

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA**

# **TESIS**

**“PROTOTIPO MECATRONICO DE VISIÓN PARA EL  
MICROPOSICIONAMIENTO”**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**ING. ROBERTO IVÁN DZUL DURÁN**

ASESOR:

**DR. JESÚS SANDOVAL GIO  
DR. VÍCTOR SANDOVAL CURMINA**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO.

22 NOVIEMBRE DE 2017



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de Mérida

DEPENDENCIA: DIV. DE EST. DE POSG. E INV.  
No. DE OFICIO: X-466/2017

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

MÉRIDA, YUCATÁN A 07 DE NOVIEMBRE DE 2017

C. DZUL DURÁN ROBERTO IVÁN  
Pasante de Maestría en Ingeniería.  
Presente.

De acuerdo al fallo emitido por su asesor el Dr. Jesús Sandoval Gio co-asesorado por el M.C. Víctor Sandoval Curmina y la comisión revisora integrada por el Dr. Agustín Alfonso Flores Novelo, el Dr. Carlos Alberto Lujan Ramírez y el Dr. José Ramón Atoche Enseñat considerando que cubre los requisitos establecidos en el Reglamento de Titulación de los Institutos Tecnológicos le autorizamos la impresión de su trabajo profesional con la TESIS:

"PROTOTIPO MECATRÓNICO DE VISIÓN PARA EL MICROPOSICIONAMIENTO"

ATENTAMENTE  
IN HOC SIGNO VINCES

M.C. DANIEL ARCANGEL LÓPEZ SAURI  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

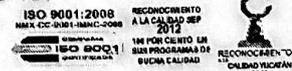
C.p. Archivo  
DALS/fja



S. E. P.  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE MÉRIDA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SEP Instituto Tecnológico de Mérida, Km.5 Carretera Mérida-Progreso A.P 911  
C.P 97118 Mérida Yucatán, México, Tels. 964-50-00, Ext. 10001, 10401  
10601, 10201 e-mail: itm@itmerida.mx http://www.itmerida.mx



## **AGRADECIMIENTOS**

*Doy gracias a Dios por haberme dado la oportunidad de seguir viviendo a lado de mis seres queridos y de conservar las facultades físicas e intelectuales que siempre me han caracterizado.*

*Agradezco al Dr. Jesús Sandoval Gio por el apoyo, asesoría, consejos y acotaciones en la realización de este trabajo.*

*Agradezco al Dr. Agustín Alfonso Flores Novelo y Dr. José Ramon Atoche Enseñat por las revisiones y recomendaciones realizadas.*

*Agradezco al I.E.M Roger E. Pérez Estrada por su asesoría brindada en la elaboración y construcción de la estructura de este prototipo.*

*Agradezco al M.I Julio C. Molina Céspedes por la asesoría brindada en la elaboración del algoritmo de visión.*

*Agradezco a la M.I.E Diana C. Tep Chel por las revisiones y recomendaciones realizadas.*

*Gracias al Instituto Tecnológico de Mérida por brindarme los espacios para realizar estos estudios.*

*Al Instituto Tecnológico Superior de Motul por brindarme su apoyo en uso del taller de manufactura para la realización de la estructura del prototipo.*

## DEDICATORIAS

*Dedico esta obra a mi madre quien me ha apoyado incondicionalmente en la realización de mis estudios y a superar los momentos más difíciles de mi vida. "Por muy dura que sea la vida, nunca te rindas, puedes ser tan grande como lo hayas soñado, tan solo es querer y trabajar en ello todos los días"*

