



## Trabajo Fin de Grado

Diseño de línea de producción de circuitos  
electrónicos.

Electronic circuit production line design.

Autor

Mario Cabañero López

Director

Juan Carlos Sánchez Catalán

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Junio 2023

Página intencionadamente en blanco.



**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

Diseño de línea de producción de circuitos  
electrónicos.

Electronic circuit production line design.

**Identificador**

Autor: Mario Cabañero López

Director: Juan Carlos Sánchez Catalán

Fecha: 05 2023

Página intencionadamente en blanco.

## INDICE DE CONTENIDO BREVE

<b>1. RESUMEN</b>	<hr/> 1
<b>2. ABSTRACT</b>	<hr/> 3
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<hr/> 5
<b>4. DESARROLLO</b>	<hr/> 6
<b>5. RESULTADOS.</b>	<hr/> 53
<b>6. CONCLUSIONES.</b>	<hr/> 59
<b>7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	<hr/> 64
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<hr/> 65

## INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<hr/> 1
1.1. PALABRAS CLAVE	<hr/> 2
<b>2. ABSTRACT</b>	<hr/> 3
2.1. KEY WORDS	<hr/> 4
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<hr/> 5
<b>4. DESARROLLO</b>	<hr/> 6
4.1. MARCO TEÓRICO	<hr/> 6
4.1.1. Conceptos básicos de electrónica	<hr/> 6
4.1.2. Ley de Moore y evolución	<hr/> 10
4.1.3. Diseño	<hr/> 11
4.1.4. Tecnología SMD	<hr/> 14
4.1.4.1. Componentes SMD	<hr/> 15
4.1.4.2. Técnicas de producción y verificación.	<hr/> 16
4.1.5. Procesos de producción SMD	<hr/> 18
4.2. DISEÑO DEL CIRCUITO	<hr/> 29
4.2.1. Especificaciones del circuito	<hr/> 31
4.2.2. Análisis y selección de componentes	<hr/> 32

4.3. PRODUCCIÓN SMD DEL CIRCUITO	43
4.3.1. Preparación de los materiales y equipos necesarios.	43
4.3.2. Proceso SMD.	47
4.3.2.1. P-FMEA.	49
4.3.2.2. Plan de control	50
5. RESULTADOS.	53
6. CONCLUSIONES.	59
7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	64
8. BIBLIOGRAFÍA.	65

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de flujo de proceso de diseño electrónico .....	13
Ilustración 2 Proceso de serigrafía de pasta soldante.....	19
Ilustración 3 Esquema de una máquina de montaje superficial básica.....	20
Ilustración 4 Funcionamiento máquina de inspección automática .....	24
Ilustración 5 Diagrama variables incluidas en el coste por unidad producida....	26
Ilustración 6 Lay Out vista planta robot de tijera .....	29
Ilustración 7 Lay Out vista perfil robot de tijera .....	30
Ilustración 8 Conector coaxial .....	33
Ilustración 9 Alimentación con protección de polaridad inversa .....	34
Ilustración 10 Esquema eléctrico fuente conmutada NB-636 .....	35
Ilustración 11 Esquema configuración microprocesador ATMEGA328P .....	36
Ilustración 12 Configuración oscilador .....	38
Ilustración 13 Esquema eléctrico finales de carrera .....	39
Ilustración 14 Esquema eléctrico conector ICSP.....	40
Ilustración 15 Esquema eléctrico conexión de datos con placa principal .....	40
Ilustración 16 Esquema eléctrico configuración puente en H.....	41

Ilustración 17 Esquema eléctrico de referencia puente en H (MC33926) .....	42
Ilustración 18 Configuración NB-636 .....	42
Ilustración 19 Diseño 3D .....	45
Ilustración 20. Línea de producción .....	47
Ilustración 21 Diagrama de flujo del proceso SMD .....	48
Ilustración 22 Laseado PCB P-FMEA .....	53
Ilustración 23 OEE y rendimiento .....	54
Ilustración 24 Gráfico seguimiento OEE .....	55
Ilustración 25 Control producción .....	55
Ilustración 26 Dar pieza de baja .....	56
Ilustración 27 NRFT .....	56
Ilustración 28 Falsos fallos .....	57
Ilustración 29. Cuatros circuitos por placa .....	59
Ilustración 30. Dos circuitos por placa .....	60

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores de producción .....	23
Tabla 2 OEE World Class Value .....	28
Tabla 3 Valores de resistencia en función de la tensión de salida .....	36
Tabla 4 Pines PB ATMEGA328P .....	37
Tabla 5 Lista de Materiales .....	43
Tabla 6 Presupuesto y tiempos de ciclo maquinaria .....	47
Tabla 7 Clasificación criterios P-FMEA .....	49
Tabla 8 Fases prototipos .....	61
Tabla 9 Evolución temporal prototipos .....	62



## 1. RESUMEN

En la industria de la electrónica, el diseño y producción de circuitos electrónicos son procesos críticos para la fabricación de dispositivos electrónicos de alta calidad y rendimiento. El diseño de un circuito implica seleccionar los componentes adecuados, conectarlos correctamente en un esquemático y garantizar que el circuito cumpla con los requisitos de rendimiento. La producción de un circuito implica la colocación y soldadura de los componentes en la PCB con alta densidad de integración utilizando tecnología SMD, lo que requiere de equipos y habilidades especializadas.

El proceso de diseño y producción de circuitos puede ser costoso y complejo, además no puedes ser fabricados de manera individualizada y aislada, se deben fabricar en serie debido a cuestiones de uniformidad, ya que si se realizan uno a uno estos componentes se corre el riesgo de, aunque sean del mismo tipo, con las mismas características y materiales, pueden existir diferencias que cree defectos o falta de calidad en la pieza.

La creciente demanda de circuitos electrónicos invade los mercados electrónicos actuales a nivel global, se reconoce de manera amplia la importancia de estos elementos como piezas fundamentales que contribuyen al funcionamiento de los diferentes aparatos y dispositivos tecnológicos existentes, desde los ordenadores domésticos y potentes servidores, hasta los sofisticados aparatos médicos y los dispositivos de transporte, solo por mencionar unos cuantos de los más conocidos.

Pero esas no serían las únicas aplicaciones de estas placas, a pesar de que su funcionamiento está ligado a ser añadido y volverse parte de otro producto o aparato tecnológico, nada de esto le resta su importancia y los grandes aportes que ha realizado y continúa haciendo a las innovaciones que van surgiendo día a día en el sector de la tecnología.

Es por ello por lo que ante un rol tan destacado que tienen estos componentes en la industria y los diferentes sectores, es muy importante generar no solo innovaciones que mejoren la composición y el funcionamiento de estos, sino también los procesos asociados a su elaboración, a través de la transformación de los materiales que lo estructuran.

Esto conlleva a la necesidad que plantea este trabajo final de grado, en el cual se pretende diseñar una línea de producción de circuitos electrónicos, este diseño se propone de forma estandarizada, que permita solucionar no solo una problemática o una necesidad de una empresa particular, sino que cumpla con la condición de ser fácilmente implementado en cualquier otra organización en la que pueda ser llevado a cabo el proyecto presentado en este documento.

Además, también se desarrollará brevemente el diseño electrónico de la placa.

## 1.1. PALABRAS CLAVE

- Industria electrónica
- Diseño electrónico
- Producción
- Circuitos electrónicos
- Tecnología SMD

## 2. ABSTRACT

In the electronics industry, the design and production of electronic circuits are critical processes for manufacturing high-quality and high-performance electronic devices. The design of a circuit involves selecting the appropriate components, correctly connecting them in a schematic, and ensuring that the circuit meets performance requirements. The production of a circuit involves the placement and soldering of components on the PCB with high integration density using SMD technology, which requires specialized equipment and skills.

The process of designing and producing circuits can be costly and complex. Additionally, they cannot be manufactured individually and in isolation; they must be produced in series to ensure uniformity. If these components are made one by one, even if they are of the same type with the same characteristics and materials, there is a risk of differences that can create defects or lack of quality in the final product.

The growing demand for electronic circuits is pervasive in current electronic markets globally. The importance of these elements as fundamental parts contributing to the functioning of various technological devices and appliances, from home computers and powerful servers to sophisticated medical devices and transportation devices, is widely recognized.

However, these boards have applications beyond the mentioned examples. Despite their function being linked to being added and becoming part of another product or technological device, this does not diminish their significance and the significant contributions they have made and continue to make to the innovations emerging daily in the technology sector.

Given the prominent role these components play in the industry and various sectors, it is crucial not only to generate innovations that improve their composition and performance but also to improve the associated processes through material transformation.

This leads to the need addressed in this final degree project, which aims to design a production line for electronic circuits. This standardized design aims to solve not only a specific company's problems or needs but also be easily implemented in any other organization where the presented project can be carried out.

Furthermore, the electronic design of the board will also be briefly developed.

## 2.1. KEY WORDS

- Electronic industry
- Electronic design
- Production
- Electronic circuits
- SMD technology

### **3. INTRODUCCIÓN**

Los circuitos electrónicos cuentan con una amplia aplicabilidad en los diferentes sectores y campos de estudio, sus usos no se limitan solamente a la vida doméstica, sino que, en industrias como la automoción, la de la telefonía móvil, la de los ordenadores, electrodomésticos, maquinaria, entre muchas otras que se podrían mencionar sería en este momento imposible diseñar sus productos sin la presencia de estas estructuras.

Sin embargo, la industria de los circuitos electrónicos es en sí misma, es una propia, en esta su función principal radica en el diseño y elaboración de estos, siguiendo los lineamientos y los estándares de calidad generalizados y además tomando en cuenta las necesidades que estos deban satisfacer de acuerdo con el uso que se le debe dar al ser incorporados a los productos que los requieren.

## 4. DESARROLLO

### 4.1. MARCO TEÓRICO

#### 4.1.1. *Conceptos básicos de electrónica*

La electrónica es la rama de la ingeniería que se encarga del estudio y aplicación de la electricidad a través de dispositivos electrónicos y diferentes materiales con el fin de crear circuitos y sistemas capaces de procesar, transmitir y almacenar información para controlar dispositivos y sistemas.

En el acercamiento al concepto de un circuito electrónico se puede realizar el reconocimiento estructural de este componente como un conjunto de placas que se fabrican con materiales semiconductores, algunos de ellos conocidos de acuerdo con la función que realizan en un determinado momento como materiales activos y pasivos, ya que algunos de ellos son versátiles y pueden adaptar su función de acuerdo con requerimiento que tenga el circuito en el momento de trabajo. Malvino, & Bates (1991).

Este dispositivo tiene como finalidad principal la creación de un camino o recorrido por medio del cual pueda fluir la corriente necesaria para permitir el trabajo de un artículo o artefacto que contiene este circuito, pero también cumplen con algunas tareas más exactas relacionadas con el manejo de datos y procesamiento de información. De acuerdo con el recorrido de los electrones que hacen presencia por este camino pueden darse acciones como: generar, transmitir, recibir y almacenar cierta cantidad de información. Sabemos que esta información se puede encontrar de diversas formas, entre ellas sonido, texto, datos planos, datos estructurados, datos cifrados, entre otros.

Para que en verdad esta placa integrada de estos componentes mencionados pueda llegar a ser ese recorrido al que se hace referencia, este debe tener un inicio y un fin, pero que se ubica siempre en el mismo lugar o en el mismo punto. Es decir que este circuito debe realizar un trabajo cíclico, o conformar el llamado bucle. Esta placa tiene como característica principal, que el manejo de corriente o de energía eléctrica es por lo general de bajo voltaje. Salazar (1995).

En un circuito electrónico podemos distinguir principalmente entre dos componentes:

- Componentes electrónicos activos

Son los dispositivos cuya función principal radica en proporcionar la energía al circuito. Podemos encontrar entre ellos a los semiconductores y las fuentes de alimentación.

- Componentes electrónicos pasivos

Estos dispositivos, por el contrario, tienen como funcionalidad la carga de energía, es decir el almacenamiento de esta para en otro momento de trabajo del componente general liberarla. Entre estos podemos mencionar a los condensadores, diodos, inductores e incluso las resistencias.

Los principales dispositivos electrónicos que debemos tratar nosotros debido a la naturaleza de este trabajo son las resistencias, los capacitores, inductores, diodos y transistores.

- Resistencia: Es un dispositivo electrónico pasivo cuya principal función consiste en limitar el flujo de corriente eléctrica en un circuito. Está compuesta por un material conductor como puede ser el alambre de carbono o el metal, que se enrolla en un cuero cerámico o plástico. La unidad a través que medimos la resistividad son los Ohmios ( $\Omega$ ).

Su principal función es controlar la corriente eléctrica y la tensión que fluye a través de los componentes del circuito, su posicionamiento se realiza en serie con los componentes para reducir las dos variables eléctricas antes mencionadas. Además, también se utiliza para dividir la tensión con los conocidos divisores de tensión y para proteger componentes sensibles a sobrecargas de corrientes.

- Capacitor: Es un dispositivo electrónico pasivo utilizado para almacenar energía eléctrica en un campo eléctrico. Son principalmente dos placas conductoras separadas por un material dieléctrico que ejerce de aislante. La unidad a través de la que medidos la capacidad de estos componentes son los Faradios (F).

Se utiliza para bloquear la corriente continua y dejar pasar la alterna, también para almacenar energía eléctrica de forma temporal y para la eliminación de fluctuaciones de voltaje y pueden ser usados como filtros para eliminar frecuencias no deseadas.

Existen diferentes capacitores entre los que debemos distinguir:

- Capacitores de cerámica: Estos capacitores están hechos de cerámica y son comúnmente utilizados debido a su pequeño tamaño, alta tolerancia y bajo costo. Son adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y de baja capacitancia.
- Capacitores electrolíticos: Estos capacitores utilizan un electrolito para aumentar la capacitancia. Son más grandes que los capacitores de cerámica y tienen una polaridad, lo que significa que deben ser conectados en la dirección correcta. Son adecuados para aplicaciones de baja frecuencia y alta capacitancia.
- Capacitores de película: Estos capacitores están hechos de una película delgada de material dieléctrico y son adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y precisión. Son más costosos que los capacitores de cerámica y electrolíticos.
- Capacitores variables: Estos capacitores tienen la capacidad de variar su capacitancia a través de un rango determinado. Son adecuados para aplicaciones de sintonización y ajuste.
- Capacitores de tantalio: Estos capacitores son similares a los capacitores electrolíticos, pero utilizan tantalio en lugar de aluminio. Son más costosos que los capacitores electrolíticos, pero tienen una mayor precisión y estabilidad a largo plazo.
- Inductores: Dispositivo electrónico pasivo que almacena energía en un campo magnético cuando una corriente eléctrica pasa a través de él. Está formado por una bobina de alambre conductor enrollada en un núcleo de material ferromagnético. La unidad a través de la que medimos la inductancia es Henrios (H), capacidad que tiene el inductor de almacenar energía.

Su principal función es la de oponerse a los cambios en la corriente eléctrica por lo que aporta una estabilización en el voltaje del circuito y reducción de ruido y fluctuaciones de corriente, por lo tanto, también son utilizados como filtros de ruido o señales no deseadas y además también puede ser utilizado en aplicaciones de conversión de energía.

- Diodos: Dispositivo electrónico pasivo que permite el flujo de corriente eléctrica en una sola dirección. Está compuesto de dos capas de material semiconductor, una con exceso de electrones (tipo N) y otra con escasez de electrones (tipo P), que forman la unión PN. Cuando se aplica tensión en la dirección correcta la unión se polariza y el componente se vuelve conductor. En caso contrario, es decir, al aplicar la tensión a la inversa el diodo bloquea el flujo de corriente.

Su función principal en un circuito consiste en la rectificación de la corriente eléctrica, es decir convertir la corriente alterna en corriente continua, otra función importante y la más utilizada en SMD es la protección de componentes sensibles a sobretensiones o picos de corriente.

- Transistores: Dispositivo electrónico activo utilizado para amplificar y/o conmutar señales eléctricas, está compuesto por tres capas de material semiconductor, dos de tipo N y una de tipo P (transistor NPN) o al revés, dos de tipo P y una de tipo N (transistor PNP). Estos tienen 3 modos de funcionamiento, corte saturación y activo que depende de la polarización de la unión base-emisor y base-colector.
  - Modo Activo: Funciona como un amplificador de corriente permitiendo el control de la corriente que fluye a través de él por medio de una pequeña corriente de entrada.
  - Modo corte: el transistor bloquea la corriente.
  - Modo saturación. El transistor permite el flujo máximo de corriente.

Su función principal consiste en amplificar señales eléctricas ya sea aplicado en el voltaje o en la corriente. También puede ser utilizado como interruptor electrónico como en circuitos integrados y microcontroladores.

Todos los componentes anteriores se combinan entre ellos de diferentes maneras para crear circuitos más complejos como pueden ser amplificadores de audio, fuentes de alimentación, osciladores, filtros y circuitos integrados.

Por ejemplo, los capacitores y los inductores pueden combinarse para formar circuitos resonantes que se utilizan en la sintonización de radios y la creación de filtros de frecuencia. Diodos y transistores también

pueden combinarse para formar circuitos rectificadores, que convierten la corriente alterna en corriente continua. Uniendo resistencias y capacitores con transistores podemos crear amplificadores y osciladores. En general, estos se utilizan y combinan para crear circuitos complejos. Nosotros usaremos estos y otros componentes como son los circuitos integrados (compuestos por estos componentes) para el diseño de nuestro circuito SMD.

#### *4.1.2. Ley de Moore y evolución*

Todos los elementos anteriores fueron el invento más importante de la electrónica y revolucionaron la antigua informática desafiando todos los trabajos y avances en tecnología realizados hasta la década que transcurre entre 1960 y 1970, comenzando importantes investigaciones sobre la estructuración de este y la forma como podría trabajar basado en las leyes y postulados que hasta la época se manejaban.

Para su fabricación, los profesionales de la ingeniería como expertos conocedores se encargaron de ubicar varios componentes sobre una misma base o superficie que en un principio llamaron Integración a Pequeña Escala (SSI). Sin embargo, a rapidez con la que evolucionaba esta tecnología, terminó con la creación en poco tiempo de la Integración a Media Escala (MSI), donde ahora se incrustaron cientos de elementos en la superficie de la misma área que la anterior, pero no se quedaron solo allí, sino que a medida que avanzaba la década y llegando ya a 1970, se siguió ahora la llamada integración a gran escala (LSI) donde ahora la incorporación ya sería de miles de componentes, avanzando después a la integración a muy gran escala (VLSI) donde se ubicaban decenas de miles para terminar finalmente en el avance de lo que conocemos en la actualidad y con lo que se producen estos circuitos, la integración a ultra gran escala (ULSI) donde se incluyeron ahora millones de pequeñas estructuras pero sin recurrir a agrandar la superficie o base inicial. Wong (2005).

Hacia el año de 1965, Gordon Moore, realizó un análisis en la misma empresa donde laboraba, INTEL, la ahora multinacional que elabora uno de los tipos de circuitos electrónicos que existen en la actualidad, los microprocesadores. Realizó su labor de observación en esta compañía fabricante de chips y se dio cuenta que cada uno o dos años, esta ubicaba duplicando la cantidad de elementos que podía incluir en esta placa electrónica, siendo testigo de la capacidad de avance y de trabajo que tenía la organización en ese momento.

