunque el objetivo principal del sistema es generar aire frío, existen situaciones en las que la temperatura puede disminuir excesivamente, provocando un incremento de

humedad, formación de condensación o incluso pérdida de fluidez en la pasta de soldadura. Para evitar estas condiciones, la resistencia eléctrica permite realizar ajustes finos de temperatura, mantener un flujo térmico estable y asegurar una temperatura constante dentro del sistema.

El funcionamiento del climatizador se realiza de manera automática mediante un control térmico integrado. Cuando la temperatura interna aumenta, el compresor se activa para generar aire frío, el cual es impulsado hacia la máquina mediante ventiladores y ductos de distribución. Por otro lado, cuando la temperatura desciende más de lo requerido, la unidad de resistencia entra en funcionamiento para templar ligeramente el aire y evitar un sobre enfriamiento del sistema. Gracias a esta operación combinada entre enfriamiento y calentamiento controlado, se logra mantener un ambiente térmico estable y adecuado para conservar las propiedades óptimas de la pasta durante el proceso de impresión SMT. El climatizador unido a la máquina se muestra en la Figura 66.

2.5.1.4. Objetivo.

El propósito principal del climatizador es mantener la pasta de soldadura en condiciones térmicas controladas para evitar:

- Cambios de viscosidad.
- Secado prematuro.
- Mala impresión sobre el PCB.
- Variaciones en el depósito de pasta.
- Incremento de defectos SMT.

2.5.1.5. Componentes principales.

El climatizador está compuesto por:

- Compresor de refrigeración.
- Condensador.
- Evaporador.

-
- Ventiladores.
 - Unidad de resistencia eléctrica.
 - Sensores de temperatura.
 - Controlador térmico.
 - Ductos flexibles de distribución de aire.

2.5.1.6. Beneficios obtenidos.

El sistema de climatización proporciona múltiples beneficios tanto en el control térmico como en la estabilidad del proceso SMT. Desde el punto de vista térmico, permite mantener una temperatura estable dentro del área de trabajo, reduciendo el calentamiento interno de la máquina y asegurando un control térmico continuo durante toda la operación. Estas condiciones ayudan a evitar fluctuaciones de temperatura que puedan afectar el comportamiento de la pasta de soldadura y el desempeño general del proceso.

En relación con la pasta de soldadura, el sistema contribuye a conservar adecuadamente su viscosidad, disminuyendo el secado prematuro ocasionado por el exceso de temperatura o la exposición prolongada al ambiente. Como resultado, se obtiene una mejor calidad de impresión SMT y una mayor estabilidad en el proceso de aplicación de pasta sobre la PCB, favoreciendo una deposición uniforme y consistente.

Asimismo, el control térmico implementado aporta beneficios importantes en la calidad del ensamble electrónico, ya que ayuda a reducir defectos como puentes de soldadura, insuficiencia de pasta y variaciones entre impresiones consecutivas. Esto permite incrementar la confiabilidad del proceso y mejorar la calidad final de las tarjetas electrónicas ensambladas.



Figura 64. Termómetro digital colocado en máquina empastadora para monitoreo de temperatura.



Figura 65. Climatizador de pasta.



Figura 66. Climatizador de pasta conectada a máquina empastadora.

2.5.2. Optimización de colocación automática de componentes.

Se propone la calibración periódica de las máquinas montadoras, así como también la optimización de los programas de cada tarjeta o proyecto. Para esto es necesario:

- Calibración de los ejes X, Y y θ
- Verificación del estado mecánico y neumático de boquillas.
- Optimización de velocidad y fuerza de colocación.

Se revisaron todas las máquinas montadoras en conjunto con el personal de mantenimiento para descartar cualquier anomalía (Figura 67).

Se realizaron las calibraciones correspondientes de cada máquina utilizada, también un programa de mantenimientos para tener programados las de todas las máquinas, estos se llevarán a cabo cada 6 meses para asegurar que las máquinas trabajen en buen estado y sin inconvenientes.



Figura 67. Personal de mantenimiento realizando revisión de máquina.