*Roberto I. Dzul Durán*

## RESUMEN

En este documento se presenta el diseño y construcción de un prototipo de visión para el microposicionamiento, para la elaboración de circuitos impresos (*PCB's*) a una cara y con ancho trazo mínimo de 0.1mm. La estructura mecánica está conformada por una base, tres ejes ortogonales que se desplazan por medio de una tuerca y tornillo sin fin con paso de 8mm/rev acoplados al eje de un motor paso a paso para mayor precisión y resolución en la máquina. Los ejes X, Y y Z se desplazan a través de baleros lineales y guías de acero templado. El control es por medio del software *bCNC*. El dispositivo también cuenta con una cámara para la visión y posicionamiento de la herramienta por medio del procesamiento de imagen a través del software *Matlab*® para la perforación de *PCB's*.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIAS .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Antecedentes .....	15
1.2 Planteamiento del problema.....	16
1.3 Objetivo general .....	16
1.3.1 Objetivos específicos .....	16
1.4 Justificación.....	17
CAPÍTULO I - ESTADO DEL ARTE .....	18
1.1 Estado del arte .....	19
1.2 ¿Que es un circuito impreso o PCB? .....	19
1.3 Métodos actuales para la fabricación de circuitos impresos .....	20
1.4 Transferencia de imágenes.....	20
1.5 Impresión por serigrafía .....	21
1.6 Por transferencia térmica de toner .....	21
1.7 Fresado CNC .....	22
1.8 Análisis de los métodos de fabricación de los circuitos impresos .....	23
1.9 Ventajas y desventajas de cada método.....	24
1.10 Procesamiento rápido multi-resolución de imagen para la manufactura de PCB.....	24
1.11 Máquinas CNC con sistema de visión artificial.....	28
1.11.1 PP4 SMD Pick and Place Machine and Paste Dispenser .....	28
CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO .....	30
2.1 La tecnología de visión.....	31
2.2 Características principales en sistema de visión artificial.....	31
2.3 Componentes de un sistema de visión.....	31
2.4 Aplicaciones de la visión artificial .....	32
2.5 Definición técnica .....	32
2.6 Cámara .....	34
2.6.1 Cámaras lineales.....	34
2.6.1.1 Características técnicas .....	35
2.6.2 Cámaras matriciales.....	35

2.6.2.1 Características de los sensores .....	36
2.7 Iluminación .....	37
2.8 Cámara de visión industrial con interfaz USB3 .....	37
2.9 Comunicación USB3 .....	38
2.10 Óptica.....	39
2.11 Resolución especial .....	40
2.12 Tratamiento básico de Imágenes en Matlab .....	40
2.12.1 Image Processing Toolbox de Matlab .....	41
2.12.2 Imread .....	41
2.12.3 Graythresh .....	41
2.12.4 Im2bw.....	42
2.12.5 Centroid.....	42
2.13 Revisión de las tecnologías y materiales disponibles para la implementación del sistema .....	42
2.14 Software de control de la máquina .....	43
2.15 Software de diseño de circuitos .....	44
2.16 Software para el diseño mecánico .....	45
2.16 Hardware de control de la máquina.....	46
2.17 Hardware de desplazamiento de órganos móviles.....	47
2.17 Hardware controlador de motores .....	48
<b>CAPÍTULO III – DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA .....</b>	<b>50</b>
3.1 Planteamiento del diseño .....	51
3.2 Diagrama de bloques del sistema .....	52
3.2 Elección del método más viable .....	52
3.3 Bosquejo inicial del sistema mecánico .....	53
3.4 Diseño del sistema mecánico y estructural .....	54
3.4.1 Diseño del bastidor.....	54
3.4.2 Diseño del sistema de desplazamiento lineal.....	55
3.4.3 Soporte de la herramienta de fresado .....	57
3.5 Software para la simulación del diseño estructural del sistema .....	57
3.6 Simulación de la estructura propuesta .....	58
3.7 Selección de herramientas y parámetros de corte .....	63
3.8 Herramientas de corte.....	64
3.9 Elección de motores.....	67
3.10 Cálculo del torque de los motores paso a paso .....	68
3.11 Elección de los motores paso a paso.....	73
3.12 Tipo de router .....	75
3.13 Hardware Electrónico .....	77
3.13.1 Interfaz Electrónica.....	78
3.13.2 Diseño de los drivers para los motores .....	80
3.13.3 Diseño de la fuente de alimentación .....	81