Ahora su trabajo investigativo, se ha convertido en la conocida Ley de Moore, cuyo cálculo y nivel de expansión se ha conservado a través de los años. Esto lo sorprendió a él mismo cuando en 2015, manifestó

que no podía creer que este postulado se hubiese convertido ahora en una ley que se mantuvo en el tiempo.

La Ley de Moore en pocas palabras enuncia que el número de transistores incorporados en los microchips va duplicándose cada uno o dos años, esta tendencia sugiere que su maximización en décadas tiene un crecimiento de tipo exponencial, por lo que al realizar una gráfica se podrá visualizar una curva exponencial. Tirado (2017).

Mientras que los circuitos surgieron apenas entre 1960 y 1970, los transistores ya habían sido creados en 1947, este componente básico marcó la evolución de los circuitos electrónicos actuales y con ello de los dispositivos modernos como los computadores y celulares.

En sus orígenes estos transistores estaban compuestos de una cubierta plástica y por supuesto distribuidos en forma separada, así también los condensadores y resistencias se encontraban individualmente y eran adheridos al circuito que tenía un tamaño considerable, pero al que solo era posible incrustarle a la placa posteriormente solo una pequeña cantidad de estos dispositivos. Esto redundaba en la menor cantidad de utilidades que tenían los circuitos antiguos.

Al pasar los años, la electrónica y la tecnología comenzaban a surgir a nivel industrial, con algunos avances importantes como la llamada electrónica de estado sólido, aquella que permitió realizar la reducción en los elementos, sin perder potencialidades, con ello se podía también trabajar ahora en una disminución del tamaño de la placa en general.

Hacia los años 50, aparecieron figuras destacadas de esta área, Kilby de la empresa Texas Instruments Inc. y Noyce de la Corporación de Semiconductores Fairchild, quienes a lo largo de sus investigaciones comenzaron a desarrollar una estrategia para incluir una serie de finos caminos metálicos, que funcionaban como cables conductores, los cuales más adelante ayudarían a resolver las situaciones para la creación del cableado de los circuitos modernos. Pérez., Mandado, & Mandado (2007).

#### *4.1.3. Diseño*

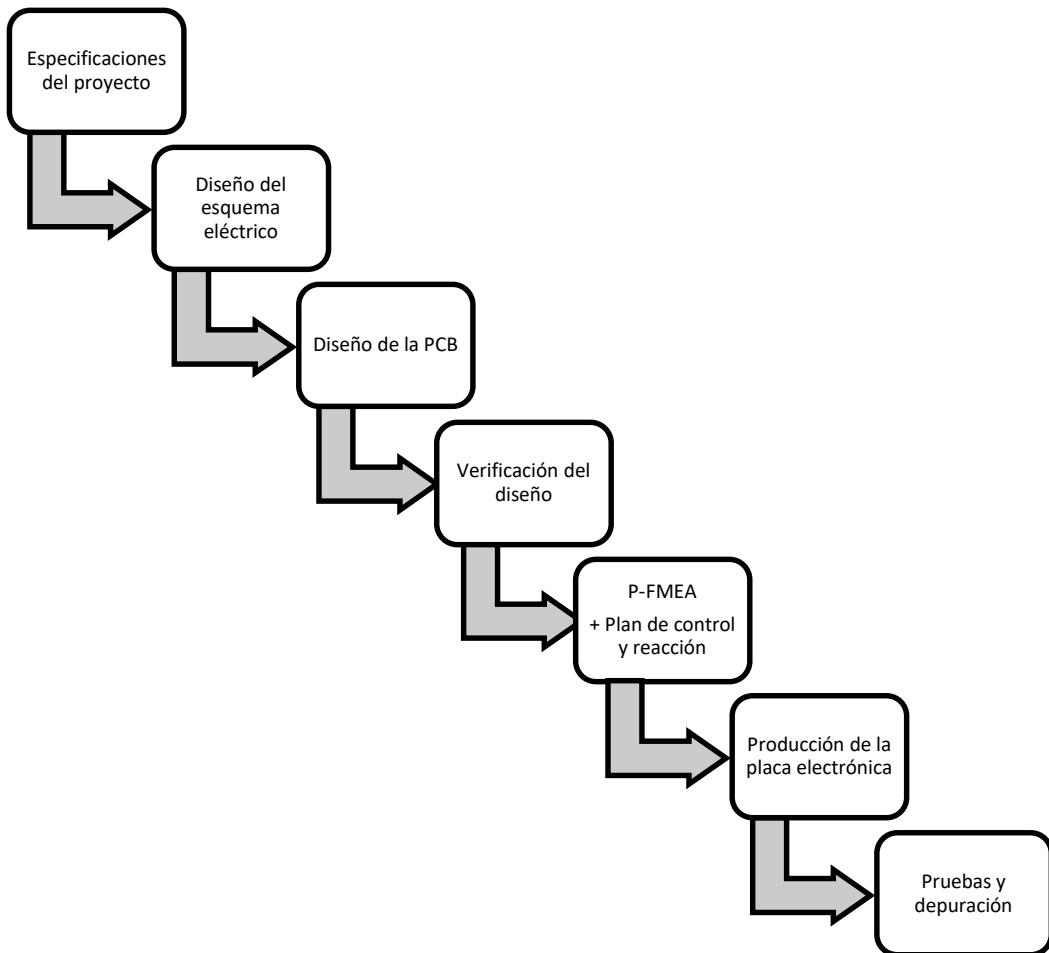
En este siglo los avances electrónicos y tecnológicos han fomentado el progreso y potencializado el acelerado desarrollo de este tipo de circuitos que cada vez pueden trabajar con un mejor rendimiento, mayor rapidez, capacidad sin que esto incremente el tamaño de la placa base.

Según Sola en 2003, los circuitos actuales son mucho más robustos y complejos, ya que pueden integrar en su estructura una cantidad significativa de componentes semiconductores en una sola pieza particular, que soporta y es capaz de trabajar con el flujo de corriente adecuado y facilitando la funcionalidad individual y conjunta de los elementos que se incrustan en el cristal.

Entendiendo que esta base u oblea de material de carácter semiconductor conocida como matriz, a pesar de ser aparentemente frágil en su estructura, se debe reconocer que está compuesta por varias capas que se encuentran interconectadas entre sí, aprovechándose de los niveles de abstracción que constituyen el fundamento y base de su funcionalidad.

La conexión que se logra con los componentes, debido al tamaño de la pieza y la estructura en general y de sus elementos, hace imposible incrustar de manera individual con soldadura, por ello el proceso se realiza de manera sistematizada a través de la automatización con maquinarias y lenguajes de programación con la finalidad de poder desarrollar los recorridos y la combinación que aumente la densidad de los componentes que permita cumplir con los requerimientos.

Para la creación de circuitos SMD, existe una fase previa que debe tenerse en cuenta para la línea de producción, la cual consiste en la preparación o planeación del circuito que se va a crear, ya que existen de diferentes tipos, por lo que se requiere anticipadamente realizar el diseño y planificación que antecede al proceso de fabricación como tal, en inglés se le denomina Product Development Process (PDP), cada empresa define el suyo propio, el nuestro simplificado contará con las siguientes etapas:



*Ilustración 1. Diagrama de flujo de proceso de diseño electrónico*

Como podemos observar en el diagrama anterior debemos de pasar por diferentes fases a la hora del diseño.

- Especificaciones del sistema: en esta fase establecemos los requisitos del proyecto, incluyendo objetivos, funciones necesarias y limitaciones de diseño. Este punto se suele realizar juntamente con el cliente.
- Diseño del esquema eléctrico: en esta fase se diseña el esquema eléctrico que describe como se contactarán los componentes de la placa electrónica. Esta fase suele implicar la selección de los componentes adecuados y la definición de los valores y características eléctricas de cada componente.
- Diseño de la PCB: en esta fase se crea el diseño físico de la placa electrónica, incluyendo la colocación de los componentes y la conexión de las pistas eléctricas que los unen. Esta fase puede incluir la selección de la forma y el tamaño de la placa, así como la

consideración de factores como la disipación de calor y la interferencia electromagnética.

- Verificación del diseño: antes de producir la palca electrónica, es importante verificar que el diseño sea funcional y cumpla con las especificaciones del proyecto. Esta fase puede incluir la realización de simulaciones y pruebas en el software de diseño, así como la revisión del diseño por parte de otros miembros del equipo y de cliente.
- P-FMEA, plan de control y plan de reacción: un P-FMEA (Potential Failure Mode and Effects Analysis), es una herramienta que nos permite analizar los riesgos de la producción para identificar y prevenir posibles fallos en el proceso. Se enfoca en identificar los posibles modos de fallo, su causa raíz y las posibles consecuencias con el objetivo de realizar un plan de acción y/o reacción contra estos.
- Producción de la placa electrónica: una vez verificado el diseño, se puede proceder a la producción de la palca electrónica, esto puede implicar la selección del método de producción adecuado (SMD, TH...), la preparación de los archivos de diseño para la producción y la coordinación con un fabricante de PCB para producir la placa.
- Pruebas y depuración: después de producir la placa electrónica se deben realizar pruebas y depuraciones para verificar que la palca funciona correctamente y cumple con las especificaciones del proyecto previamente establecidas. Esto puede implicar pruebas eléctricas, ambientales, mecánicas... en las que se deben identificar problemas en el diseño y su solución con la correspondiente documentación para evitarlo en referencias futuras. Además, también se debe realizar una validación de la línea de producción para verificar que en la línea que tenemos realizar el montaje de nuestro diseño es viable y capaz.

#### *4.1.4. Tecnología SMD*

La tecnología SMD (Surface Mount Device) ha revolucionado la industria electrónica al permitir diseños de circuitos más compactos y eficientes. En lugar de los componentes de montaje en agujeros convencionales, los componentes SMD se montan directamente en la superficie de la placa de circuito impreso (PCB), lo que reduce el tamaño

y el peso del circuito. Además, la tecnología SMD permite una mayor densidad de componentes en un área de PCB determinada, lo que aumenta la funcionalidad y el rendimiento del circuito. En esta sección se explorará la tecnología SMD en profundidad, desde los componentes SMD comunes hasta las técnicas de producción y verificación de calidad utilizadas en la fabricación de PCB con tecnología SMD.

#### 4.1.4.1. Componentes SMD

Los componentes SMD, ya sean activos o pasivos, funcionalmente no son diferentes a los componentes TH convencionales. Lo que les diferencia es el encapsulado, los componentes SMD aportan una mayor densidad de empaquetamiento debido a su pequeño tamaño.

Entre otras muchas ventajas del montaje en superficie, el ahorro de espacio es de vital importancia. Dado que el tamaño reducido es la principal ventaja de SMT, existe una demanda continua de tamaños más pequeños. Esto ha llevado al uso generalizado del paso fino (20 y 25 mil) y el paso fino ultrafino (0,5 mm o 20 mil y pasos inferiores) y las matrices de rejilla de bolas (BGA). Todos estos encapsulados de montaje superficial afectan no sólo a la superficie de la placa, sino también a las prestaciones eléctricas del dispositivo y el montaje. Además, debido a las diferencias de empaquetado de los componentes, las pérdidas parásitas como la capacitancia y la inductancia en los dispositivos de montaje superficial son considerablemente menores que las de la tecnología de orificio pasante.

Los embalajes de los componentes, además de ahorrar espacio y mejorar el rendimiento eléctrico, cumplen muchas otras funciones. Protegen los dispositivos que contienen del entorno, proporcionan enlaces de comunicación, reabsorben el calor y ofrecen un medio para manipulación y pruebas.

Este tipo de componentes tienen características comunes entre sí, por ejemplo, todos se montan sobre la superficie de la placa en vez de a través de un agujero que la atraviesa. Esto significa que la soldadura la cual nos proporciona las conexiones tanto mecánicas como eléctricas es muy importante para la fiabilidad del montaje.

Los componentes SMD son diseñados para cumplir los requerimientos de dos grandes tipos de aplicaciones, comerciales y militares. Los componentes destinados a aplicaciones comerciales con entornos benignos pueden usos encapsulados no herméticos en los cuales las temperaturas de funcionamiento oscilan entre 0 °C y 170 °C. Por otro lado, los destinados a uso militar o aplicaciones que requieren de alta

fiabilidad para ambientes severos usas estos encapsulados herméticos en un rango de funcionamiento de -55°C a 125°C.

Como hemos hablado anteriormente existen tanto componentes activos como componentes pasivos. A continuación, mostramos los diferentes tipos de componentes SMD y sus tipos.

- Capacitores SMD (cerámicos, tantalio, aluminio electrolítico)
- Resistencias SMD (película gruesa, película delgada, chip de metal, resistencias de montaje en superficie de alta potencia)
- Diodos SMD (diodos rectificadores, diodos Zener, diodos Schottky)
- Transistores SMD (BJT, FET, MOSFET)
- Inductores SMD (bobinas de chip, inductores de película fina, inductores multicapa, inductores de alta frecuencia)
- Condensadores de ajuste SMD
- Condensadores de filtro SMD
- Circuitos integrados SMD (microcontroladores, procesadores de señal digital, amplificadores operacionales, convertidores de datos)
- LEDs SMD (LEDs de montaje superficial, SMD LED RGB, LED de chip de alta potencia)
- Conectores SMD

#### 4.1.4.2. Técnicas de producción y verificación.

Las técnicas de producción y verificación que son necesarias y conocemos para la tecnología SMD son:

Producción:

- Marcado láser: se suele utilizar para marcar la PCB con un código 2D que nos permita identificarla para tener una trazabilidad sobre ella. No es imprescindible, pero si recomendable ya que tener un registro de la vida de esa pieza nos puede ayudar a identificar y solucionar diversos problemas.
- Serigrafía: es un proceso de impresión en el que se utiliza una pantalla para transferir la pasta soldante a los pads de la PCB.
- Pick and Place: Es una técnica de producción que implica el uso de máquinas automatizadas para colocar componentes SMD en la placa PCB. Los componentes se almacenan en carretes y la máquina utiliza una boquilla para recoger cada componente y colocarlo en su posición en la placa. Es una técnica rápida y precisa,

que permite producir grandes cantidades de placas electrónicas en poco tiempo.

- Soldadura (Reflow o soldadura por onda): Es una técnica de producción que implica el calentamiento de la placa PCB con los componentes SMD ya colocados, para fundir el estaño y establecer una conexión eléctrica sólida entre los componentes y la placa. Se utilizan hornos de reflow para este proceso, que calientan la placa PCB a temperaturas elevadas durante un período corto de tiempo.

#### Verificación:

- Inspección visual automática: Se realiza una inspección visual del circuito impreso para detectar cualquier anomalía, como componentes faltantes o mal colocados, problemas de soldadura o daños en la placa. Actualmente existen máquinas denominadas AOI (Automatic Optical Inspection ) tanto 2D como 3D que realizan esta tarea automáticamente.
- Inspección por rayos X: Es una técnica de verificación que implica el uso de rayos X para examinar la placa PCB y los componentes SMD en busca de problemas que no son visibles a simple vista. Esta técnica es especialmente útil para detectar problemas con soldaduras ocultas debajo de los componentes como BGAs o MOSFET.
- Pruebas eléctricas: Es una técnica de verificación que implica la medición de la resistencia, capacitancia, inductancia y otras propiedades eléctricas de los componentes y la placa PCB. Se utilizan equipos de prueba especiales para realizar estas pruebas y garantizar que la placa y los componentes funcionen correctamente. Normalmente en estas pruebas también es dónde se realiza la grabación en el microprocesador en caso de que el circuito producido lo necesite.
- Pruebas de funcionamiento: Se realizan pruebas de funcionamiento para verificar que el circuito funcione de acuerdo con los requisitos del diseño, utilizando equipos de prueba y herramientas de simulación para verificar su funcionamiento y estabilidad.
- Pruebas de envejecimiento: Es una técnica de verificación que implica someter la placa PCB y los componentes SMD a un estrés constante durante un período de tiempo prolongado, para simular

su uso real. Esta técnica es importante para garantizar la durabilidad y fiabilidad de la placa en condiciones extremas de uso.

En general, estos son las técnicas utilizadas, aunque pueden variar en función del proyecto dependiendo de los requisitos y diseño de este. Además, estas técnicas serán ampliadas en el siguiente punto.

#### *4.1.5. Procesos de producción SMD*

La producción SMD como antes hemos citado se compone de diferentes fases que dependen también de las exigencias de cliente, del tipo de placa... En nuestro caso contaremos con el marcado láser, serigrafía de pasta soldante, pick and place, soldadura por Reflow, inspección visual automática, inspección por rayos X, prueba eléctrica y prueba funcional. Por lo tanto, a continuación, explicaremos cada proceso.

- Marcado láser de CO2.

El marcado láser de CO2 utilizado en SMD para marcar circuitos impresos es una técnica que ofrece una alternativa a las tintas y productos químicos, siendo considerada una tecnología "verde" debido a su bajo impacto ambiental. El "laser marking" permite grabar una gran cantidad de información en un espacio reducido, como textos, códigos de barras y otros símbolos, lo que es especialmente útil en la identificación y trazabilidad de PCBs. Además, ofrece flexibilidad en términos de diseño al permitir la personalización de logotipos, números de serie y otros elementos visuales en los PCBs, lo que ayuda a fortalecer el branding y garantizar la autenticidad de los productos electrónicos.

En la industria de PCBs, el "laser marking" se aplica en sistemas de trazabilidad y control de procesos, permitiendo el seguimiento del flujo de producción, el monitoreo de calidad y la garantía de integridad de los circuitos impresos en diferentes etapas. Esto contribuye a mejorar la eficiencia y confiabilidad de los productos electrónicos, cumpliendo con los estándares y regulaciones de la industria.

- Serigrafía de pasta soldante.

Este es un proceso en el que vamos a serigrafiar o imprimir la pasta soldante sobre el circuito, para ello necesitamos una pantalla (Stencil), unas escobillas (Squeegee) con unos determinados parámetros de velocidad y presión y la pasta soldante.

El proceso se divide en 3 pasos, en el primero la pantalla apoya sobre la PCB coincidiendo los pads de la PCB donde queramos depositar pasta con las aperturas de la pantalla. En el segundo paso

la escobilla barrera en una dirección para llenar los huecos y depositar la pasta soldante en los pads correspondientes y finalmente en el tercer paso la pantalla se separa de la PCB.