De igual forma se revisaron las boquillas de las máquinas (Figura 68) para ver si no tenían algún desgaste en la punta y se cambiaron las que estuvieran presentando algún defecto, aunque fuera por muy mínimo. Se programo una próxima revisión para estar monitoreando alguna otra falla causada por las boquillas.

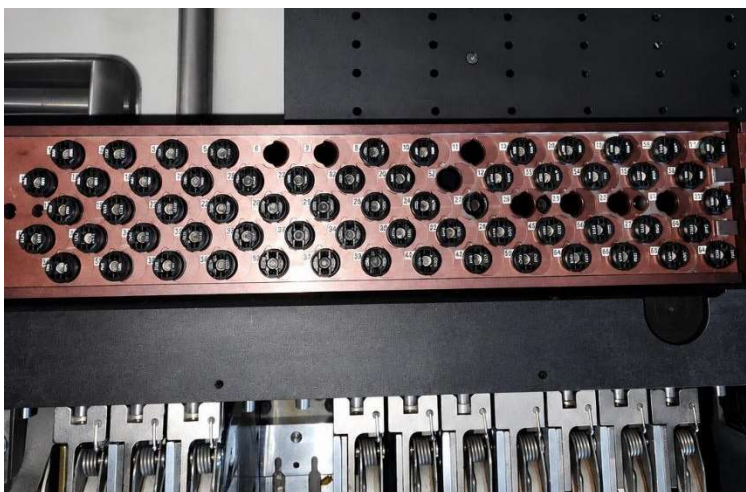


Figura 68. Revisión de boquillas de máquinas montadoras.

También se realizó el análisis de la programación de las máquinas para ver las coordenadas que se tenían en las tarjetas pcb y se encontró un ligero desplazamiento en algunas coordenadas, mismo que podemos apreciar en la Figura 69.

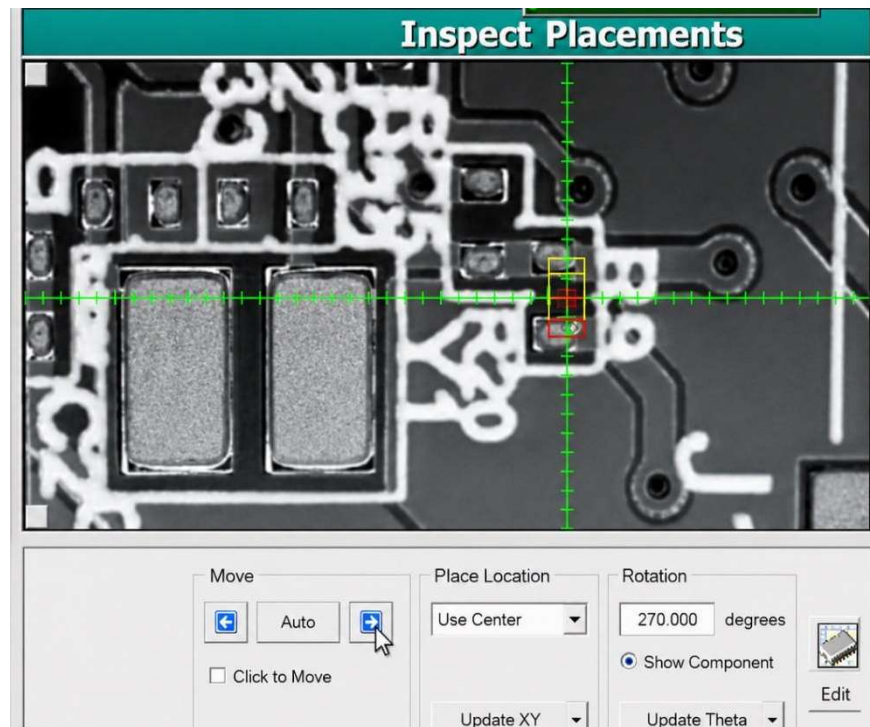


Figura 69. Preproducción de máquina montadora (desplazamiento de coordenadas).

Se movieron estas coordenadas de modo que los componentes de la tarjeta quedaran alineados a los pads del pcb, disminuyendo así los errores de desplazamiento de componentes. Para esto fue necesario Inspeccionar componente por componente de todos los proyectos y mover la colocación exacta en la que debe de ir colocado en la máquina. En la figura 70 se muestra un ejemplo de una colocación exacta con relación a componente contra pad del pcb.