3.14 Sistema de control.....	83
3.14.1 Autodesk Eagle .....	83
3.14.2 PCB-Gcode .....	84
3.14.3 bCNC .....	85
3.14.4 Algoritmo de visión .....	86
CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	88
4.1 Resultado final de la integración del sistema .....	89
4.2 Pruebas y resultados con el Algoritmo .....	92
4.3 Conclusiones.....	96
4.3.1 Trabajos futuros .....	98
REFERENCIAS.....	99
ANEXO A .....	101
ANEXO B .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ejemplo de circuito impreso o PCB.....	19
Figura 1.2. Impresión por luz ultravioleta de manera casera.....	20
Figura 1.3. Impresión por serigrafía casera.....	21
Figura 1.4. Planchado de circuito impreso. ....	22
Figura 1.5. Fabricación de circuitos impresos por CNC. ....	23
Figura 1.6. a) Región rectangular en I definida por dos vértices; b) Usando K la suma de niveles de gris en la región.....	26
Figura 1.7. a) & b) Imágenes de prueba.....	27
Figura 1.8. Resultados de la detección de características .....	27
Figura 1.9. Resultados utilizando un umbral simple .....	28
Figura 1.10. Prototipo PP4 SMD Pick and Place Machine and Paste Dispenser.....	29
Figura 2.1. Sistema de Visión Artificial. ....	33
Figura 2.2. Cámara Basler Ace aCA1300-30uc. ....	38
Figura 2.3. Óptica compact Fixed FL Lens 3.5 mm.....	40
Figura 2.4. Sistema mecatrónico.....	43
Figura 3.1. Diagrama de bloques. ....	52
Figura 3.2. Diseño inicial de la maquina CNC. Fuente.....	53
Figura 3.3. Bastidor principal de máquina CNC .....	55
Figura 3.4. Mesa de trabajo de la máquina .....	55
Figura 3.5. Propuesta de diseño para el eje Z.....	56
Figura 3.6. Propuesta de diseño para la transmisión de los ejes X, Y y Z. ....	57
Figura 3.7. Soporte para el rectificador. ....	57
Figura 3.8. Estructura propuesta para la simulación. ....	58
Figura 3.9. Tensión Von Mises.....	62
Figura 3.10. Tensión Von Mises, tercera tensión principal.....	62
Figura 3.11. Tensión Von Mises, Desplazamiento .....	63
Figura 3.12. Tensión Von Mises, Coeficiente de seguridad. ....	63
Figura 3.13. Brocas de grabado mecánico de dos flautas “V”.....	65
Figura 3.14. Burril punta endmill.....	66

Figura 3.15. Burril para corte de PCB's. ....	66
Figura 3.16 Brocas para la perforación de PCB's.....	67
Figura 3.17. Curva de Torque vs RPM del motor paso a paso 57BYGH420. ....	74
Figura 3.18. Curva de Torque vs RPM del motor paso a paso KL23H276-30-8A.....	75
Figura 3.19. Rectificadores de la marca Dremel. ....	76
Figura 3.20. Arquitectura general del sistema electrónico.....	78
Figura 3.21. Arduino® Uno Rev. 3. ....	79
Figura 3.22. Diagrama del circuito para los drivers. ....	80
Figura 3.23. Driver para el control de motores paso a paso.....	81
Figura 3.24. Diagrama del circuito de la fuente de alimentación.....	82
Figura 3.25. Fuente de alimentación de 33V@4A de salida fija y una salida regulable de 1.2 a 33 V@1A.....	82
Figura 3.26. Arquitectura global del sistema de control.....	83
Figura 3.27. Interfaz de Eagle 8.2.2. ....	84
Figura 3.28. Interfaz de PCB-Gcode. ....	85
Figura 3.29. Interfaz de bCNC.....	86
Figura 4.1. Montaje del eje X.....	89
Figura 4.2. Montaje del eje Y.....	89
Figura 4.3. Montaje del eje Z.....	90
Figura 4.5. Montaje de la electrónica de control.....	90
Figura 4.6. Montaje final del prototipo, parte 1. ....	91
Figura 4.8. Diseño de PCB de prueba en Eagle®.....	92
Figura 4.9. Imagen capturada por la cámara del equipo. ....	92
Figura 4.10. Centros de los drill's de un PCB de prueba.....	93
Figura 4.11. Pistas del PCB de prueba. ....	93
Figura 4.12. Centros de los drill's de un PCB de prueba.....	94
Figura 4.13. Fresado del PCB de prueba.....	94
Figura 4.14. PCB producido por la máquina.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de los métodos de elaboración de PCB's.....	24
Tabla 2.1. Distancias focales para un lente de 3.5 mm.....	39
Tabla 3.1. Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 1. ....	59
Tabla 3.2. Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 2. ....	59
Tabla 3.3. Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 3 .....	59
Tabla 3.3. Condiciones de funcionamiento, datos obtenidos en el software de simulación. ....	60
Tabla 3.4. Gravedad, datos obtenidos del software. ....	60
Tabla 3.5. Cargas seleccionadas, datos obtenidos del software.....	60
Tabla 3.6. Resumen de resultados del software de simulación.....	61
Tabla 3.8. Especificaciones de cinco mototool de diferentes capacidades .....	77
Tabla 4.1. Resultados Funcionales del prototipo.....	96