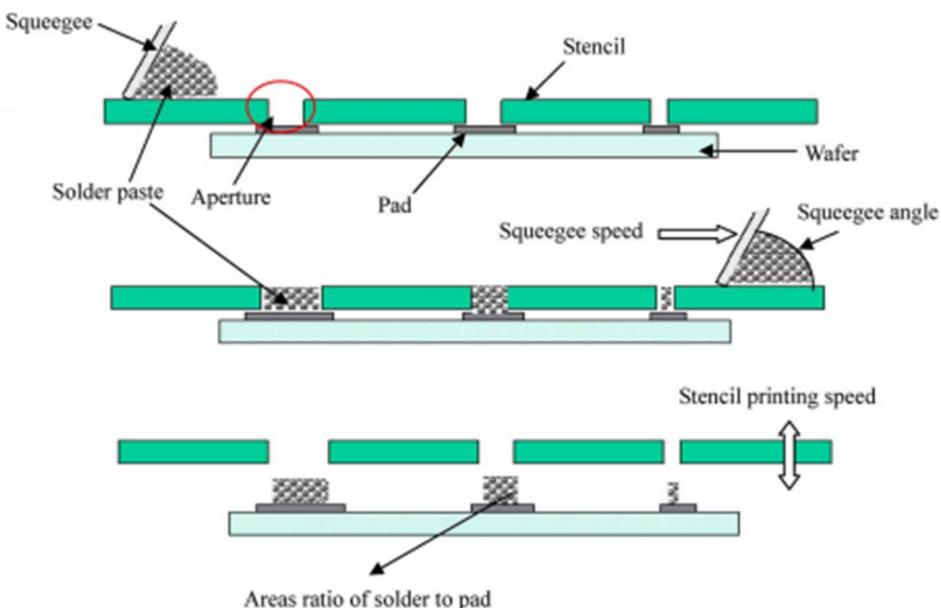


Ilustración 2 Proceso de serigrafía de pasta soldante.

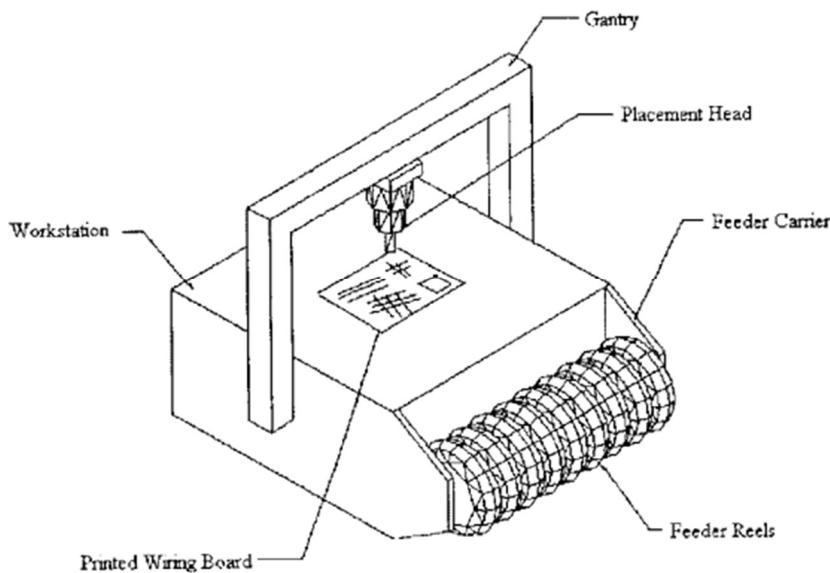
- Pick and place.

Las máquinas de colocación de componentes también llamadas "chip shooter", desempeñan un papel crucial en las líneas de SMD. Estas máquinas se han desarrollado para satisfacer los diversos requisitos de la industria electrónica. Si bien las implementaciones pueden variar, todas las máquinas comparten tres estructuras principales: el portador del alimentador (más comúnmente denominado carro), la cabeza de colocación y el sistema de soporte de la placa.

El portador del alimentador (carro) contiene una serie de ranuras donde se colocan los componentes en bobinas (suelen denominarse alimentadores o feeders en inglés). La cabeza de colocación recoge los componentes de las ranuras del alimentador y los coloca en la placa utilizando boquillas de vacío (están existentes de muchos tipos diferentes para poder coger todos los tipos de componentes existentes). El sistema de soporte de la placa posiciona y sostiene la placa durante el proceso de colocación. Algunas máquinas tienen múltiples estaciones, es decir pueden tener dos cabezas, con dos carros y diferentes estaciones de montaje, todo para mejorar el tiempo de ciclo.

El tiempo de procesamiento del "chip shooter" se divide en tiempo de recogida y colocación, y tiempo de cambio de

herramienta/reposición del alimentador. El tiempo de recogida y colocación depende del movimiento de la boquilla entre componentes y entre el portador y la placa. Cambiar la configuración de las bobinas para diferentes productos lleva tiempo, por lo que se prefiere una estrategia que minimice los cambios de configuración (muy importante estos cambios de configuración ya que son prácticamente el 95% de nuestro Set-up time, posteriormente mencionado en los indicadores).



*Ilustración 3 Esquema de una máquina de montaje superficial básica*

- **Soldadura por reflow:**

Este proceso permite una unión fiable y barata entre los componentes y el circuito, asegura una conexión electro-mecánica eficiente pero requiere de una parametrización compleja de temperaturas ya que consta normalmente de 4 zonas, el precalentamiento, el choque, el pico y el enfriamiento. Además, también puede contar con una fase de vacío para reducir la posibilidad de "Voids" (vacíos) en las soldaduras. Es complejo debido a que hay que tener en cuenta todos los componentes ya que según todos los fabricantes tienen unas temperaturas determinadas que no pueden alcanzar además de que se debe llegar a unas determinadas temperaturas durante determinado tiempo para conseguir una correcta soldadura (esto último depende de la pasta soldante que se esté utilizando). Por lo tanto, se debe desarrollar un perfil que cumpla con las especificaciones de todos los componentes y de la pasta soldante.

- **Inspección visual automática:**

En esta técnica se utilizan una o más cámaras junto a proyectores capaces de reproducir diferentes luces para examinar las placas de circuito impreso (PCB), y las imágenes capturadas se digitalizan y analizan mediante un ordenador que las compara a través de diferentes algoritmos con límites predefinidos.

Los equipos comerciales pueden inspeccionar entre 1 y 25 componentes por segundo, dependiendo de la precisión requerida. Además, los datos obtenidos se pueden utilizar fácilmente para realizar análisis estadísticos utilizando el ordenador del equipo.

Existen dos tipos de sistemas AOI: los sistemas bidimensionales (2-D) y los tridimensionales (3-D). Los sistemas 2-D ofrecen una imagen en dos dimensiones y no capturan información sobre la dimensión vertical durante el proceso. Por otro lado, los sistemas 3-D fueron desarrollados para superar las limitaciones de los sistemas 2-D, como la dificultad para analizar imágenes con bajo contraste y la incapacidad para medir alturas.

El sistema AOI se utiliza principalmente para inspeccionar la impresión de la pasta de soldadura que normalmente se denomina SPI (Solder paste inspection) y la colocación de componentes, ya que en estas situaciones los defectos son fácilmente visibles. Sin embargo, la calidad de las uniones soldadas es más difícil de inspeccionar. Aunque los sistemas tridimensionales tienen la capacidad de determinar los perfiles de las uniones, lo que los hace adecuados para esta operación.

- **Inspección por rayos X:**

Una máquina de rayos-X en una línea de montaje SMD (Surface Mount Device) es una herramienta utilizada para la inspección de componentes electrónicos montados en placas de circuito impreso. Su funcionamiento se basa en la emisión de rayos-X de alta energía disparado desde un tubo (normalmente inmóvil, el movimiento lo realiza la mesa donde se encuentra la placa y el detector) que atraviesan la placa y los componentes, su intensidad es reducida en proporción a la absorción de un material y este rayo es "recogido" por un detector que básicamente es una pantalla que cambia a fluorescente dependiendo de la intensidad de los rayos X recibidos, generándose una imagen visible del objeto que se está atravesando. Esta imagen es recogida por una cámara de alta resolución que digitaliza esta información posteriormente se procesa y al igual que en la AOI un algoritmo con unos parámetros y límites definidos decide si es buena o mala. De esta manera, se pueden identificar

posibles defectos, como componentes mal colocados, cortocircuitos, soldaduras defectuosas o conexiones incorrectas. Lo más normal es utilizarlas para detectar defectos que no pueden ser detectados por AOI como pueden ser los Voids.

Al igual que las AOI existen tanto en 3D como en 2D. Las 2D aportan la visión de una sola capa lo que puede llevar a cometer errores en cambio las 3D pueden mostrarte la reconstrucción completa de la soldadura, pero son muy lentas ya que tienen que recopilar gran cantidad de imágenes.

- **Pruebas eléctricas (ICT):**

Existen dos tipos de pruebas en circuito (ICT) análoga y digital. La prueba ICT análoga utiliza amplificadores operacionales para aislar y medir componentes pasivos y activos, mientras que la prueba ICT digital verifica que los componentes cumplan con las especificaciones establecidas en sus tablas de verdad. En la prueba digital, se generan estímulos basados en las tablas de verdad del componente y se analiza la salida para determinar si es correcta. Las fallas eléctricas más comunes detectadas mediante ICT son soldaduras abiertas y cortocircuitos, que pueden ser causados por problemas en la impresión de pasta, colocación de componentes o componentes erróneos, soldadura, diseño o fabricación del PCB y SMDs. La cobertura de la prueba ICT automatizada alcanza aproximadamente entre el 80% y el 85% de las terminales de las tarjetas, pero se procura evitar que aumente el tiempo total del ciclo del producto. A medida que aumenta la complejidad de los PCBs, la efectividad de la inspección por ICT disminuye.

- **Prueba funcional:**

La prueba funcional (FT) verifica si un producto electrónico funciona correctamente. Se divide en pruebas estáticas y dinámicas. En la prueba estática, el PCB se observa en un estado estático, mientras que en la prueba dinámica se estimula y se observa su operación. Ambos tipos de pruebas incluyen la aplicación de estímulos, la recolección de respuestas y la evaluación de las respuestas contra los estándares de funcionamiento adecuado. Si se detecta alguna falla, los sistemas de FT suelen tener rutinas de diagnóstico para identificar y localizar la falla en el PCB.

Además, un proceso de producción de SMD lleva siempre asociados unos indicadores que son utilizados para seguir el funcionamiento de la línea y muchos otros aspectos, en nuestro caso utilizaremos:

Tabla 1 Indicadores de producción

Nombre	Descripción
Tasa de rendimiento (Yield)	Porcentaje de productos funcionales en relación con la producción.
NRFT (Non-Recoverbale First Time)	Porcentaje de defectos detectados que no se pueden corregir sin necesidad de retrabajo o reproceso adicional.
Tasa de falsos fallos	Porcentaje de productos identificados erróneamente como defectuosos.
Tiempo de ciclo	Tiempo promedio para completar una unidad de producción
Costo por unidad producida	Tiempo necesario para cambiar la configuración de la línea
Producción Mínima rentable	Costo total de producción dividido por el número de unidades
OEE (Overall Equipment Efficiency)	Cantidad mínima de unidades para la rentabilidad

A continuación, explicaremos todos de manera más detallada.

- Tasa de rendimiento (Yield):

Es un indicador que midela eficiencia y efectividad de nuestro proceso de producción. Se refiere al porcentaje de productos o unidades que cumplen con los estándares de calidad y especificaciones establecidas en comparación con el total de productos producidos. Se cálcula:

$$Rendimiento(\%) = \frac{\text{Productos OK}}{\text{Productos OK} + \text{Productos NOOK}} \cdot 100$$

- NRFT (Non-Recoverbale Firs Time):

El %NRFT es un indicador de la producción que mide la eficiencia de las inspecciones y o pruebas que se realizan a la pieza. Su cálculo se realiza:

$$\%NRFT = \frac{\text{Productos OK}}{\text{Productos inspeccionados}} \cdot 100$$

Un alto valor de %NRFT es una buena señal ya que nos está diciendo que la mayoría de nuestros productos son OK, en cambio un bajo nivel nos indica que nuestros productos no están pasando la prueba o inspección.

Por lo tanto, el objetivo será siempre buscar el %NRFT más alto posible para garantizar una entrega de productos de calidad y minimizar los costes por los productos desechados.

- Tasa de falsos fallos:

Cualquier máquina de inspección tanto AOI, como rayos-X, como ICT y FT pueden tener falsos fallos que funciona de la siguiente manera:

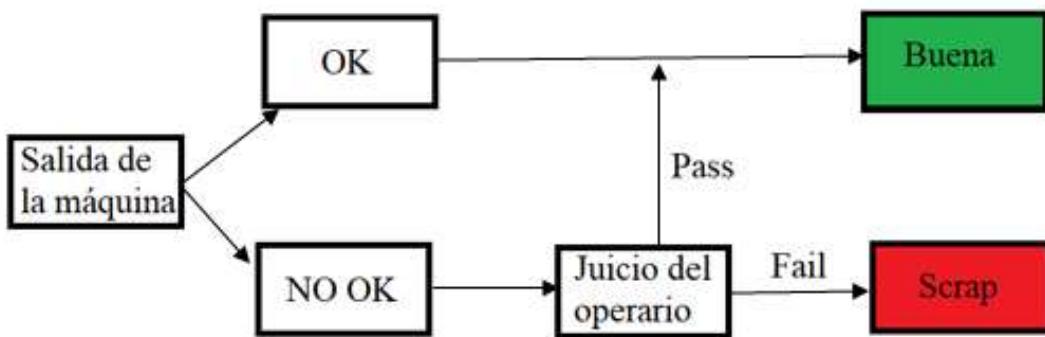


Ilustración 4 Funcionamiento máquina de inspección automática

Por lo tanto, la tasa de falsos fallos viene dada por el número de falsos fallos dividido por el número de inspecciones realizadas. Se calcula que cada falso fallo puede tener un costo de 0.65 céntimos. A parte del costo que puede llegar a generar el falso fallo por la no continuación de inspección de más placas, es decir se puede traducir en una micro parada de la línea (en caso de tenerla en línea) o un retraso de la producción también una tasa elevada de falsos fallos puede llevar al operario a cometer errores y pasar una pieza mala como buena. Por lo tanto, es importante realizar una buena depuración y mantenimiento de los programas para mantener esta tasa lo más baja posible. Aunque debe ser baja no debemos excedernos ya que puede significar que piezas malas estén pasando como buenas ya que por la propia naturalidad de las máquinas de inspección los falsos fallos forman parte de ellas.

- Tiempo de ciclo:

El tiempo de ciclo es el tiempo requerido para completar una unidad de producción es decir el tiempo que pasa desde que la PCB entra en la línea de producción hasta que sale como producto terminado incluyendo tanto el tiempo activo (realización del trabajo real) como el tiempo inactivo (espera de recursos o tareas secundarias).

Es un indicador importante para la planificación y gestión ya que nos permite evaluar la eficiencia y productividad de un proceso.

Reduciendo el tiempo de ciclo se aumenta la capacidad de producción y se disminuyen los tiempos de espera lo que se traduce en una mayor satisfacción del cliente y un negocio más rentable. Pero no hay que dejar de lado la calidad ya que si producimos muy rápido la calidad del producto puede llegar a disminuir e incluso podemos llegar a tener más piezas defectuosas y que esta mejora de tiempo de ciclo no aporte valor.

Su estimación la realizaremos a través de cálculo por número de componentes y placas similares en las mismas máquinas además de en compararlo con el tiempo de ciclo objetivo utilizando un VSM (Value stream map) Mapa de flujo de valor y del Takt time.

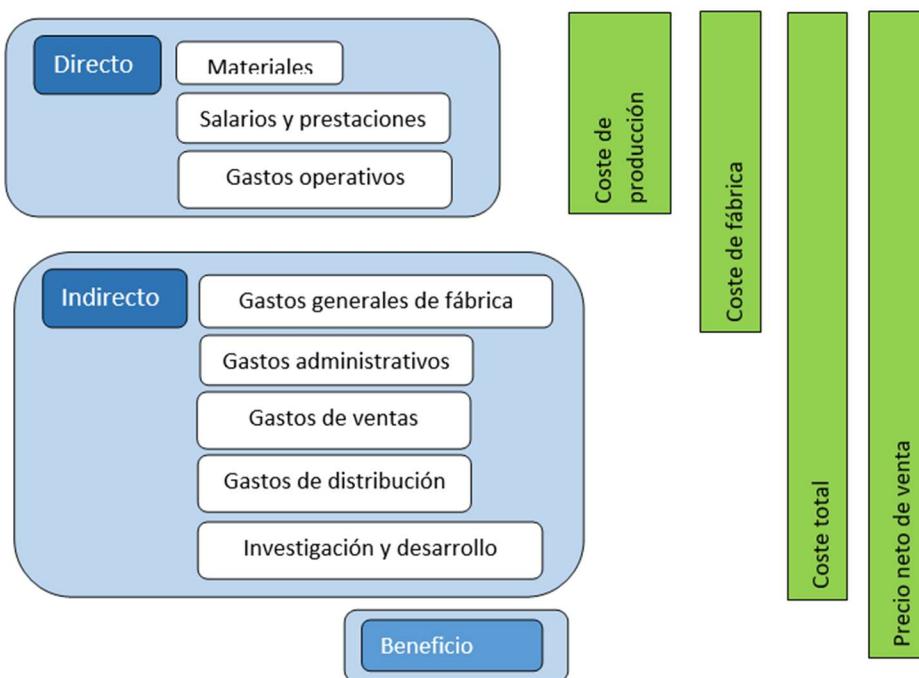
- **Tiempo de cambio:**

Se refiere al tiempo que se tarda en cambiar todo el set-up de la línea para fabricar otra referencia. Ya que no es un cambio simple y según lo eficiente que este diseñada y programada la línea puede ir desde horas hasta minutos. Este cambio incluye el cambio de programas en todas las máquinas, cambio de pantalla en la máquina de impresión, posible cambio de alimentadores en las pick and place y la espera al cambio de temperatura en los hornos ya que cada referencia tiene su propio perfil.

Aunque en nuestro caso no aplica ya que la línea que estamos diseñando es para una sola referencia. Aunque no suele ser lo habitual.

- **Costo por unidad producida:**

Identifica el coste por unidad producida. Este coste lo obtendremos teniendo en cuenta toda la estructura de coste de fabricación:



*Ilustración 5 Diagrama variables incluidas en el coste por unidad producida*

No se va a realizar de manera exhaustiva, pero se tendrán en cuenta de la siguiente manera los directos:

- Materiales: se tendrá en cuenta componentes, pcb, pasta soldante y vestimenta de operarios.
- Salarios y prestaciones: Salarios del personal necesario.
- Gastos operativos: Se tendrá en cuenta el coste de la luz.

Y los indirectos se tendrán en cuenta de manera superficial aplicando un precio X por unidad fabricada que se decidirá posteriormente.

- Producción Mínima Rentable (MPR):  
Se refiere a la producción mínima que debemos realizar al arrancar la línea para obtener un beneficio, su cálculo se realizará a través de la siguiente fórmula.

$$MPR = \frac{Cf}{PVu - CVu}$$

MPR = minimum production run (Producción mínima rentable)

Cf = costes fijos

PVu = precio de venta unitario

Cvu = coste variable unitario

- OEE (Overall Equipment Efficiency):

El OEE es una medida cuantitativa usada para medir la productividad de las máquinas en la fábrica. El OEE considera que la producción efectiva está compuesta por 3 elementos. Uno, las máquinas deben estar funcionando todo el tiempo planeado para la producción, dos, las máquinas deben producir con una velocidad óptima y tres las piezas deben de ser producidas acorde a la especificación. Este indicador nos permite monitores y mejorar la eficiencia del proceso de manufactura. Ayuda en el análisis sistemático del proceso y a identificar las posibles áreas problemáticas que afectan a la utilización de las máquinas. No es solo una métrica, sino que también proporciona un marco para mejorar el proceso.