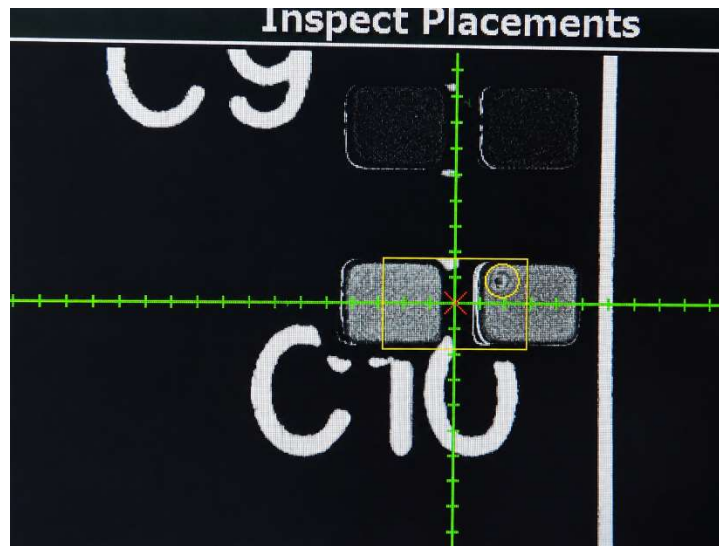


Figura 70. Corrección de coordenadas en componentes de tarjeta.

Por último, se verificaron los parámetros de colocación de velocidad y fuerza al momento de montar los componentes como se muestra en figura 71, esto con el fin de disminuir los tiempos de producción. Se ajustaron los parámetros que fueran necesarios y se realizaron las pruebas correspondientes. En la figura 72 se muestra como disminuyo el error de levantamiento del componente con ayuda de los ajustes y en la Figura 73 se ve el ajuste de presión de la boquilla para aumentar el porcentaje de éxito de la disminución de errores por mala colocación de los componentes.

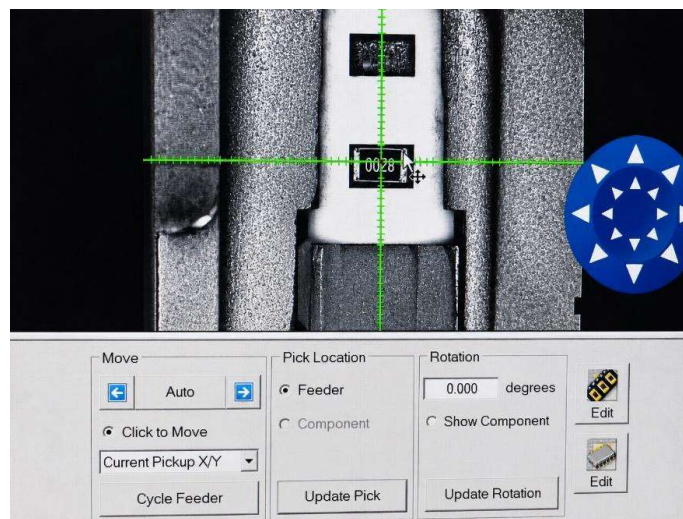


Figura 71. Ajuste de velocidad y fuerza de levantamiento de componente.