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aborda el problema de localizar las características visuales en un circuito impreso para facilitar la fabricación y el montaje automatizado de las tarjetas de circuito impreso (*PCB*).

Presentando un algoritmo que es capaz de localizar características en la imagen de un *PCB capturada por una cámara* y luego determinar su posición.

Este algoritmo se basa en la detección de los centros de masa de la Imagen de un *PCB*, para la ubicación de la posición de los centros de los puntos a barrenar y después obtener las coordenadas ( $X$ ,  $Y$ ) de los centros de los orificios a barrenar. Para luego generar el *código G* respectivo para la comunicación con el software de la máquina.

El diseño del sistema del prototipo se divide en los siguientes cuatro componentes principales:

1. Sistema de Visión: Consiste en un algoritmo para la detección de las coordenadas de los drill's de un *PCB* a través de una cámara y el uso del software *Matlab*®. El algoritmo también genera el *código G* para la ubicación de la herramienta a través de la interfaz de la máquina.

2. Software: Incluye el diseño del *PCB* mediante el programa de diseño *EAGLE*® educacional. La interfaz del usuario y generación del código G es realizado por la herramienta *PCB-Gcode*. La visualización, comunicación e interpretación de código G es realizada mediante el software *bCNC* y *grbl controller v.09*.

3. Hardware electrónico: Constituida por los dispositivos electrónicos como lo es la tarjeta *Arduino uno R3*. La cual de encarga de recibir los datos de control del equipo y general las señales de control a los drivers *L298N* y *L297*.

4. Estructura mecánica: Corresponde a la estructura de soporte, los ejes y el motor de fresado. La estructura mecánica se compone de tres ejes de posicionamiento (X, Y y Z), de tres motores paso a paso encargados del movimiento de los ejes, el motor para el fresado y el soporte para la cámara de visión.

## 1.1 Antecedentes

En el departamento de ingeniería electromecánica del Instituto Tecnológico Superior de Motul, se requiere de una máquina *CNC* para la elaboración de *PCB*.

Es una institución en crecimiento, recientemente se abrió una línea de investigación en el departamento de *IEM*, enfocada en el área de electromecánica.

Actualmente se realizan proyectos de investigación relacionados con la eficiencia de los calentadores solares de aletas planas, entre otros proyectos vinculados con otras instituciones. La mayoría de estos proyectos requieren la implementación de circuitos electrónicos en tarjetas.

Los *PCB*'s aún se realizan de manera artesanal con hojas de transferencia de circuitos por medio de papel *PNP-010*. Aunque con esta técnica se obtiene buenos resultados para circuitos con pistas no muy pequeñas, el proceso es muy tardado y los resultados empeoran a medida que la complejidad del diseño aumenta y el tamaño de las pistas disminuyen.

Para la realización de *PCB*'s más complejos se tiene la necesidad de contratar un servicio externo que ocasiones resulta muy caro y los plazos de entrega son tardados. Por lo que la implementación del circuito debe esperar y esto representa un atraso en el proyecto, siendo que en muchas ocasiones el tiempo es justo para la entrega de resultados.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Actualmente en el laboratorio Multidisciplinario del Instituto Tecnológico superior de Motul no existe una máquina *CNC* para la elaboración de tarjetas de circuito impreso (*PCB*). El costo de estas máquinas en el mercado es elevado y ante la falta de un presupuesto amplio se pretende realizar un prototipo que se ajuste al presupuesto designado. El equipo diseñado tendrá tres ejes (*X*, *Y* y *Z*), con un área de trabajo, 25 X 25 cm, interfaz basada en el *grbl controller*, *Arduino*® y el software *bCNC* para el mecanizado y perforación en los circuitos impresos.