Como hemos dicho anteriormente están compuesta por 3 elementos que nombraremos disponibilidad, rendimiento y tasa de calidad.

- Disponibilidad:

El tiempo que la máquina está disponible para la producción

$$\text{Disponibilidad}(\%) = \frac{\text{Tiempo de operación real}}{\text{Tiempo de operación planificado}} \cdot 100$$

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de operación planificado} \\ = \text{Tiempo total de turno} - \text{mantenimiento planeado}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de operación real} \\ = \text{Tiempo total de operación planificado} \\ - \text{mantenimiento no planeado} - \text{micro paradas} \\ - \text{tiempo de cambio}\end{aligned}$$

- Rendimiento:

Es la tasa de la velocidad de producción actual por la velocidad de producción ideal de las máquinas.

$$\text{Rendimiento} (\%) = \frac{\text{Tasa de explotación neta}}{\text{Tasa de velocidad de explotación}} \cdot 100$$

La tasa neta de explotación mide la consecución de una velocidad de procesamiento estable durante un periodo de tiempo determinado:

$$\text{Tasa de explotación neta} = \frac{\text{Total producido} \cdot \text{tiempo de ciclo real}}{\text{Tiempo de operación}}$$

La tasa de velocidad de explotación se refiere a la discrepancia entre la velocidad ideal y la velocidad real:

$$\text{Tasa de velocidad de explotación} = \frac{\text{Total producido} \cdot \text{Tiempo de ciclo real}}{\text{Tiempo de operación}}$$

- Índice de calidad:

Este elemento es usado para indicar la proporción de producción defectuosa del total del volumen producido:

$$\text{Índice de calidad} = \frac{\text{Total producido} - \text{Total desechado}}{\text{Total producido}} \cdot 100$$

El OEE será, por lo tanto:

$$OEE = D \cdot R \cdot Q$$

Donde D es disponibilidad, R rendimiento y Q calidad.

Dentro de este apartado cabe mencionar el "World Class OEE" usado normalmente como objetivo por las compañías. Este se refiere a tener el siguiente OEE:

Tabla 2 OEE World Class Value

Elementos del OEE	OEE World Class Value (%)
Disponibilidad	90%
Rendimiento	95%
Calidad	99%
OEE WORLD CLASS	$OEE = 0.9 \cdot 0.95 \cdot 0.99 = 95.7\%$

Aunque nosotros buscamos un objetivo más realista que sería del 85% de OEE teórico.

Su cálculo se realizará de manera automática a través del Excel adjuntado en anexos en el punto 2.2.4. Tasa de rendimiento y OEE.

## 4.2. DISEÑO DEL CIRCUITO

La placa electrónica que se va a diseñar corresponde a un sistema de elevación de tijera. El sistema por controlar cuenta con un actuador eléctrico un Draw Wire Sensor y dos finales de carrera y diferentes sensores.

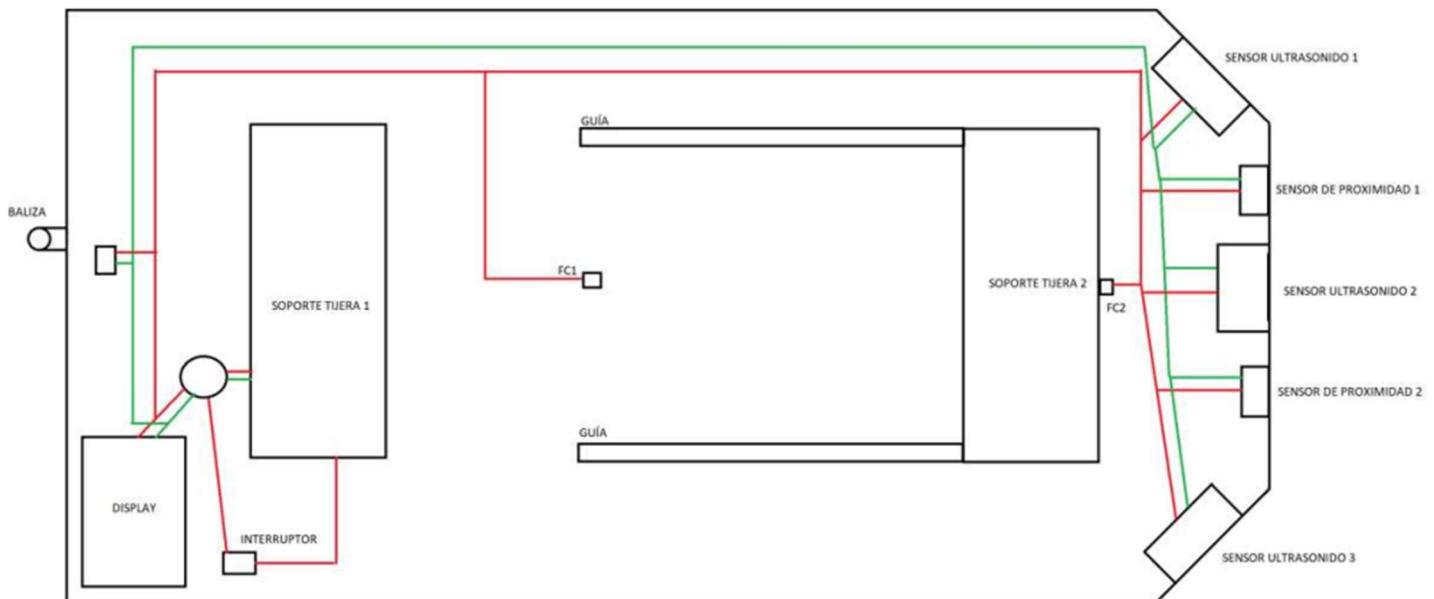


Ilustración 6 Lay Out vista planta robot de tijera

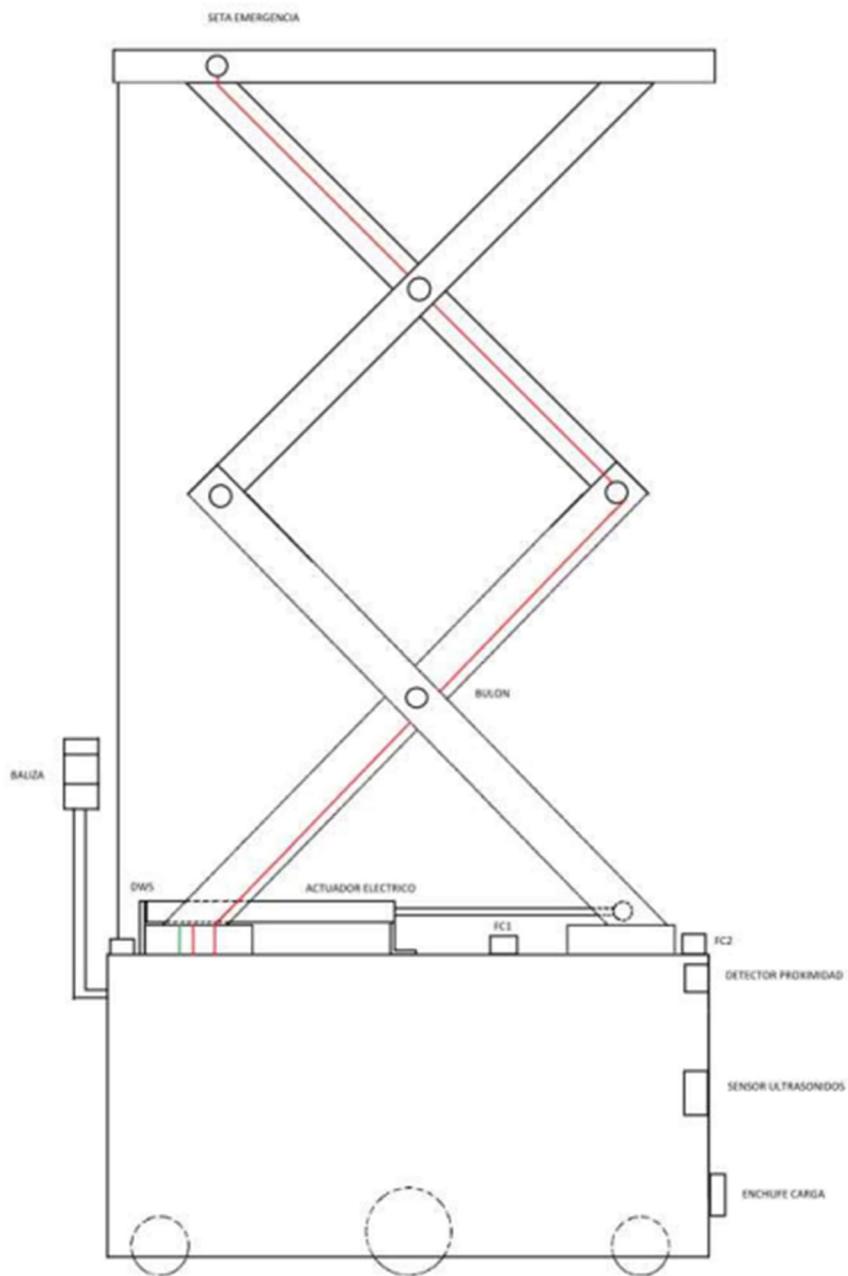


Ilustración 7 Lay Out vista perfil robot de tijera

En la vista de planta podemos observar cómo se distribuyen sobre el robot los diferentes componentes antes mencionados.

Finales de carrera (FC1, FC2) con los que conseguiremos saber si la tijera está recogida (FC2) o estirada (FC1).

En el perfil del robot observamos:

El actuador eléctrico colocado de forma horizontal.

En la izquierda observamos el DWS (Draw Wire Sensor).

Podemos observar más elementos del robot en estas vistas, pero los anteriormente destacados son los que necesitamos conocer para la realización de nuestra placa electrónica.

#### *4.2.1. Especificaciones del circuito*

Los elementos mencionados con anterioridad son los elementos que debemos de controlar con nuestra placa electrónica y que debemos de conocer cuáles fueron los seleccionados y sus características para poder ejecutar el diseño.

- Actuador: El actuador encargado de elevar y descender la plataforma es el FESTO EPCC-BS-60-300-12P-A. Se trata de un actuador de 300mm de carrear capaz de soportar una carga de 1000N en el eje Fx.
- Servo Motor: Motor que controlará el actuador, en este caso necesitamos una alimentación para el motor de 5V no regulada.
- Finales de carrera: Los encargados de delimitar el rango de movimiento son los finales de carrera OMRON D2HW.
- Draw Wire Sensor: consiste en un hilo que basa su funcionamiento en un potenciómetro, es el que proporciona la información de la altura. El que implementa este robot es el Draw Wire Sensor SX120 de la marca WAYCON.

Con estos tres elementos a controlar obtenemos las siguientes especificaciones:

- Voltaje de alimentación regulada para el control.
- Voltaje de alimentación no regulada para el actuador.
- Voltaje de alimentación de la placa de
- Alimentación de 5V para el Draw Wire sensor con una resolución de 1mV.
- Motor del actuador controlado por señal PWM.

Estos son requisitos por la naturaleza del robot, a estos le añadiremos un requisito más:

- Placa con un montaje SMD total.

## 4.2.2. Análisis y selección de componentes

En el diseño de cualquier circuito electrónico, uno de los aspectos más importantes es la selección adecuada de los componentes. Cada componente tiene características únicas que pueden afectar el rendimiento del circuito en términos de velocidad, precisión, estabilidad, fiabilidad, entre otros. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo un análisis detallado de los requisitos del circuito y seleccionar los componentes adecuados para cumplir con esos requisitos. En esta sección, se discutirá el proceso de análisis y selección de componentes en el diseño de circuitos electrónicos.

El primer punto que debemos abarcar es el control. El control del sistema se realizará a través de un microprocesador que sea capaz de recibir, transmitir y procesar la información, como siempre se debe intentar adecuarse a la potencia necesaria y buscar un precio adecuado por lo que en este caso elegiremos el ATMEGA328P, ya que no necesitamos gran potencia de procesamiento, es barato, sencillo e incorpora una salida PWM que necesitamos para el control del motor del actuador a parte de esta señal PWM también necesitamos de un puente en H para permitir que el motor pueda extender la tijera y contraerla. Este será el MC33926 aporta un control total sobre el motor del actuador, admitiendo frecuencias de señales de PWM de hasta 20kHz y que puede trabajar con corrientes de hasta 5A.

Una vez visto el control, necesitamos la alimentación que como hemos visto anteriormente necesitamos dos tensiones de alimentación distintas una regulada de 5V para los elementos de control y una no regulada para la alimentación del actuador. Para lo que necesitaremos una fuente comutada. En nuestro caso la fuente NB-636. Funciona con un rango de voltaje de entrada de entre 4.5V a 16V ya que la tensión de alimentación de la que disponemos es de 5V y que opera en un rango de salida de 0.8V a 13V con una frecuencia de 500kHz.

Estos son los 3 principales componentes a elegir, cada uno conlleva una configuración determinada con diferentes componentes como capacidores, resistencias, inductores...

para el correcto funcionamiento y protección. Además, también necesitamos llevar a la placa la alimentación, información... que será realizado a través de conectores. Para ello realizaríamos primero el esquema eléctrico de la placa cuyo esquema se encuentra en los anexos en el punto 1.1.1. Esquema eléctrico, con la elección de componentes correspondiente:

Comenzamos con el conector denominado J1. Conector por el cual entrara la tensión sin regular, es decir se refiere al conector de alimentación. Debe ser un conector robusto para soportar la tensión y las corrientes relativamente altas. Por lo tanto, utilizaremos un conector de tipo jack en concreto conectores coaxiales WR-MMCX 5.08MM SMT PCB JACK-ST de Wurth Elektronik.



*Ilustración 8 Conector coaxial*

Para el correcto funcionamiento debemos configurar la alimentación con protección contra polaridad inversa donde necesitaremos un transistor (Q1), un diodo D1 y una resistencia (R1):

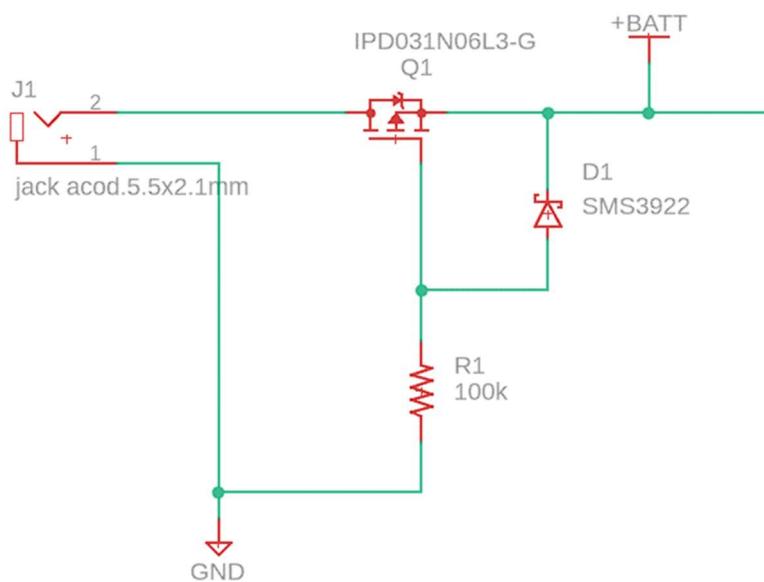


Ilustración 9 Alimentación con protección de polaridad inversa

- Transistor (Q1): Transistor MOSFET de tipo P que en caso de que la fuente se conecte de forma inversa, el voltaje base-emisor será cero por lo que el MOSFET se mantendrá en corte y no conducirá. Por el contrario, si la fuente se polariza correctamente.
- Diodo (D1): Diodo Schottky encargado de proteger el MOSFET en caso de trabajar a tensiones mayores a su tolerancia. En nuestro caso necesitamos uno con una tensión de ruptura de 5V.
- Resistencia (R1): En este tipo de circuitos la función de la resistencia de puerta es mantener polarizada la puerta del MOSFET y evitar oscilaciones durante sus comutaciones debido a las capacidades parásitas de puerta. Normalmente con valores de 100K o similares funcionan perfectamente por lo tanto nuestra R1 será una resistencia de 100KΩ.

Una vez finalizada la alimentación, pasamos a la fuente conmutada a la que llega la tensión. Como vimos anteriormente la seleccionada fue la NB-636 cuya configuración en el datasheet es la siguiente:

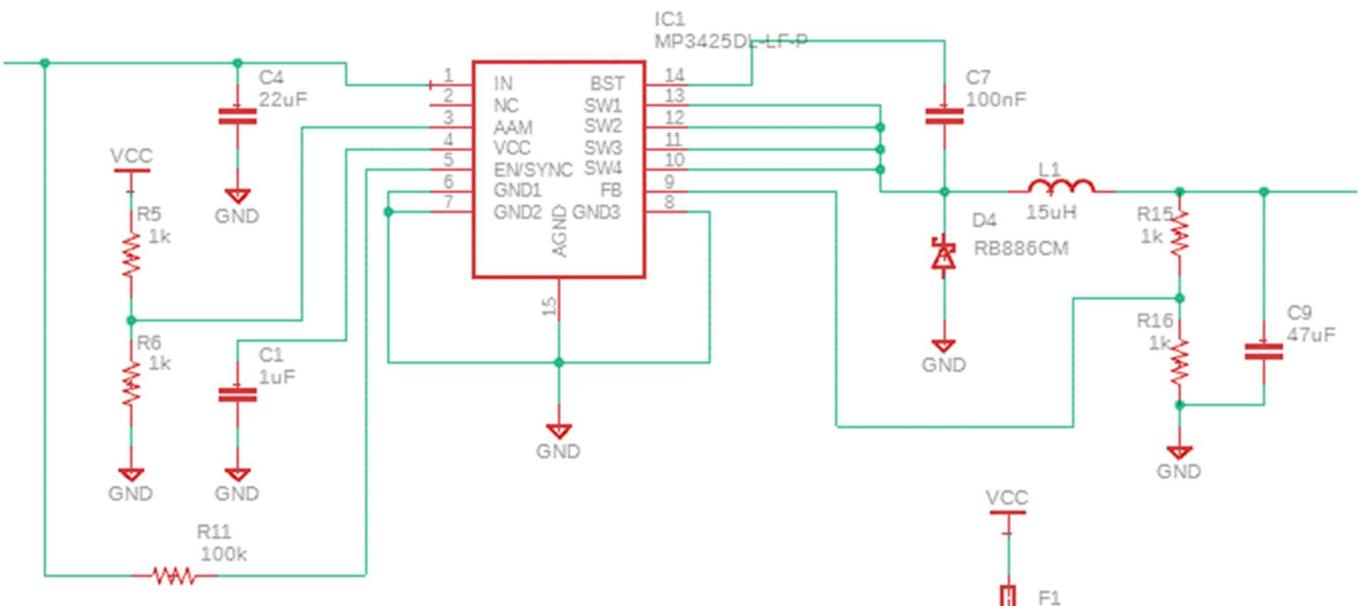


Ilustración 10 Esquema eléctrico fuente conmutada NB-636

Solo existe una diferencia y es a la salida ya que la tensión nuestra es distinta a la planteada en el datasheet. Los cambios realizados fueron en D4, R15, R16 y L1

- Diodo Schottky (D4): como el fabricante indica debe ser un diodo Schottky igual a nuestra tensión de salida (5V).
- Inductor (L1): El cambio de valor viene dado por la consulta de otro datasheet de una fuente conmutada con características similares en concreto es la fuente conmutada TPS5450 y que en el ejemplo el voltaje de salida es igual al nuestro (este caso sería bueno probar con el valor del datasheet del fabricante de la NB-636 y como este que indicamos realizando dos prototipos y viendo cual es el mejor funcionamiento).
- Resistencia (R15, R16): Elegidas en función de las recomendaciones de fabricante según la siguiente tabla:

*Tabla 3 Valores de resistencia en función de la tensión de salida*

<b>Vout (V)</b>	<b>R1 (KΩ)</b>	<b>R2 (KΩ)</b>	<b>Rt (KΩ)</b>
1.05	4.99(1%)	15.8(1%)	24.9(1%)
1.2	4.99(1%)	10(1%)	24.9(1%)
1.5	4.99(1%)	5.76(1%)	24.9(1%)
1.8	4.99(1%)	4.02(%)	24.9(1%)
2.5	40.2(1%)	18(1%)	0
3.3	40.2(1%)	12.7(1%)	0
5	40.2(1%)	7.68(1%)	0

Por lo tanto, como nuestra tensión de salida es de 5V,  $R_{15} = 40.2\text{K}\Omega$  y  $R_{16} = 7.68\text{K}\Omega$ .