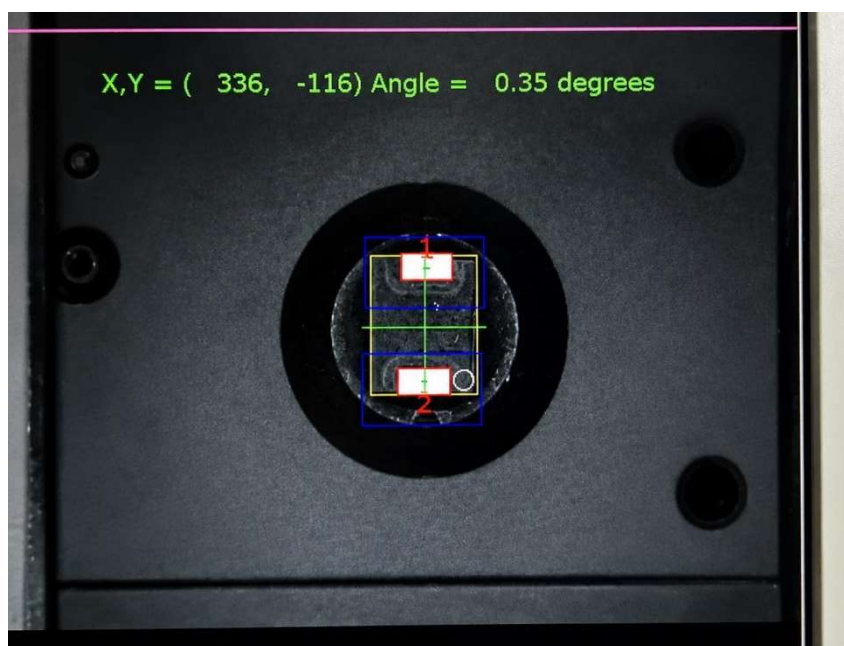


Figura 72. Levantamiento correcto del componente con boquilla.



Figura 73. Ajuste de presión de boquilla en levantamiento de componente.

2.5.3. Optimización del horno de reflujo.

El horno de reflujo es uno de los procesos más delicado y clave para la unión de la soldadura con los componentes es por eso por lo que se propone realizar los perfiles de reflujo para cada tarjeta o proyecto utilizando la información de los componentes y termopares.

Con ayuda de herramientas proporcionadas por la empresa se realizaron los perfiles de cada tarjeta, estos se hicieron a base de la información de todos los componentes que integraban cada proyecto, se buscó la información de sus datasheets y de ahí partimos para estos perfiles. En este apartado fue necesario saber el funcionamiento de la perfiladora y la forma correcta de la colocación de los termopares en la tarjeta pcb. Esto último se muestra en la Figura 74.

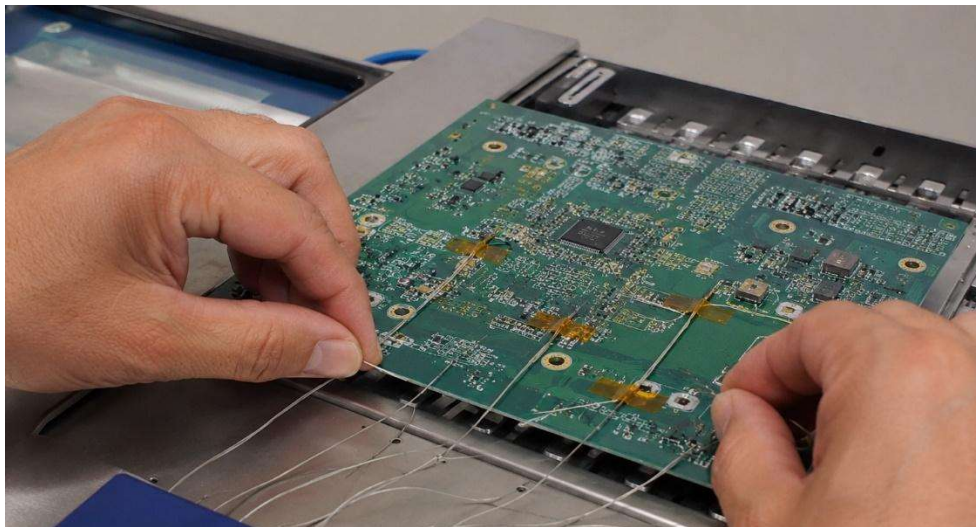


Figura 74. Colocación de termopares en tarjeta pcb para realización de perfil.

Se siguieron los pasos correspondientes para la realización del perfil y se llegaron a la obtención de resultados favorables obteniendo la gráfica mostrada en la figura 75 que cumplía con las características de una soldadura correcta.