También se pretende que el prototipo tenga un sistema de visión para realizar el microposicionamiento de la herramienta para la perforación de los *PCBs*. Más adelante se pretende desarrollar un sistema de visión para el ensamble y soldado automatizado de *PCBs*.

## **1.3 Objetivo general**

Diseñar y construir un prototipo mecatrónico con visión artificial para el microposicionamiento en el fresado de *PCB's*, de bajo costo y mínimo mantenimiento.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

1. Diseñar en software *CAD* la estructura y transmisión de los ejes *X*, *Y* y *Z* del dispositivo.
2. Calcular el torque y seleccionar los motores para la transmisión de los ejes *X*, *Y* y *Z*.
3. Diseñar los drivers para el control de los motores de los ejes *X*, *Y* y *Z*.

4. Diseñar la fuente de alimentación para la etapa de potencia y control de los motores.
5. Diseñar la interfaz para la comunicación a través del puerto *USB* con la computadora.
6. Adquirir imágenes a través de una cámara *USB3*.
7. Diseñar un algoritmo en *MATLAB*® para la detección de objetos, obtener sus coordenadas en el plano de trabajo y,
8. Generar un *código G* para la ubicación de la herramienta.

#### **1.4 Justificación**

Este proyecto surge ante la necesidad de una máquina de control numérico computarizado (*CNC*), para la elaboración de tarjetas de circuito impreso (*PCB*) en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico Superior de Motul.

Actualmente los proyectos de investigación realizados en el departamento requieren de sistemas de control y monitoreo para los prototipos esto conlleva al diseño y elaboración de tarjetas de circuitos impresos para estos sistemas.

Las tarjetas de circuito impreso son elaboradas por medio del método de transferencia, si bien los resultados son buenos para circuitos eléctricos de mediana complejidad, se requiere de una máquina *CNC* que mejore la calidad, acabado y el tiempo de elaboración de dichas tarjetas.

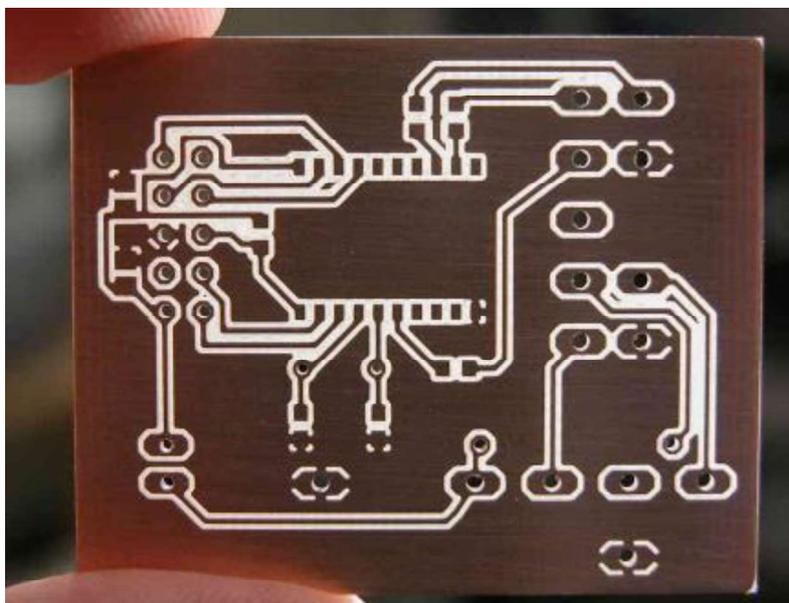
## **CAPÍTULO I - ESTADO DEL ARTE**

## 1.1 Estado del arte

En este punto se presenta una recopilación de los resultados obtenidos de otras investigaciones sobre el procesamiento de imágenes y su aplicación en máquinas CNC para la elaboración de PCB's.

## 1.2 ¿Que es un circuito impreso o PCB?

Un circuito impreso (ver figura 1.1) está constituido de material aislante, tal como fibra de vidrio o fenólico con trayectorias conductoras. El propósito de todos los circuitos impresos es proporcionar trayectorias eléctricas para conectar todas las componentes de un circuito, estas trayectorias se colocan en uno o ambos lados del material aislante, es decir que se trata de una base no conductora sobre la cual se adhiere una capa de material conductor como el cobre, que posteriormente será tratada para formar vías de conexión entre componentes electrónicos; que en conjunto recibe el nombre de circuito electrónico [1].