De la salida de la fuente commutada pasamos microprocesador en primer lugar donde hemos puesto en función del datasheet la siguiente configuración:

Lo primero que observamos es la alimentación del micro donde encontramos dos condensadores de desacoplo escogido de  $100\text{nF}$  (valor estándar en este tipo de aplicaciones).

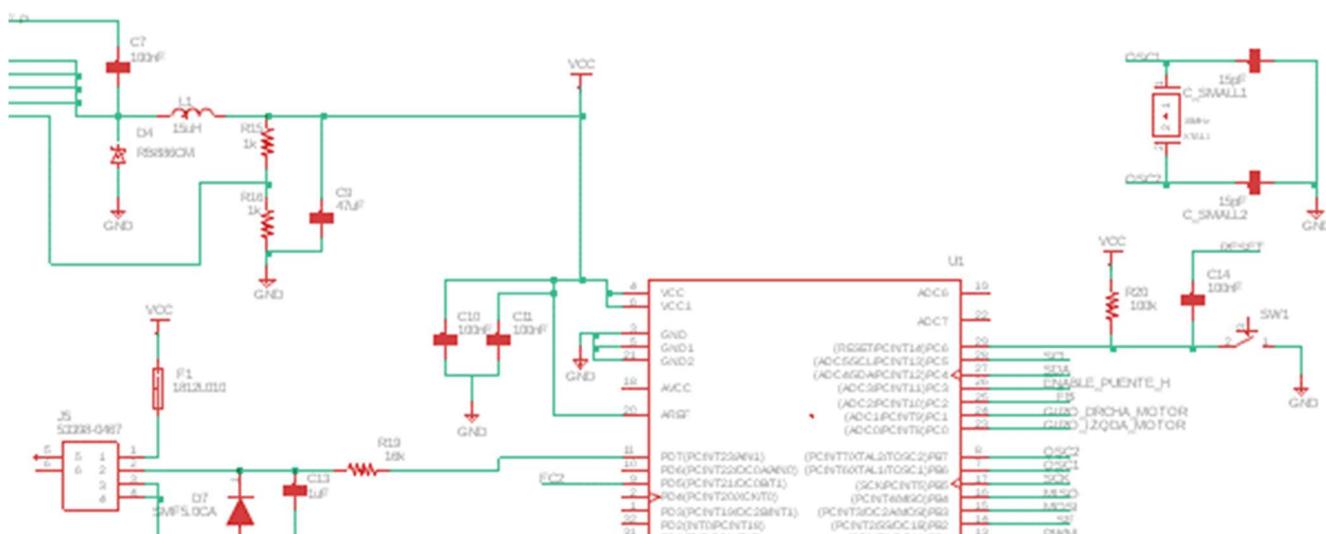


Ilustración 11 Esquema configuración microprocesador ATMEGA328P



Los pines los explicamos a continuación:

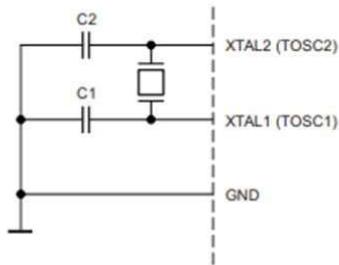
- PB0 a PB7: como indica la tabla del datasheet son conectados:

Tabla 4 Pines PB ATMEGA328P

PIN	FUNCIONES
PB7	XTAL2(chip clock oscillator pin 2) TOSC2 (timer oscillator pin 2) PCINT7(pin change interrupt 7)
PB6	XTAL1(chip clock oscillator pin 1) TOSC21(timer oscillator pin 1) PCINT6(pin change interrupt 6)
PB5	SCK (SPI bus master clock input) PCINT5 (pin change interrupt 5)
PB4	MISO (SPI bus master input/slave output) PCINT4 (pin change interrupt 4)
PB3	MOSI (SPI bus master output/slave input) OC2A (Timer/Counter2 output compare match A output) PCINT3 (pin change interrupt 3)
PB2	SS (SPI bus master slave select) OC2B (Timer/Counter1 output compare match B output) PCINT2 (pin change interrupt 2)
PB1	OC1A (Timer/Counter1 output compare match A output) PCINT1 (pin change interrupt 1)
PB0	ICP1 (Timer/Counter1 input capture input) CLKO (divided system clock output) PCINT0 (pin change interrupt 0)

También hay que destacar que el pin PB1 es la salida PWM requerida y PB6 y PB7 es donde encontramos conectado el oscilador, cuya configuración es la indicada en el datasheet:

Figure 8-2. Crystal Oscillator Connections



The low power oscillator can operate in three different modes, each optimized for a specific frequency range. The operating mode is selected by the fuses CKSEL3..1 as shown in Table 8-3.

Table 8-3. Low Power Crystal Oscillator Operating Modes<sup>(2)</sup>

Frequency Range (MHz)	Recommended Range for Capacitors C1 and C2 (pF)	CKSEL3..1
0.4 to 0.9	—	100 <sup>(1)</sup>
0.9 to 3.0	12 to 22	101
3.0 to 8.0	12 to 22	110
8.0 to 16.0	12 to 22	111

Ilustración 12 Configuración oscilador

Donde para C1 y C2 escogemos un valor de 15pF como valor estándar y dentro de los rangos indicados en la tabla anterior.

Los siguientes puertos son los correspondientes al puerto C de 7 bits utilizados para el control del motor, la comunicación de datos con la placa principal y el último bit, el pin PC6 configurable como reset.

Esta configuración de reset se realiza a través de un botón (SW1A) con una resistencia (R20) pull-up y además un condensador de 100nF en otra rama que se dirige hacia el conector ICSP a través del cual se realizaría la programación del microcontrolador.

Finalmente, en lo que a la configuración del microcontrolador se refiere encontramos el puerto D, de 8 bits donde conectaremos los finales de carrera al pin PD0 y PD5 y el DWS.

En primer lugar, el conector J5, es el correspondiente al DWS, en concreto es un conector 0533980467 de Molex, no necesitamos que sea robusto como el anterior ya que a través de él van a circular datos y es una conexión de 5V en el pin de alimentación.

Esta conexión de datos mencionada debe tener una producción con EDS la cual se realiza a través de un diodo TVS y un filtro de paso bajo.

- Diodo (D7). El diodo TVS necesario será el SMF5.0CA, que tiene una tensión de ruptura de 5V es decir cualquier tensión superior a

esta pondría el diodo a conducir lo cual es lo necesario ya que nuestro sensor y microprocesador funcionan con esos 5V.

- Filtro RC de paso bajo. Necesario para atenuar las señales de alta frecuencia generadas por descargas electroestáticas. La única señal que nos interesa es la del DWS la cual es analógica por lo tanto es una señal continua. Por lo tanto filtraremos como valor estándar frecuencia de 10Hz. Y suponiendo un capacitor (C13) de  $1\mu F$  obtenemos una resistencia (R19):

$$F_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 1\mu F} = 10\text{Hz} \rightarrow R_{19} = 16k\Omega$$

- Fusible FS1: fusible que protege el draw wire sensor.

En segundo lugar, encontramos los finales de carrera.

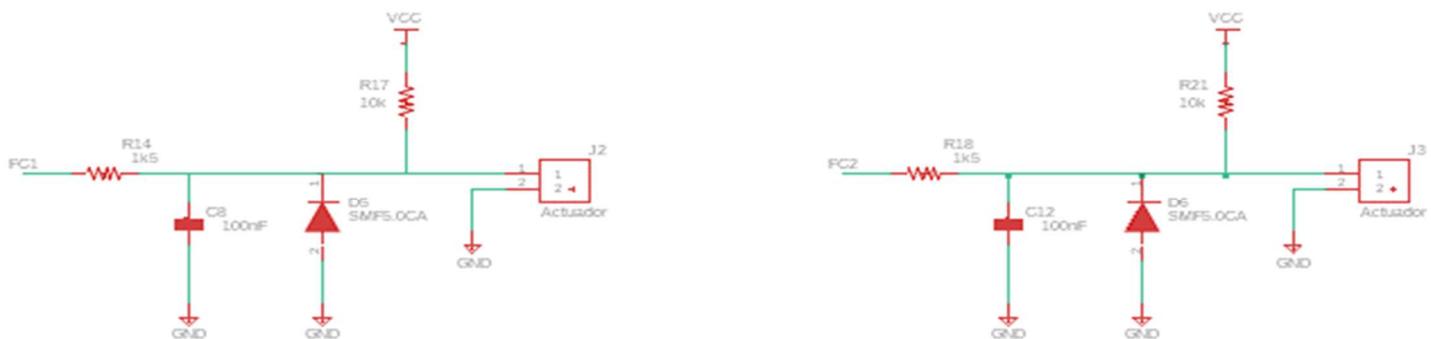


Ilustración 13 Esquema eléctrico finales de carrera

Encontramos un pull-up estándar con una resistencia (R17, R21) de 10k y de la misma manera que en el caso del DWS al ser una transmisión de datos aplicamos una protección TVS pero en esta caso con una frecuencia de corte de 1kHz. Por lo tanto, suponiendo un capacitor del filtro de paso bajo de 100nF (C8, C12) tenemos una resistencia:

$$F_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 100nF} = 1\text{kHz} \rightarrow R_{17} = R_{21} = 1k5\Omega$$

En tercera instancia tenemos las conexiones para la programación del microprocesador donde simplemente necesitamos un conector ICSP (J2) y llevar las conexiones hasta allí.

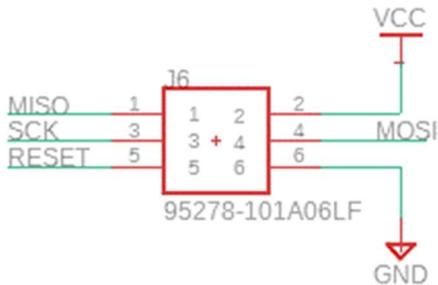


Ilustración 14 Esquema eléctrico conector ICSP

A continuación, tenemos la conexión de datos con lo que sería la placa principal.

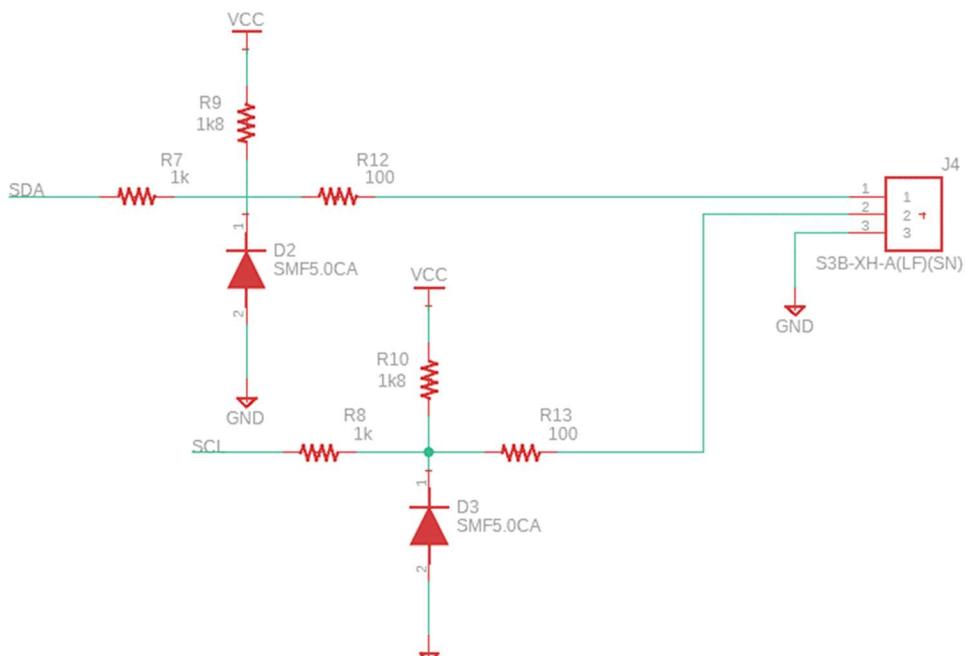


Ilustración 15 Esquema eléctrico conexión de datos con placa principal

De la misma manera que en los casos anteriores al tener una conexión de datos contamos con el diodo de protección TVS pero en este caso no utilizamos FC si no que utilizaremos resistencia de protección contra sobre corrientes (R7, R8, R12 y R13), con los correspondientes valores indicados en el esquema.

Finalmente queda analizar las conexiones del puente en H.

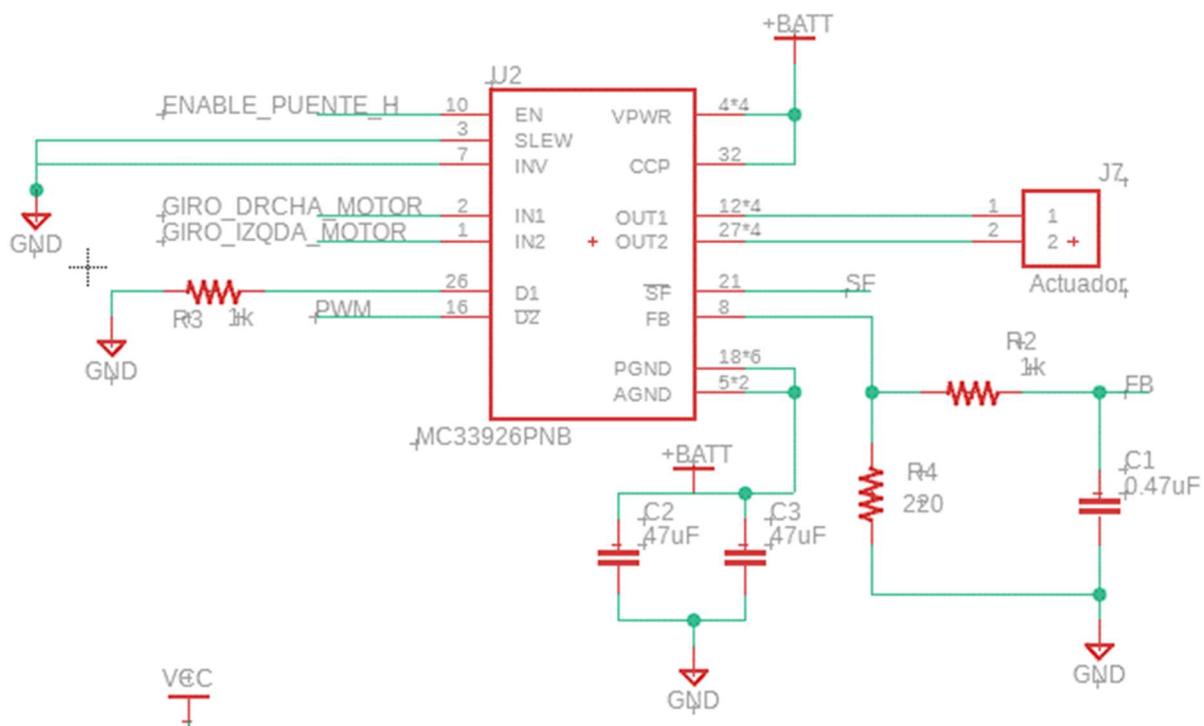


Ilustración 16 Esquema eléctrico configuración puente en H

Todos los valores escogidos:

- R3, R2 = 1kΩ
- R4 = 220Ω
- C1 = 0.47μF
- C2, C3 = 47μF
- C6 = 33nF

Son escogidos así por un esquema de referencia encontrado en una aplicación similar.

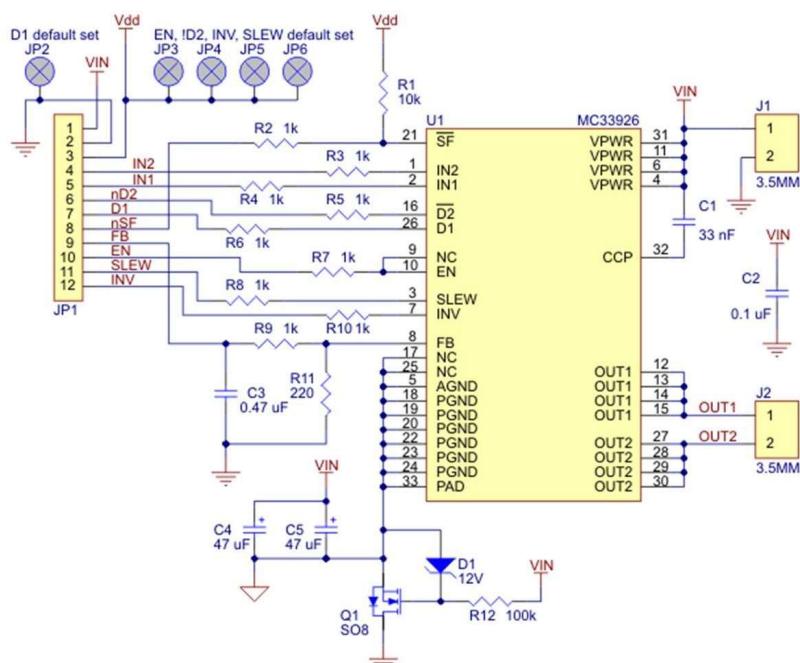
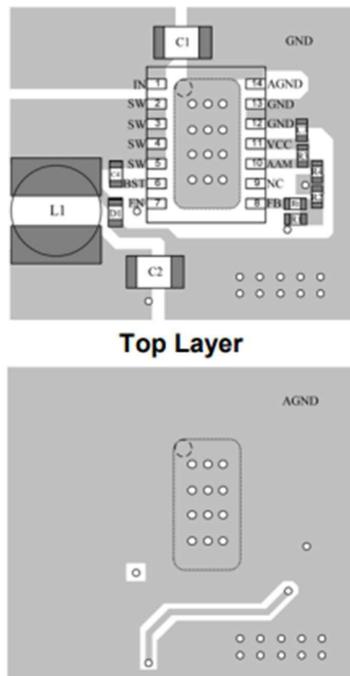


Ilustración 17 Esquema eléctrico de referencia puente en H (MC33926)

Tras haber realizado el esquema eléctrico obtendríamos una lista de materiales encontrada en los anexos en el punto 3.2. Lista de materiales que se utilizará en el futuro. Por otro lado, ahora debemos pasar al diseño 3D de la pieza donde el único requisito específico que encontraremos ocurría con nuestra fuente conmutadora (NB-636), ya que para su correcto funcionamiento debemos tener la siguiente



### *Ilustración 18 Configuración NB-636*

configuración:

## 4.3. PRODUCCIÓN SMD DEL CIRCUITO

En este apartado desarrollaremos todo el aprovisionamiento de materiales, maquinaria, posibles problemáticas y cálculos para el diseño de materiales. A continuación, vamos a tomar las decisiones suponiendo que por semana se necesitan producir 1000 piezas OK.