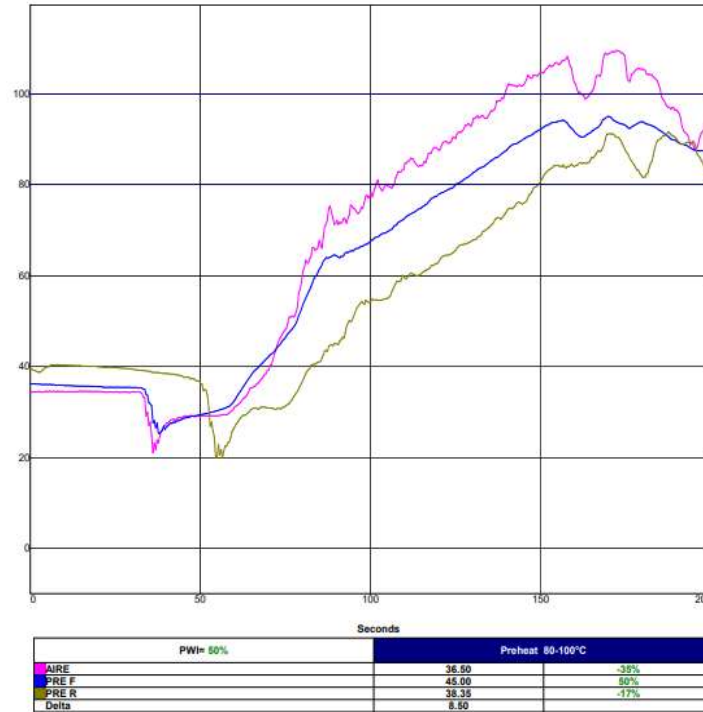


Figura 75. Gráfica correcta de un buen perfil de soldadura.

Después de realizar todos los ajustes, se hizo un lote de producción con una cantidad de tarjetas considerables para probar todos los nuevos programas; en la figura 76 se muestra una máquina montadora en operación y se logra tener una reducción considerable de errores y una ligera disminución de tiempo de producción y, en la figura 77 se muestra la operación de la máquina montadora de producción.

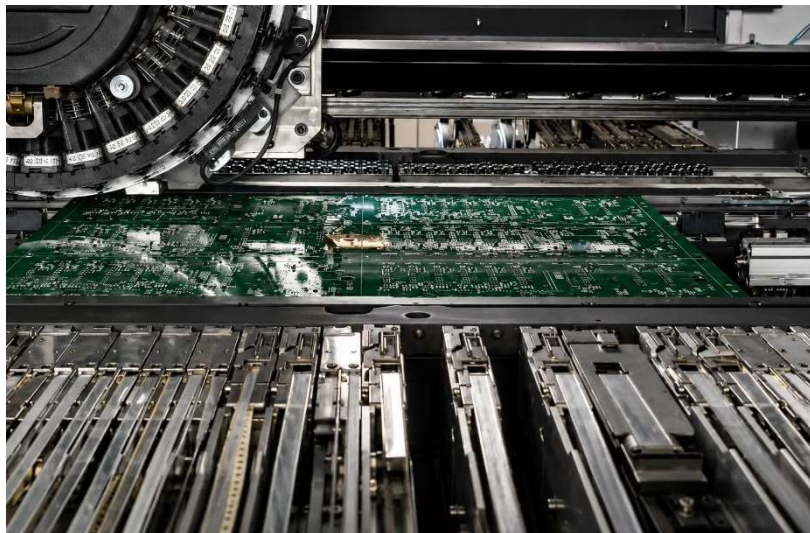


Figura 76. Ensamble de lote piloto para corrección de errores.



Figura 77. Operación de máquinas montadoras durante producción.

Capítulo 3. Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo de investigación permitió analizar y optimizar el proceso de ensamble electrónico de tecnología de montaje superficial (SMT), en una línea de producción automatizada, esto se hizo analizando e identificando todos los factores que afectaban la calidad del ensamble final y la confiabilidad de las tarjetas.

Gracias al estudio de todas las etapas del proceso de ensamble SMT: impresión de soldadura en pasta, inspección de soldadura en pasta, colocación de componentes, horno de reflujo y la inspección óptica automatizada, fue posible determinar las causas de los defectos presentados en la línea de producción, que fueron principalmente la falta de estandarización en parámetros críticos y deficiencia en el monitoreo del proceso.

Mediante la aplicación de herramientas de análisis industrial como el diagrama de Ishikawa y metodología A3, se identificaron las principales causas raíz asociadas a defectos como puentes de soldadura, insuficiencia de soldadura, desplazamiento de componentes y soldaduras frías. Con base en estos resultados, se desarrolló una propuesta de optimización enfocada en el control de parámetros de impresión SMT, calibración de equipos pick and place, optimización del perfil térmico del horno de reflow, optimización de impresión de soldadura en pasta y monitoreo del proceso. La implementación de las mejoras propuesta permitió una reducción muy significativa a la incidencia por defectos lo que representa una mejora muy representativa respecto a las condiciones iniciales del proceso. A su vez se logró mantener más estable la línea de producción SMT y disminuir los retrabajos mejorando la calidad de los ensambles de las tarjetas electrónicas.

Con esta investigación se demostró que la electrónica en la industria es un área llena de oportunidades que requieren de múltiples conocimientos ya que es una rama muy extensa que no es tan fácil manejar como pareciera, pues todas sus partes tienen su nivel de complejidad.

Finalmente, con este trabajo se pretende seguir avanzando en la búsqueda de mejora continua en todos los procesos para poder seguir disminuyendo los márgenes de error en cada parte del proceso de producción.

Glosario

SMT (Surface Mount Technology). Tecnología de montaje superficial utilizada para ensamblar componentes electrónicos directamente sobre la superficie del PCB.

THT (Through Hole Technology). Tecnología de ensamblaje electrónico donde los componentes se insertan en perforaciones del PCB.

SPI (Solder Paste Inspection). Sistema de inspección utilizado para medir volumen, altura y alineación de la pasta de soldadura depositada.

AOI (Automated Optical Inspection). Sistema automatizado de inspección óptica utilizado para detectar defectos en tarjetas electrónicas ensambladas mediante cámaras y algoritmos de visión artificial.

Pad. Área conductora de cobre localizada sobre la superficie del PCB destinada a realizar la conexión eléctrica y mecánica de los componentes electrónicos mediante soldadura.

Fiducial. Marcas de referencia colocadas sobre el PCB utilizadas por las máquinas pick and place y sistemas de visión para alinear y posicionar correctamente la tarjeta y los componentes durante el proceso SMT.

Automatización. Uso de sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales para ejecutar procesos industriales con mínima intervención humana.

Circuito Impreso (PCB – Printed Circuit Board). Tarjeta fabricada con material dieléctrico y pistas conductoras que sirve como base para la conexión de componentes electrónicos.

Encapsulado electrónico. Estructura física que protege y permite la conexión eléctrica de un componente electrónico.

ESD (Electrostatic Discharge). Descarga electrostática capaz de dañar componentes electrónicos sensibles.

Esténcil. Plantilla metálica utilizada para depositar pasta de soldadura sobre las áreas específicas del PCB.

Squeegee. Herramienta utilizada en la impresora SMT para distribuir y presionar la pasta de soldadura sobre el esténcil, permitiendo el depósito uniforme del material sobre los pads del PCB.

Feeder. Dispositivo alimentador de componentes electrónicos en una máquina pick and place.

Horno de Reflow. Equipo industrial utilizado para fundir la pasta de soldadura mediante un perfil térmico controlado.

IPC-A-610. Norma internacional que establece criterios de aceptabilidad para ensambles electrónicos.

J-STD-001. Norma internacional que define los requerimientos para procesos de soldadura en ensambles eléctricos y electrónicos.

Línea SMT. Conjunto de equipos automatizados utilizados para realizar el ensamblaje superficial de componentes electrónicos.

Perfil térmico. Curva de temperatura aplicada durante el proceso de reflow para garantizar una correcta fusión de la soldadura.

Pick and Place. Máquina automatizada encargada de tomar y colocar componentes electrónicos sobre el PCB con alta precisión.

Pitch. Distancia entre terminales o pads de un componente electrónico.

Puente de soldadura. Defecto donde la soldadura une accidentalmente dos pads o terminales, provocando cortocircuitos.

Reflow. Proceso térmico mediante el cual la pasta de soldadura se funde para crear uniones eléctricas y mecánicas permanentes.

Retrabajo. Proceso de corrección de defectos en una tarjeta electrónica después del ensamblaje inicial.