### 4.3.1. Preparación de los materiales y equipos necesarios.

El primer material que prepararemos serán los componentes SMD que vamos a montar en nuestro circuito que previamente hemos diseñado, la discusión sobre que materiales son los elegidos la encontramos en los anexos en el punto 3.1. Preparación de materiales y equipo necesario y finalmente la lista de materiales que nos queda es la siguiente.

Tabla 5 Lista de Materiales

Can tida d	Valor	Dispositivo	Package	Element os	Precio	Precio por placa
1	-	PCB	-	PCB	1,32000 €	1,32000 €
1	-	117-70-5426-2410-ND	-	PASTA SOLDANTE	199,83000 €	0,19983 €
1	0.47uF	CC0805CRNPO9B NR47	CAPC2012X110	C1	0,02200 €	0,02200 €
2	100	RC0805FR-07100RL	RESC2012X65	R12, R13	0,06100 €	0,12200 €
3	100k	CR0805AFX-1003ELF	RESC2012X65	R1, R11, R20	0,01000 €	0,03000 €
6	100nF	600F0R1BT250XT /600F0R1AT250T	CAPC2012X110	C7, C8, C10,C11,C12,C14	0,51580 €	3,09480 €
2	10k	RC0805JR-0710KL	RESC2012X65	R17, R21	0,00647 €	0,01294 €
2	15pF	C0805C150J5GAC7800	CAPC2012X110	C_SMALL 1, C_SMALL 2	0,01890 €	0,03780 €

<b>Can tida d</b>	<b>Valor</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Package</b>	<b>Element os</b>	<b>Precio</b>	<b>Precio por placa</b>
1	15uH	74438335150	INDC1006X60N	L1	0,59368 €	0,59368 €
1	16MHz	ECS-2333-160-BN-TR	XTAL1170X500 X450N	XTAL1	0,45360 €	0,45360 €
1	16k	RMCF0805JT16K0	RESC2012X65	R19	0,00448 €	0,00448 €
1	1812L0 10	1812L010DR	FUSC4532X125	F1	0,20900 €	0,20900 €
8	1k	RC0201FR-071KL	RESC2012X65	R2, R3, R5,R6,R7, R8, R15, R16	0,00511 €	0,04088 €
2	1k5	RMCF0805FT1K50	RESC2012X65	R14, R18	0,00396 €	0,00792 €
2	1k8	RMCF0805FT1K50	RESC2012X65	R9, R10	0,00322 €	0,00644 €
2	1uF	CC0805CRNPO9BNR 47	CAPC2012X110	C5, C13	0,05580 €	0,11160 €
1	220	RC0805JR-07220RL	RESC2012X65	R4	0,00647 €	0,00647 €
1	22uF	CL21A226KOQNNNE	CAPC2012X110	C4	0,07798 €	0,07798 €
2	47uF	CL32A476KOJNNNE	CAPC1210X110	C2, C3	0,18610 €	0,37220 €
1	47uF	CL21A476MQYNNNE	CAPC2012X110	C9	0,06401 €	0,06401 €
1	B3U- 1100P( M)-B	B3U-X100B3U- 1100P(M)- B1100P(M)-B	B3U-1100P(M)- B	SW1	0,56582 €	0,56582 €
4	CON	S2B-PH-SM4- TB(LF)(SN)	S2B-PH-SM4- TB(LF)(SN)	J2, J3, J4, J7	0,16100 €	0,64400 €
1	CON_D WS	53398-0467	533980467	J5	0,65500 €	0,65500 €
1	CON_IC SP	95278-101A06LF	95278- 101A06LF	J6	0,60563 €	0,60563 €
1	IPD031 N06L3- G	IPD135N03LGATMA1 /IPD090N03LGATMA 1	DPAK228P998X 235-3N	Q1	0,29500 €	0,29500 €
1	MC339 26PNB	MC33926PNB	QFN80P800X80 0X220-33N	U2	6,50000 €	6,50000 €
1	MP342 5DL-LF- P	MP3425DL-LF-P	SON50P300X40 0X100-15N	IC1	1,00000 €	1,00000 €
1	Power	66012102111404	660121021114 04	J1	4,37640 €	4,37640 €
2	SMS392 2	RB886CMT2R/RB886 CMT2RA	SODFL3718X11 5	D4, D1	0,10100 €	0,20200 €

Cantidad	Valor	Dispositivo	Package	Elementos	Precio	Precio por placa
5	SMF5.0 CA	SMAJ5.0A-E3/61	SODFL3618X10 8N	D2, D3, D5,D6,D7	0,07900 €	0,39500 €
1	U1	ATMEGA328P-AU	TQFP-32	U1	2,07000 €	2,07000 €
					Total por unidad	<b>24,09648 €</b>

Con todos estos materiales finalmente diseñamos nuestra placa en 3D que es la siguiente:

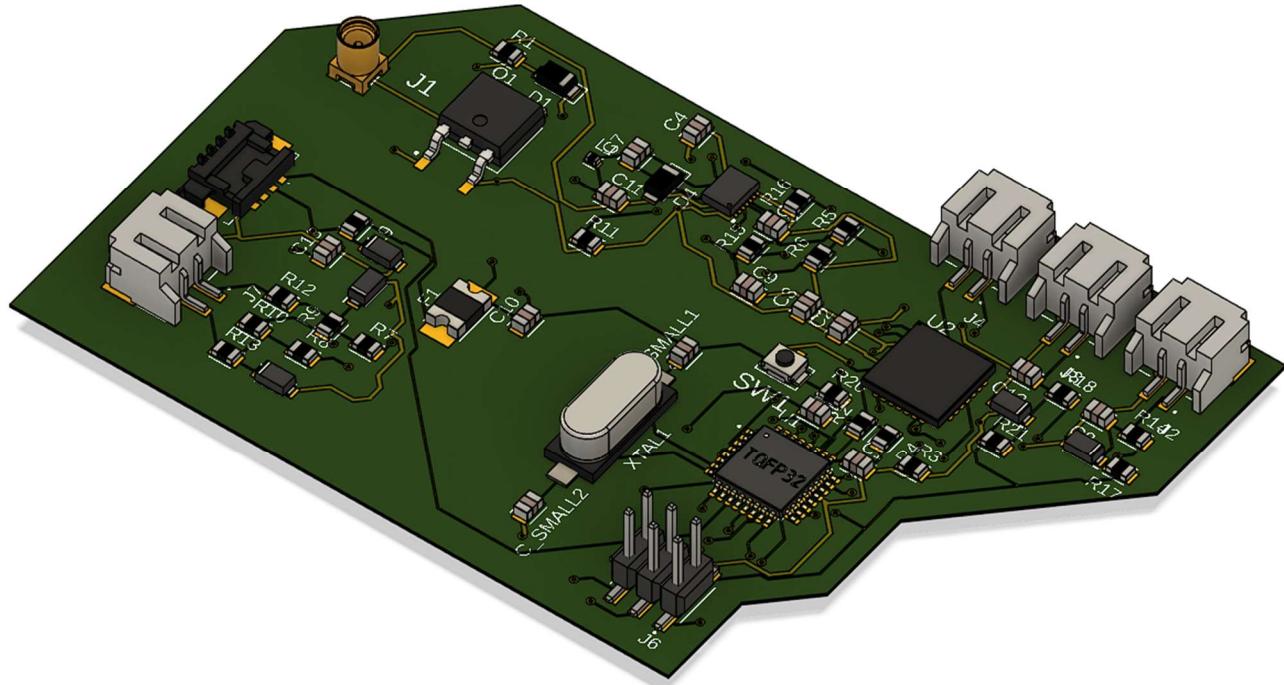


Ilustración 19 Diseño 3D

Para conocer el tiempo de ciclo necesario y poder seleccionar las máquinas vamos a realizar un mapa de flujo de valor de la línea de SMD. Incluido en los anexos en el punto 3.3. Mapa flujo de valor.

Como podemos observar en este mapa de flujo de valor tenemos en cuenta todas las estaciones de las que dispondremos, grabado láser, impresión de pasta, inspección de esta impresión, montaje P&P, AOI Pre-reflow, reflow, AOI, rayos-x e ICT, además del tiempo de tener en cuenta la llegada de material y la partida hacia el cliente. Hemos supuesto un día de acondicionamiento de material antes de entrar a producción y un

día de preparación del material para llevarlo a cliente, luego de pasos entre máquina hemos puesto 3 segundos por cinta transportadora y un tiempo X para cada proceso. Entre AOI y rayos X no hay conveyor si no que no estarán en línea ya que rayos-x suele ser un proceso bastante lento y sería cuello de botella en la línea por lo que hemos supuesto un periodo de 0.25 días, es decir 6 horas desde que una pieza sale de la línea hasta que pasa por rayos-x y de la misma manera de rayos-x a ICT. Esto nos deja un “Production lead time” de 60 horas más el tiempo de ciclo total por las mil piezas semanales que debemos enviar. Estudiaremos dos casos, trabajando en 2 turnos de 8 horas cada uno o trabajando 3 turnos de 8 horas. Ambos 5 días a la semana:

- 2 turnos:

Implica un total de 80 horas de trabajo semanales con el que debemos de tener un tiempo de ciclo:

$$80 = 60 + \sum x \cdot 1000 \rightarrow \frac{80 - 60}{1000} = \sum x \rightarrow \sum x = 0.02 \text{ horas}$$
$$= 72 \text{ segundos}$$

- 3 turnos:

Implica 40 horas más de trabajo semanal lo que son 120 horas por lo que nuestro tiempo de ciclo máximo sería:

$$120 = 60 + \sum x \cdot 1000 \rightarrow \frac{120 - 60}{1000} = \sum x \rightarrow \sum x = 0.06 \text{ horas}$$
$$= 216 \text{ segundos}$$

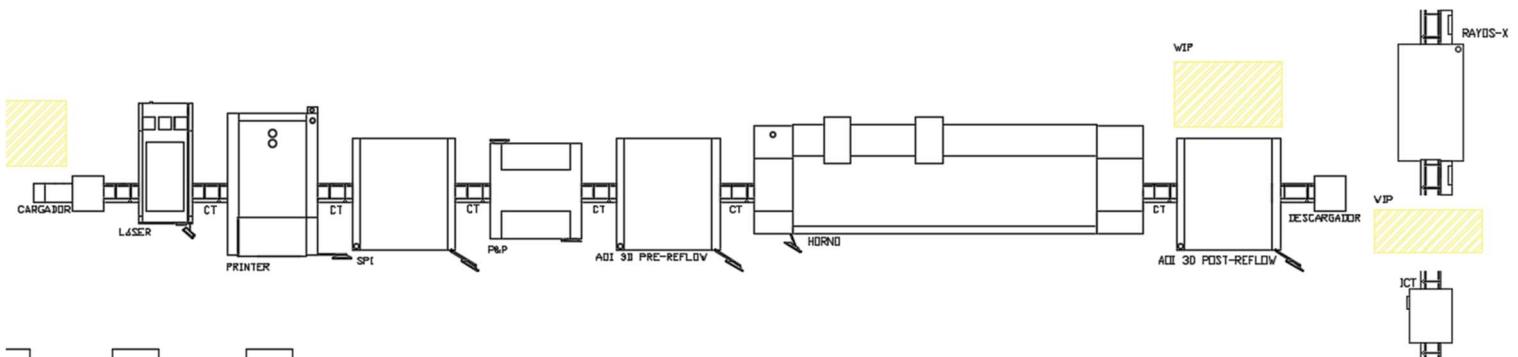
Por lo tanto vemos dos opciones de Tiempos de ciclo, 72 segundos y 216 segundos. Hay que estudiar ambos a la hora de elección de las máquinas y ver que es más barato si 3 turnos con máquinas más lentas (normalmente más baratas) o 2 turnos con máquinas más rápidas (normalmente más caras). Por lo tanto comenzaremos con el estudio de las diferentes máquinas.

La maquinaria debemos seleccionarla a parte de centrarnos en el tiempo de ciclo, debemos tener en cuenta el precio, si existe soporte en España y además luego las propias características de cada tecnología. En los anexos en el punto 3.1. Preparación de materiales y equipos necesarios se realizan los diferentes estudios de la maquinaria y finalmente las elegidas son:

*Tabla 6 Presupuesto y tiempos de ciclo maquinaria*

Tecnología	Proveedor	Máquina	Tiempo de ciclo(s)	Precio
Marcado láser	ASYS	Insigunum 2000	1	23.000€
Serigrafía de pasta	ASYS	SERIO 4000	12	150.000
SPI	SAKI	3Si-LS2	0.95	75.000€
P&P	YAMAHA	Σ-G5SII	2.32	180.000€
AOI 3D Pre-reflow	SAKI	3Di-LS2	2.16	150.000€
Horno re-flow	ERSA	EXOS 4/14	17	100.000€
AOI 3D Post-reflow	SAKI	3Di-LS2	2.5	150.000€
Rayos-X	Nordson matrix	X-3	15	550.000€
<i>ICT</i>	<i>SPEA</i>	<i>3030IL</i>	18	200.000€
TOTAL			70.93	1.578.000€

Todas estas máquinas deben ir distribuidas para la producción SMD, a continuación se muestra el esquema de las diferentes máquinas con las que contamos y su distribución.



*Ilustración 20. Línea de producción*

Como podemos observar encontramos una producción en línea hasta la AOI POST-REFLOW y posteriormente en dos islas distintas tenemos la máquina de rayos-x y el ICT. Debido a sus tiempos de ciclo más lentos.

#### 4.3.2. Proceso SMD.

En este punto expondremos nuestro P-FMEA del proceso de SMD.

Primero realizaremos un diagrama de bloques de nuestro proceso, para tener una vista general sobre él.

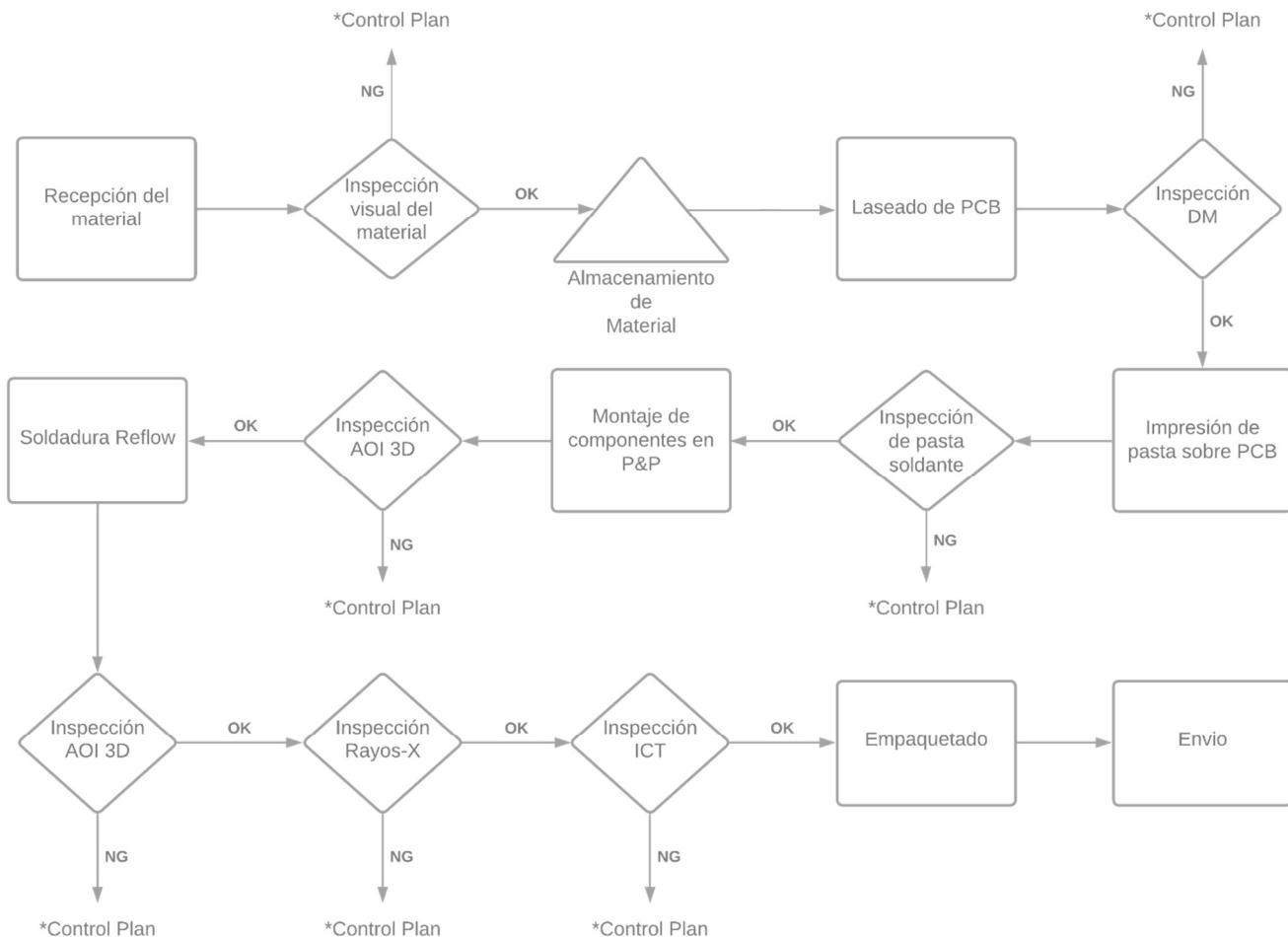


Ilustración 21 Diagrama de flujo del proceso SMD

#### 4.3.2.1. P-FMEA.

Para la clasificación de los distintos tipos de fallos se hará a través del siguiente criterio.