SAC305. Aleación de soldadura libre de plomo compuesta principalmente por estaño, plata y cobre.

Scrap. Material o producto rechazado que no puede recuperarse o reutilizarse dentro del proceso productivo.

Boquilla (Nozzle) Elemento de la máquina pick and place encargado de sujetar y colocar componentes electrónicos mediante vacío.

Setup. Proceso de preparación y configuración inicial de máquinas, herramientas y parámetros de operación antes de iniciar la producción en una línea SMT. Incluye carga de programas, validación de feeders, calibración y verificación de materiales.

Liquidus. Temperatura mínima a la cual una aleación de soldadura se encuentra completamente en estado líquido durante el proceso de reflow. Este parámetro es fundamental para garantizar una correcta formación de las uniones de soldadura.

Diagrama de Ishikawa. Herramienta gráfica de análisis causa-raíz utilizada para identificar y clasificar las posibles causas de un problema. También es conocida como diagrama de espina de pescado o diagrama causa-efecto.

A3. Metodología de solución de problemas utilizada en entornos industriales para identificar causas raíz, establecer acciones correctivas y dar seguimiento a mejoras de proceso. Su nombre proviene del formato de papel tamaño A3 donde se documenta toda la información del análisis.

Bibliografía

- [1] Aldelta, "Guía Básica Parte 1 Normas Internacionales Básicas Para Diseño De Circuitos Impresos Pcb Y Productos Electrónicos," 2017. Disponible en: <https://www.aldeitatec.com/wp-content/uploads/2016/02/Guia-basica-normas-para-PCB-PARTE1.pdf>
- [2] R. Prasad, *Surface Mount Technology: Principles and Practice*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 1997.
- [3] J. F. Pawling, *Surface Mounted Assemblies*. Arlington, MA: State Mutual Book & Periodical Service, Feb. 1997, Disponible en: https://openlibrary.org/works/OL16992356W/Surface_Mounted_Assemblies.
- [4] Artizono, (2025), "Comprender la funcionalidad de las válvulas termoiónicas: Ventajas y aplicaciones", Empresa Artizono, Disponible en: <https://artizono.com/es/comprender-la-funcionalidad-de-las-valvulas-termoionicas-ventajas-y-aplicaciones/>.
- [5] Onuba, Electrónica, (año), "Válvula termoiónica", Disponible en: <https://onubaelectronica.es/valvula-termoionica/>.
- [6] Universidad Antonio Nebrija, "Circuitos impresos PCB," Curso de Tecnología Electrónica II. Disponible en: https://www.geocities.ws/curso_tecnologia_electronica/TemasTE2/TE2-TO2C.pdf, [Accedido: 30-sept-2025].
- [7] "Historia del desarrollo y tendencias de PCB," *MOKO Technology*, Disponible en: <https://www.mokotechnology.com/es/pcb-history-and-trends/>, [Accedido: 05-oct-2025].
- [8] Nexperia, (2022), SOT338-1 Hoja de especificaciones. Disponible en: <https://assets.nexperia.com/documents/package-information/SOT338-1.pdf>.
- [9] Cabrera García, Bonifacio, (2010), Diseño de PCB de Tarjeta de Evaluación para FPGA Virtex, Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, UAEH, Pachuca, Hidalgo, México.
- [10] Pacheco González, Eduardo, (2010), Diseño de PCB de Tarjeta de Evaluación Para DSP DaVinci, Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, UAEH, Pachuca, Hidalgo, México.
- [11] IPCB, (2021), La vida legendaria de Paul Eisler, padre de PCB, disponible en: <https://www.ipcb.com/es/news/1360.html>.
- [12] Edwin F. Torres A. "¿Encapsulados Para Montaje Superficial?". Disponible en: https://www.vicartechz.com/2025/08/21/encapsulados-para-montaje-superficial-2/?srsltid=AfmBOoq82AWurnMOZSgbCYtlkoZ5psssCMGeTte_KE6vBqsxOEgwCpMP&utm_
- [13] B. Mooney, (1996), "A practical Introduction to Surface Mount Devices", Ed Berbard Babani, LTD. Disponible en chrome-