*Tabla 7 Clasificación criterios P-FMEA*

Criterio	Nivel	Frecuencia	Índice
Frecuencia	Improbable	0	1
	Muy baja probabilidad	<1/10000	2 a 3
	Baja probabilidad	<1/2000	4 a 6
	Media probabilidad	<1/100	7 a 8
	Alta probabilidad	<1/2	9 a 10
Importancia	Sin efecto		1
	Insignificante		2 a 3
	Media		4 a 6
	Alta		7 a 8
	Muy alta		9 a 10
Detectabilidad	Alta probabilidad		1
	Media probabilidad		2 a 3
	Baja probabilidad		4 a 6
	Muy baja probabilidad		7 a 8
	Improbable		9 a 10

Los valores escogidos son conforme a experiencia propia en la fabricación SMD. P-FMEA incluido en los anexos en el punto 2.1. P-FMEA.

#### 4.3.2.2. Plan de control

En el plan de control explicaremos casos de actuación en caso de piezas NG y como vamos a realizar el seguimiento de los indicadores de producción de NRFT, Falsos fallos, tasa de rendimiento, tiempo de ciclo y OEE.

Tenemos 5 estaciones de inspección donde contamos con una SPI, una AOI 3D pre-reflow, una AOI 3D post reflow, rayos-x e ICT. En todos los casos vamos a aplicar el mismo criterio para clasificar la gravedad tanto en caso de fallo real como falso fallo:

- Fallo real:
  - 1 fallo: se saca la pieza de la línea de producción y se apunta en el excel de control de producción leyendo el DM y apuntando la estación donde ha sido mala.
  - 3 fallos consecutivos del mismo tipo: al igual que con 1 fallo se sacan esas piezas de la línea de producción y se apunta en el excel de control de producción. Además se debe avisar al responsable del turno para estudiar los fallos y tomar acciones.
  - 5 o más fallos del mismo tipo: al igual que con 1 fallo se sacan esas piezas de la línea de producción y se apunta en el excel de control de producción además se para totalmente la producción y se informa al ingeniero de proceso para revisar este y poder solucionar el problema.
- Falsos fallos:
  - 3 falsos fallos consecutivos e iguales: Se informa al responsable de turno para informar al ingeniero de proceso que ese programa debe ser depurado.
  - 10 falsos fallos consecutivos e iguales: Se informa al responsable de turno para informar al ingeniero de proceso que ese programa debe ser depurado y se para la producción.
  - 5 o más falsos fallos por placa: Se informa al responsable de turno para informar al ingeniero de proceso que ese programa debe ser depurado y se para la producción.

Una vez indicado el procedimiento a seguir en los diferentes casos vamos a indicar como se van a tener un seguimiento de los diferentes indicadores de proceso para tener una vista real del funcionamiento de nuestro proceso y ver los errores para realizar una mejora continua.

- NRFT: como ya sabemos representan el porcentaje de las placas rechazadas por lo tanto a través del plan de control que nos indica que con las piezas que no cumplen la calidad requerida debemos apuntarlas en el excel de control de producción junto al proceso en el que se ha dado de baja. Cada pieza se guardará en una fila donde encontraremos el DM, proceso en el que se ha dado de baja y el fallo lo encontraremos gracias a la trazabilidad y al DM que aportamos a la hora de darlo de baja. Con toda esta información agruparemos los diferentes fallos y realizaremos dos paretos en la que indicaremos por una lado el proceso que más rechazo y perdidas económicas está generan y en el otro pareto el fallo que más rechazo y perdidas económicas esta generando. Encontramos un ejemplo en los anexos punto 2.2.2. NRFT. Estos informes se generarán semanalmente.
- Falsos fallos: Podemos obtener falsos fallos de diversos tipos en todas las estaciones por eso en este caso hay que diferenciarlas perfectamente y atacarlas de manera diferente. Se obtendrán los datos de los propios programas de estadística con los que cuentan las máquinas y con estos datos procesaremos un excel que nos dará una imagen de la situación actual donde observaremos el porcentaje de falsos fallos, los componentes que más falsos fallos producen junto al tipo de fallo que es además de en una tabla también será mostrado en un pareto. De nuevo informe generado semanalmente. Encontramos un ejemplo en los anexos PUNTO 2.2.3 Falsos fallos.
- Tasa de rendimiento. La tasa de rendimiento la obtendremos al final de cada turno y será analizada semanalmente. Su obtención se realizará sabiendo la parte teórica de piezas que deberíamos haber producido de acuerdo al tiempo de ciclo y las piezas que hemos producido realmente. Esta estará incluida en el excel del OEE.
- OEE. El OEE ya fue mencionado y en los anexos punto 2.2.4. Tasa de rendimiento y OEE, se encuentra el excel con el que se calculará automáticamente. Este de nuevo se obtendrá diariamente y se revisará semanalmente.

- Tiempo de ciclo. Cálculado en este documento, con las máquinas seleccionadas obtenemos un tiempo de ciclo de 70.93 segundos.
- Coste unitario. Cálculado en los anexos en 3.4. Coste unitario, nos da un precio final de 33.02€
- MPR. Cálculado en los anexos en el punto 3.5. Mínima producción rentable, con un precio de venta de 40€ obtenemos una mínima producción rentable de 2866 unidades.

Con el estudio de manera conjunta de todos los indicadores anteriores tendremos una foto del funcionamiento real de la línea y cuáles son los problemas más graves y donde debemos marcar las prioridades para así reducir costes y perdidas y realizar una mejora continua de la línea.

## 5. RESULTADOS.

Los resultados que finalmente podemos obtener y presentar de este desarrollo son en un primer momento el esquema eléctrico y el 3D de nuestro diseño que nos ha permitido tener una placa compacta y totalmente montada en SMD. Quizás no parezca tanto pero un montaje total en SMD es complejo de alcanzar en ciertas circunstancias y ahorra mucho dinero ya que al quitarte los componentes TH te quitas máquinas de montaje muy caras y/o mano de obra si realizas un montaje manual, además de quitarte una máquina de soldadura selectiva o en ola y la correspondiente inspección de esa soldadura y de los componentes insertados.

Como resultados también debemos destacar las hojas de excel desarrolladas para el control de la producción.

En primer momento destacamos el P-FMEA encontrado en los anexos en el 2.1. P-FMEA. Aquí nos encontramos con un desglose de fallos, defectos que causan, acciones preventivas y acciones correctivas que nos permiten actuar ante ciertos arreros además con los índices que aportamos de frecuencia, importancia y detectabilidad pueden ser analizadas para mejorar el riesgo de cada uno de los fallos, atacando a cualquiera de estos por ejemplo en el caso de laseado de PCB.

Laseado de PCB	Incorrecta grabación del DM	Mal posicionamiento del DM	Incorrecta calibración	Calibración mensual	2	5	1	10
			Mal ajuste del programa	Validación MSA-1 y MSA-3	1	5	1	5
			Mal ajuste de la máquina	Mantenimiento preventivo mensual	4	5	1	20
	Mala calidad del DM	Mala calidad del DM	Incorrecta calibración	Calibración mensual	2	5	1	10
			Mal ajuste del programa	Validación MSA-1 y MSA-3	1	5	1	5
			Mal ajuste de la máquina	Mantenimiento preventivo mensual	4	5	1	20

Ilustración 22 Laseado PCB P-FMEA

Observamos que el fallo se la incorrecta grabación del DM y que puede producir dos defectos, mal posicionamiento o mala calidad de este y hemos deducido por experiencia propia tres posibles causas, la incorrecta calibración, un mal ajuste del programa o mal ajuste de la máquina a las cuales les aplicamos una acción preventiva para que no ocurran, calibración mensual, validación MSA-1 y MSA-3 y mantenimiento preventivo mensual respectivamente. Posteriormente analizamos el riesgo y en este caso la que aporta mayor riesgo es el mal ajuste de la máquina con un 20. Por lo tanto vemos que lo que nos aporta este P-FMEA es donde debemos centrarnos a la hora de prevenir errores.

El siguiente control de producción lo hacemos a través del OEE con la hoja adjunta en los anexos en el punto 2.2.4. Tasa de rendimiento y OEE.

Enero		Unidades	01/01/2023	02/01/2023
	Descripción			
Velocidad teórica	Velocidad teórica	Unidades/min		
	Volumen producido	Unidades		
	Tiempo total disponible	Horas		
Paradas planificadas	No producción	Horas/día		
	Ajuste de producción	Horas/día		
	Mantenimiento planificado	Horas/día		
Preparación y ajuste de equipos	Arranque	Horas/día		
	Cambio de producto	Horas/día		
	Cambio de turno	Horas/día		
Parada no planificada	Fallo mecánico	Horas/día		
	Fallo eléctrico/electrónico	Horas/día		
	Instrumentación	Horas/día		
Tiempo perdido por operación	Servicios industriales	Horas/día		
	Marchas en vacío	Horas/día		
	Micro paradas	Horas/día		
	Velocidad reducida	Horas/día		
Tiempo perdido por rework	Falta de suministro	Horas/día		
	Mala operación	Horas/día		
	Reproceso	Horas/día		
Tiempo perdido por rechazos	Rechazos	Horas/día		

Disponibilidad	%		
Rendimiento	%		
Calidad	%		
OEE	%		

Ilustración 23 OEE y rendimiento

Aquí observamos como vamos a contabilizar las diferentes horas de pérdida y nos permite visualizar correctamente cual está siendo el mayor problema a lo hora de la pérdida de tiempo, al final también tenemos un resumen del cálculo del OEE donde incluimos tanto rendimiento como calidad lo que aporta también información de gran valor. Finalmente tenemos el OEE que como ya sabemos nos aporta el estado general de la línea y además gracias a esta hoja a parte de saber su estado podremos saber dónde actuar directamente. También tenemos un pequeño gráfico dónde se irá viendo la evolución diaria del OEE para no solo tener una imagen diaria si no su propia evolución y ver los resultados de las acciones implementadas.

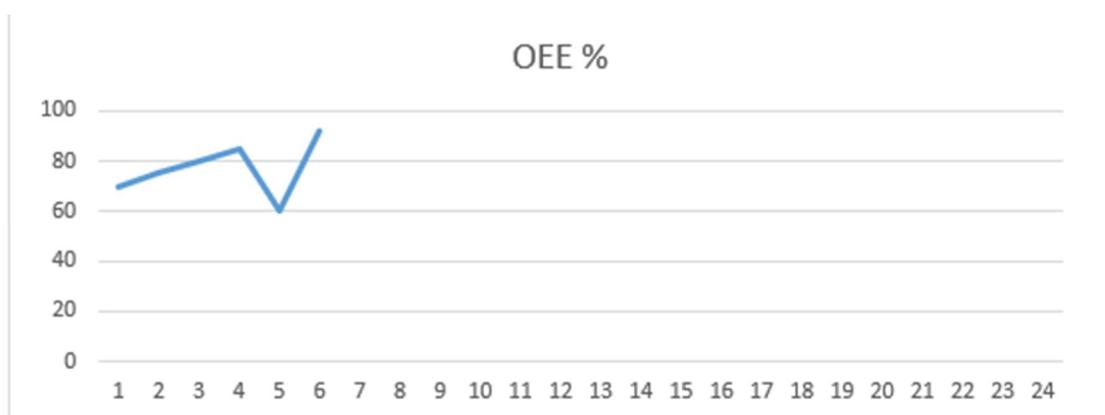


Ilustración 24 Gráfico seguimiento OEE

Otra hoja que nos aporta información de valor es la desarrollada y denominada como control de producción encontrada en los anexos en el punto 2.2.1 Control de producción. Esta hoja desglosa diariamente los turnos de producción efectuados aportando información de cantidad de piezas fabricadas y paradas por horas.

Fecha										
Turno										
Operario										
Dar pieza de baja										
Horas	Producción teórica	Producción real	Descripción			TIEMPO PROCESOS (MIN)				
L á s e r	P r i n t	S e r	A P & R	O R N	H O S	A O I	R A Y	O O S	I C	T T
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
<b>TOTAL</b>										

Ilustración 25 Control producción

Además, podemos ver que máquina nos está aportando más pérdidas de tiempo y atacar directamente ese problema. Como extra tiene asociado un botón “Dar pieza de baja” que sirve para exactamente eso dar una pieza de baja, es decir rechazar una pieza NG, a través de la lectura del DM y de seleccionar el proceso donde fue NG. Esto nos aportará información de gran valor en la siguiente hoja utilizada para el control del rechazo, la hoja del NRFT.

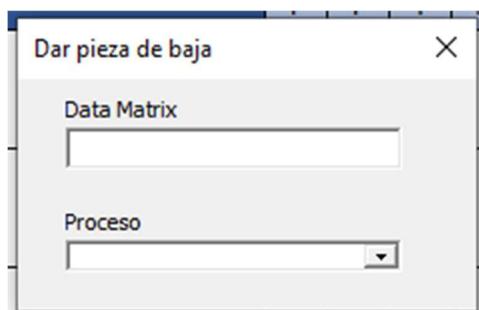


Ilustración 26 Dar pieza de baja

Esta hoja de la que venimos hablando NRFT, la encontramos en los anexos en el punto 2.2.2. NRFT.

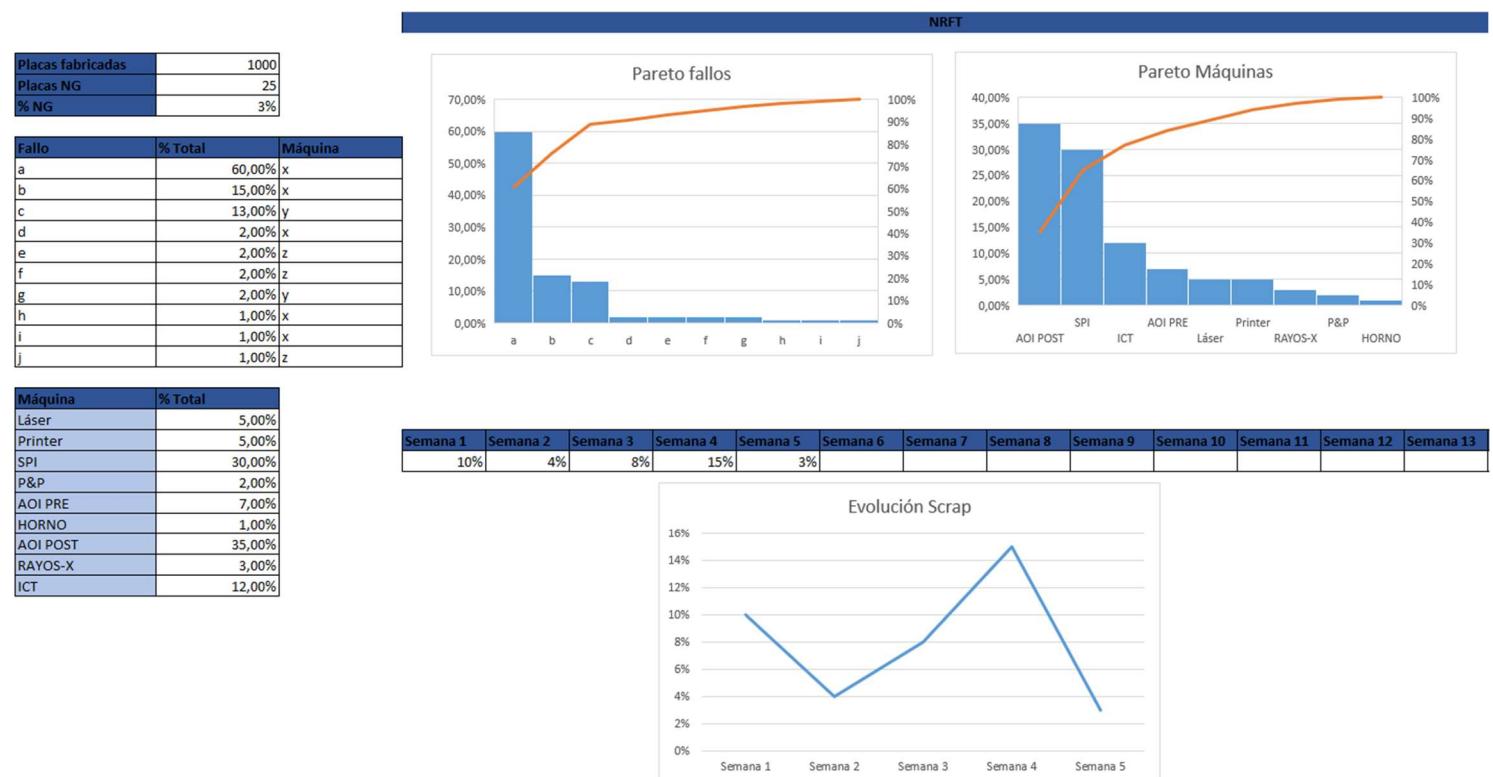


Ilustración 27 NRFT

Esta hoja se alimenta de la información recogida con el botón de dar pieza de baja del Excel de control de producción y nos permite ver información de gran valor sobre el rechazo obteniendo un Pareto de fallos y un Pareto de fallos por máquina es decir nos aporta el fallo más repetitivo y la máquina donde se encuentran más fallos por lo que nos permite de nuevo atacar a dónde se producen más fallos para reducir el coste del rechazo. Además, también tenemos una gráfica de evolución semanal que nos permite ver el impacto de las soluciones aplicadas.

Finalizando el control de producción la última hoja que tenemos es la hoja de falsos fallos encontrada en los anexos en el punto 2.2.3. Falsos fallos. Muy similar a la anterior, que nos aporta un pareto de componentes es decir que componente es el que más fallos aporta y una evolución semanal. Este excel se nutre de los archivos estadísticos que podemos exportar de las máquinas y sería individual por cada máquina de inspección por lo tanto nos aporta una visión individualizada para actuar sobre problemas locales de cada máquina sobre los falsos fallos.

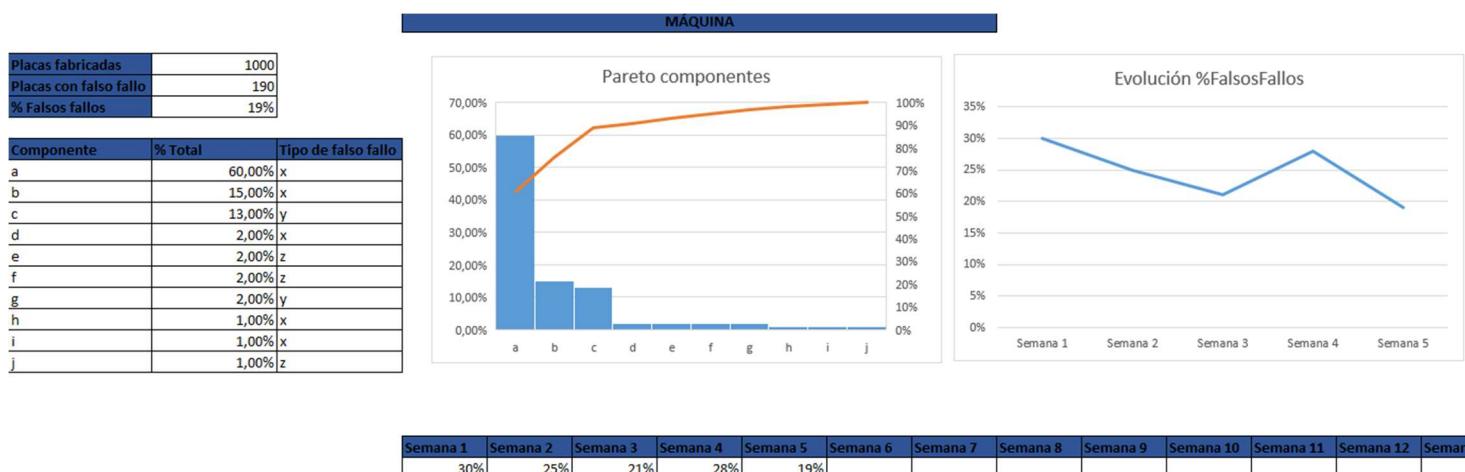


Ilustración 28 Falsos fallos

Por otro lado, y como punto final a resultados también destacaremos los resultados numéricos como los son el coste final de toda la maquinaria escogida, el coste unitario de venta y la producción mínima rentable. La maquinaria ha alcanzando los 1.578.000€ que comparada con una línea conocida por experiencia propia que cuenta con las misma máquinas solo que añadiendo otras dos pick and place, es decir aumenta el precio hasta aproximadamente 2.000.000€, parece en primer momento buen precio pero, esta línea comentada se utiliza para fabricar más de 30 productos distintos lo que indica que por 2.000.000€ existe una línea muy versátil y de muy alta capacidad por lo que la nuestra pierde muchísimo en comparación.

Pasando al coste unitario de venta de nuestra pieza es de 40€, que comparada con el coste de piezas similares conocidas, una pieza solo componentes SMD que sigue el mismo proceso y que un número de componentes similar se conoce su precio de venta en 30€ lo que hace nuestra pieza un 25% más cara. Sin embargo esto puede deberse a que nosotros los gastos fijos y amortización se lo dedicamos absolutamente a nuestra pieza en el caso de la pieza de 30€ se fabrican muchas más referencias por lo tanto estos gastos se reparten.

Finalmente, la producción mínima rentable que para este precio de 40€ que según lo calculado en los anexos son 2866 unidades, un número muy bueno ya que los pedidos son de 4000 unidades mensuales por lo tanto a partir de las 2866 unidades fabricadas estaremos ganado 7€ por pieza lo que implica si todo va según lo planeado unos 8000€ de beneficios mensuales.

## 6. CONCLUSIONES.

Durante el desarrollo de este TFG hemos conseguido realizar el diseño electrónico de una PCB para un robot AGV además de realizar la línea de producción SMD en la que se fabricaría junto con su plan de control y P-FMEA. Sin embargo, podríamos seguir desarrollando el diseño y el proceso de fabricación a través de los indicadores de proceso que convenientemente hemos desarrollado.

Aunque hayamos conseguido una gran implementación de todos los componentes SMD, la placa no es perfecta ya que se podrían mirar variaciones de componentes para reducir el precio y además otra mejora a poder implementar sería pasar de montar un solo circuito a montar paneles de 2 o 4 placas como se muestra en la imagen.

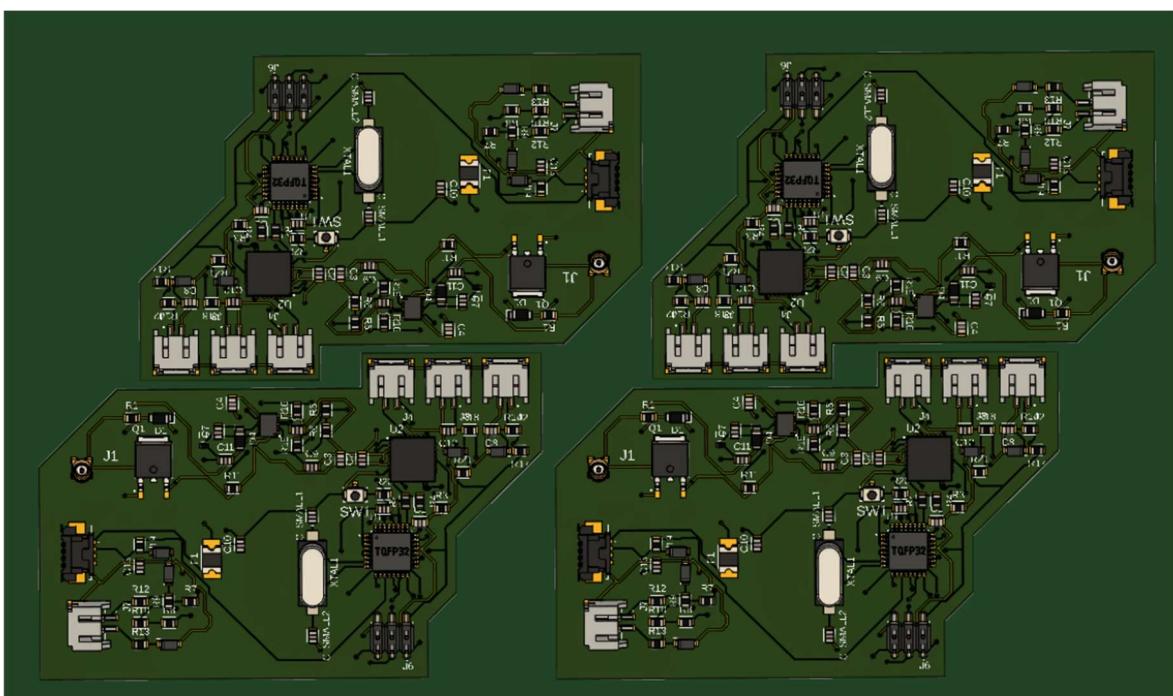


Ilustración 29. Cuatros circuitos por placa

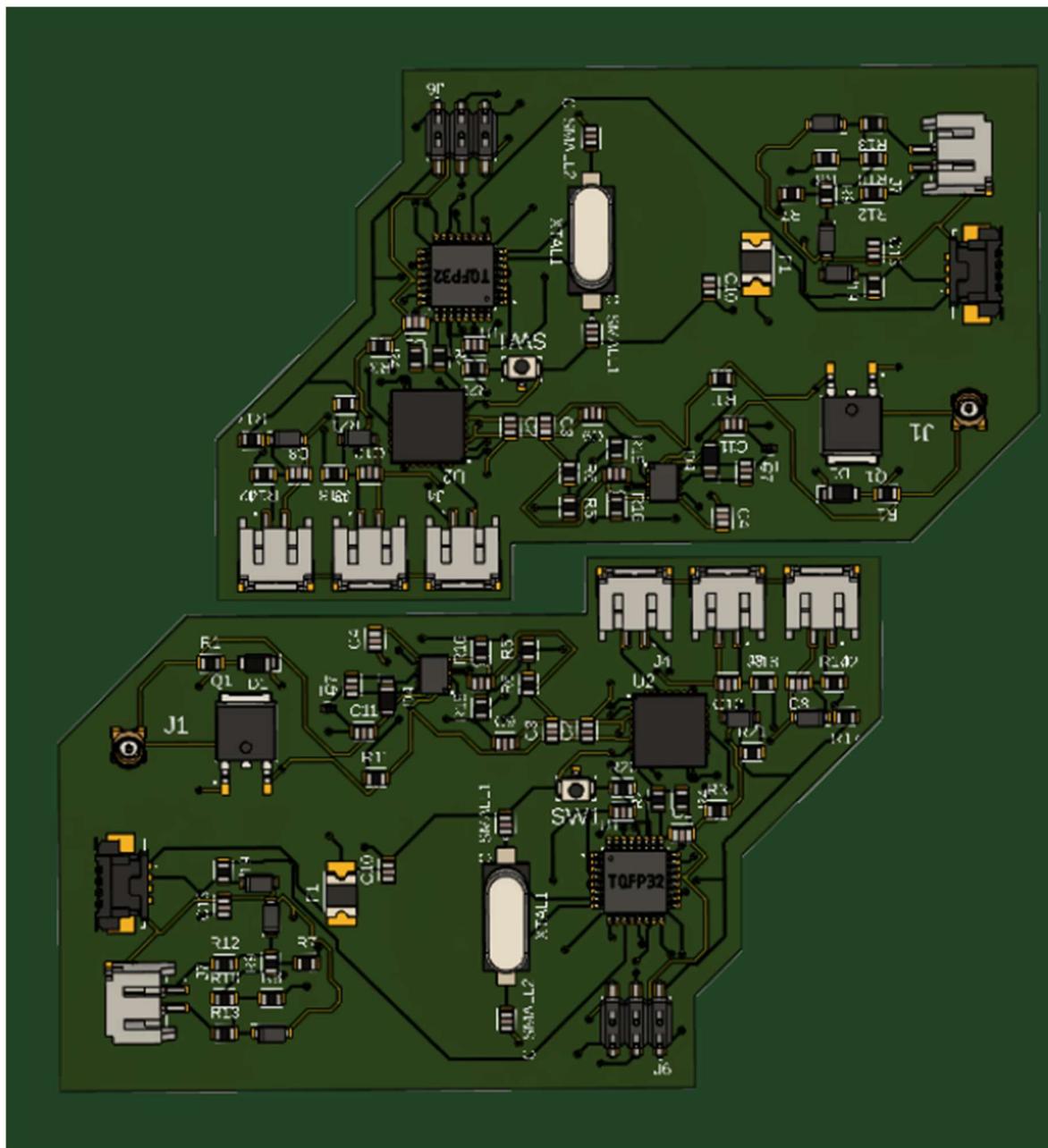


Ilustración 30. Dos circuitos por placa

Teniendo la línea y la pieza diseñadas antes de realizar producción en serie se deberían realizar ciertas fases de prototipos que las plantearía de la siguiente manera.

- Fase 1. Fabricación de 20 piezas OK: Se realizan los programas y la producción junto a los proveedores de las máquinas para obtener los conocimientos de programación y ajustes necesarios en producción. Una vez fabricadas estas 20 piezas se mandarían a realizar un test funcional y pruebas de envejecimiento para ver si realmente funciona como debería y si aguanta las condiciones que

requisiera el cliente. Esta fase comprendería aproximadamente 3 meses. Las primeras 4 semanas para formación y realización de programas con los diferentes proveedores. La 5<sup>a</sup> semana para la producción y verificación de las 20 piezas necesarias y finalmente las semanas restantes para los test funcionales y de envejecimiento. En caso de alguno caso anterior saliera NG se cambiaria lo necesario para el correcto funcionamiento y se volverían a producir las 20 piezas.

- Fase 2. Una vez terminada la fase 1 y habiendo pasado los test funcionales y pruebas de envejecimiento se realizaría una fabricación de 20 piezas en la que probaríamos todos los componentes equivalentes desarrollados durante la elección de estos por falta de stock y volveríamos a realizar los test funcionales para ver que realmente fncionan como deberían. Teniendo fase 1 y fase 2 completadas nos aseguriríamos el correcto funcionamiento del circuito en su entorno con cualquier componente equivalente antes mencionado. Esta fase comprendería otros 2 meses.
- Fase 3. Fabricaciones de pequeñas serie para ajuste y depuración de programas para finalmente realizar una fabricación de 500 piezas para realizar las validaciones MSA-1 y MSA-3 en todas las máquinas. Fase que comprendería un mes.
- Fase 4. Simulación de producción en serie de 1000 piezas. 2 semanas.
- Fase 5. Lanzamiento de producción en serie.

*Tabla 8 Fases prototipos*

Fase	Descripción	Piezas	Tiempo
Fase 1	Prototipos y formación	20	3 meses
Fase 2	Prototipos y formación	20	2 meses
Fase 3	Prototipos	500	1 mes
Fase 4	Prototipos	1000	2 semanas
Fase 5	Lanzamiento producción serie	-	-

Por lo tanto, si todo va correcto desde que montáramos la línea hasta el lanzamiento de la producción serie pasarían en torno a 6 meses y medio, aparentemente bastante tiempo, pero lanzaríamos un producto consolidado y capaz.

Tabla 9 Evolución temporal prototipos

Fases	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Fase 1	Yellow	Yellow	Yellow				
Fase 2				Yellow	Yellow	Yellow	
Fase 3						Green	Green
Fase 4						Green	
Fase 5							Blue

Amarillo indica, prototipos y formación, verdes prototipos y azul producción en serie.

A partir de aquí hablaremos de las diferentes mejoras posibles. La primera mejora sería realizar el estudio de ocupación de la línea para poder implementar la fabricación de otras referencias distintas a la ya diseñada por nosotros debido a este desaprovechamiento que estamos haciendo en comparación con la línea de producción antes mencionada y también para poder mejorar el coste unitario de cada pieza. En este momento la ocupación de la línea con el tiempo de ciclo de 70.93s es prácticamente del 100% por lo que habría que estudiar el cuello de botella para la mejora de este tiempo de ciclo. Ahora mismo el cuello de botella lo tenemos en el horno que cada placa tarda 17s en pasar a través y está recibiendo placas cada 2.16 segundos aproximadamente. Aunque pueda haber varias placas dentro del horno debe haber una distancia mínima entre ellas, aproximadamente cada 5 segundos puede entrar una placa por lo tanto si recibimos cada 2.16s y cada 5 puede entrar una, estamos perdiendo aproximadamente el 50% de la producción. Una solución que plantearía sería que el horno fuera de doble carril así reducimos esa espera a la mitad y pueden pasar placas cada 2.5 segundos por lo que ya no sería el cuello de botella y reduciríamos en gran medida la ocupación de la línea pudiendo introducir una nueva referencia.

Otra manera, de reducir la ocupación de la línea sería trabajar 3 turnos en vez de 2 así cada día tendríamos 8 horas para la otra referencia un total de 40 horas a la semana libres.

Cabe mencionar que, si esta ocupación se reduce y conseguimos una nueva referencia a fabricar, deberíamos repetir todas las fases anteriores para que la nueva referencia estuviera igual de consolidada y fuera igual de capaz.

También sería conveniente desarrollar un plan de mantenimiento preventivo mensual específico para cada máquina y desarrollado junto a proveedor para poder evitar paradas no planificadas y averías graves.

Siguiente mejora que podemos platear sería la implementación de inteligencia artificial en la programación de las máquinas de inspección para que depuraran los programas de manera automática reduciendo el tiempo que dedica el ingeniero a depurar y pudiendo implementar ese tiempo en otras áreas. Esto también nos permitiría prescindir de operarios y simplemente tener uno que controlara desde un servidor todas las máquinas de inspección junto a la inteligencia artificial.

Otra mejora que intentaría implementar sería la negociación con cliente de no pasar el 100% de la producción de rayos-x e ICT para así poderlos situar en línea sin que generen cuello de botella.

Por último, en caso de un gran crecimiento, llegando al punto de tiempos de ciclos óptimos y que necesitemos más líneas de producción, estas las haría siempre gemelas es decir todas las mismas máquinas. Esto reduce mucho los tiempos de programación y formación ya que si se compran las mismas máquinas se programa y se reparan de la misma manera. A su vez nos permite gran versatilidad en cuanto a producción es decir en ambas líneas en caso de haber 2 podemos fabricar el producto x y el producto y que en caso de estar una averiada y sin poder fabricar podríamos balancear toda la producción a una línea fabricando según prioridades. Aunque si realizamos esto convendría estudiar el anterior punto con la ocupación de rayos-x e ICT ya que probablemente convenga sacarlas de la línea y que trabajen en isla funcionando para las dos líneas en vez de comprar otras dos máquinas que supondría un gasto de más de 500.000€.

## 7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado están alineados con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas, de la Agenda 2030:

- Objetivo 8 - Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos 
- Meta 8.2 - Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra
- Objetivo 9 - Crear nuevas industrias que hagan frente a la creciente demanda de estos servicios y garanticen más puestos de trabajo. Por otro lado, los avances tecnológicos y la investigación e innovación también son esenciales para encontrar soluciones permanentes a los desafíos económicos y ambientales 
- Meta 9.1 - Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todo
- Meta 9.2 - Promover una industrialización inclusiva y sostenible y, de aquí a 2030, aumentar significativamente la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto, de acuerdo con las circunstancias nacionales, y duplicar esa contribución en los países menos adelantados
- Objetivo 12 – Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles 
- Meta 12.2 - De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Kasap, S. O. (2006). Electronic materials and Devices. McGraw-Hill New York.
- [2] Archambeault, B. R., & Drewniak, J. (2013). PCB design for real-world EMI control (Vol. 696). Springer Science & Business Media.
- [3] Montrose, M. I. (1996). Printed circuit board design techniques for EMC compliance (Vol. 1, p. 996). Piscataway, NJ: IEEE press.
- [4] Prasad, R. (2013). Surface mount technology: principles and practice. Springer Science & Business Media.
- [5] Starkey, P. (2011). EIPC Seminar at SMT Nuremberg 2011. Circuit World, 37(3).
- [6] Li, M. H. C., Al-Refaie, A., & Yang, C. Y. (2008). DMAIC approach to improve the capability of SMT solder printing process. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 31(2), 126-133.
- [7] Wang, W., Nelson, P. C., & Tirpak, T. M. (1999). Optimization of high-speed multistation SMT placement machines using evolutionary algorithms. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 22(2), 137-146.
- [8] Esfandyari, A., Bachy, B., Raithel, S., Syed-Khaja, A., & Franke, J. (2017). Simulation, optimization and experimental verification of the over-pressure reflow soldering process. Procedia CIRP, 62, 565-570.
- [9] Ruiz Trejo, T. (2000). Desarrollo de un sistema para el control y mejora de la calidad de la soldadura en el ensamble de tarjetas electrónicas mediante SMT.

[10] R. S. Pahwa et al., "Automated Void Detection in TSVs from 2D X-Ray Scans using Supervised Learning with 3D X-Ray Scans," 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, 2021, pp. 842-849, doi: 10.1109/ECTC32696.2021.00143.

[11] M. M. V. Tegethoff and T. W. Chen, "Defects, fault coverage, yield and cost, in board manufacturing," Proceedings., International Test Conference, Washington, DC, USA, 1994, pp. 539-547, doi: 10.1109/TEST.1994.527997.

[12] Herrmann, J. W., & Chincholkar, M. M. (2000, September). Design for production: a tool for reducing manufacturing cycle time. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 35135, pp. 261-270). American Society of Mechanical Engineers.

[13] SHAMSUDIN, S. N. A. B. (2018). A STUDY ON OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) FOR PERFORMANCE MEASUREMENT: CASE STUDY FOR SURFACE MOUNT TECHNOLOGY (SMT) DEPARTMENT (Doctoral dissertation, Universiti Sains Malaysia).

## **Relación de documentos**

- (X) Memoria 75 páginas  
(\_) Anexos 59 páginas

La Almunia, a 03 de 06 de 2023

Firmado: Mario Cabañero López