-
- extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.worldradiohistory.com/UK/Bernards-And-Babani/Babani/Babani-411.pdf
- [14] Wierzbinski, S., (1999), SMD (Surface mounted devices) repair. International Atomic Energy Agency Instrumentation Unit.
- [15] González F, (2022), "*Tipos de ensamble PCB (SMT Y PTH)*". Disponible: <https://www.pcbrapido.com/tipos-de-ensamble-pcb-smt-y-ptb/>
- [16] D. Downs, (2021), "*Resumen de los defectos de la soldadura de retorno SMT y el proceso SMT,*" iPCB – Tecnología PCBA, Disponible en: <https://www.ipcb.com/es/pcba-tech/8572.html>
- [17] UNIT Electronics, *Catálogo Resistencias SMD 0805 4250 Piezas*, uelectronics.com. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/catalogo-resistencias-smd-0805-4250-piezas/>.
- [18] "*Solder Paste Printing Process*". SURFACE MOUNT PROCESS. Disponible en: <https://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-printing-process.html>
- [19] "Insituware, *The definitive Guide to Solder Paste*". Insituware Corp. Disponible: <https://www.insituware.com/definitive-guide-to-solder-paste>.
- [20] Global Well PCBA, "*Pasta de soldadura en la fabricación de electrónica*", Global Well PCBA. Disponible en: <https://www.globalwellpcb.com/solder-paste-in-electronics-manufacturing/>.
- [21] Z. Huber. "Soldering: SMT pastes". Quality and Electronics | Super Engineer. Disponible en: <https://www.superengineer.net/blog/soldering-smt-paste>
- [22] "Solder Paste | Sierra Circuits". Sierra Circuits. Accedido el 31 de enero de 2026, Disponible: <https://www.protoexpress.com/kb/solder-paste/>
- [23] "Solder Paste Printing Process in SMT Assembly | PCB Assembly House". Printed Circuit Board Manufacturing, PCB Assembly & PCB Design - MADPCB. Disponible en: <https://madpcb.com/solder-paste-printing/>
- [24] "Archivos Gerber: ¿para qué sirven?" Rapid PCB Assembly Prototypes - Proto-Electronics. Disponible: <https://www.proto-electronics.com/es/blog/archivos-gerber-para-qe-sirven>
- [25] IPC, (2007), "*IPC-7525A Stencil Design Guidelines*", Association Connecting Electronics Industries. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://u.dianyan.com/upload/bbs/2010/08/15/1281819187-319579.pdf.
- [26] ProtoExpress, "*PCB Design Output Data: What the Manufacturer Requires*," ProtoExpress Blog. Disponible en: <https://www.protoexpress.com/blog/pcb-design-output-data-manufacturer-requires/>.
- [27] TECAN (1970), Stencils handbook, A Comprehensive Guide. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/662411886/Tecan-Stencils-Handbook-WEB-Compressed>

-
- [28] I. Corporation, (2021), "Impresión de soldadura en pasta SMT", pp. 1–56.
- [29] H. E. T. C. Ltd. "¿Qué es una máquina de pick and place SMT?", Hayawin Electronic Technology Co., Ltd. Disponible en: <https://es.hayawin.com/news-what-is-smt-pick-and-place-machine.html>
- [30] NeoDen, (2019), "¿Qué es una máquina de selección y colocación?", Zhejiang Neoden Technology Co., Ltd. Disponible: <https://www.neodenpnp.com/news/what-is-a-pick-and-place-machine-25030801.html>
- [31] NeoDen, (2024), "¿Cómo funciona la máquina SMT AOI?," Zhejiang Neoden Technology Co., Ltd. Disponible: <https://www.neodenpnp.com/news/how-does-smt-aoi-machine-work-74331282.html>
- [32] Sierra Circuits, "Automated Optical Inspection". Sierra Circuits Inc. Disponible: https://www.protoexpress-com.translate.google.com/automated-optical-inspection/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [33] Largo, E, (2025), "¿Qué es un horno de reflujo? SMT Guía de I.C.T, Éxito del ensamblaje", I. T. C. Intercontinental, Disponible: <https://smtmachineline.com/es/what-is-a-reflow-oven/>