**Figura 1.1.** Ejemplo de circuito impreso o PCB.

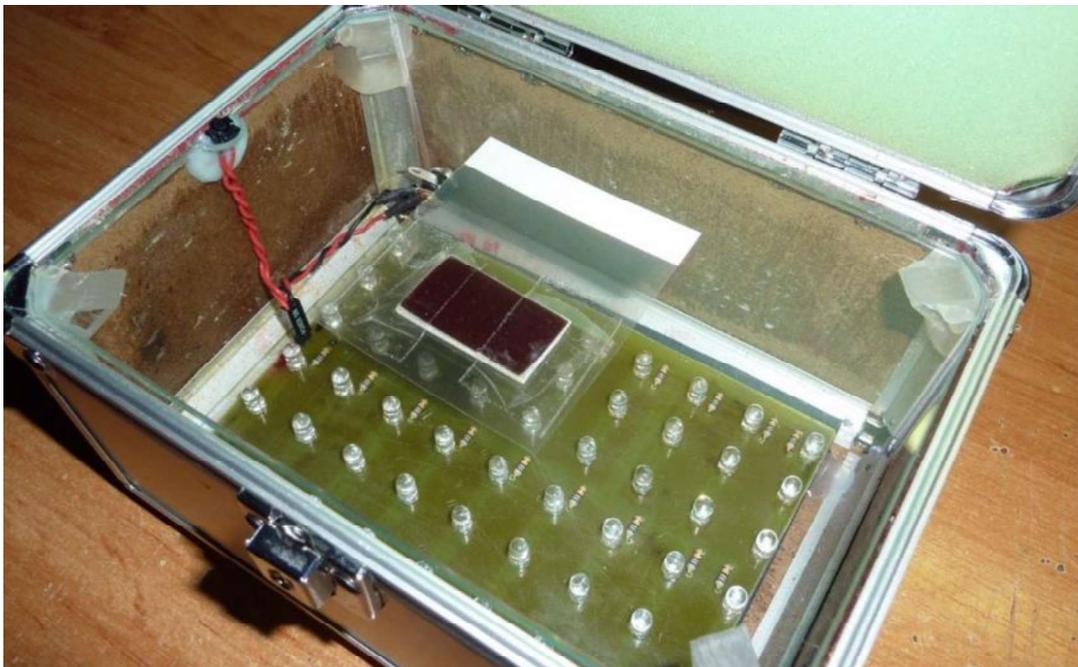
Fuente: <http://www.retroamplis.com/pcb-cnc-100x100>

### 1.3 Métodos actuales para la fabricación de circuitos impresos

En la actualidad existen diversos métodos para la fabricación de PCB, tanto manuales como industriales, el fin de estos métodos es transferir un circuito diseñado en un software de CAD a una placa de material no conductor la cual tiene un recubrimiento de cobre [1].

### 1.4 Transferencia de imágenes

Es uno de los sistemas más utilizado, el cual consta de exponer a luz ultravioleta una placa especial con una solución fotosensible adherida al cobre superficial, haciendo atravesar una imagen fotográfica del circuito a imprimir y después de un proceso de revelado se llega a la forma deseada de la placa. En la figura 1.2 se observa el proceso de transferencia [1].



**Figura 1.2.** Impresión por luz ultravioleta de manera casera.

Fuente: <https://giltesa.com/2011/09/06/fabricacion-de-circuitos-impresos-metodo-de-la-insoladora>

### 1.5 Impresión por serigrafía

Se utiliza tintas resistentes al grabado para proteger la capa de cobre. La serigrafía es una técnica, que permite imprimir imágenes sobre cualquier material. Básicamente es transferir una tinta a través de una malla de seda templada en un marco estructural. La seda ha sido tratada previamente con una emulsión que bloquea el paso de la tinta en las áreas donde no habrá imagen, quedando libre la zona donde pasara la tinta a la placa de cobre; las zonas descubiertas son atacadas por una sustancia química. Este sistema de impresión se usa para imprimir muchas cantidades, sin perder definición [1].



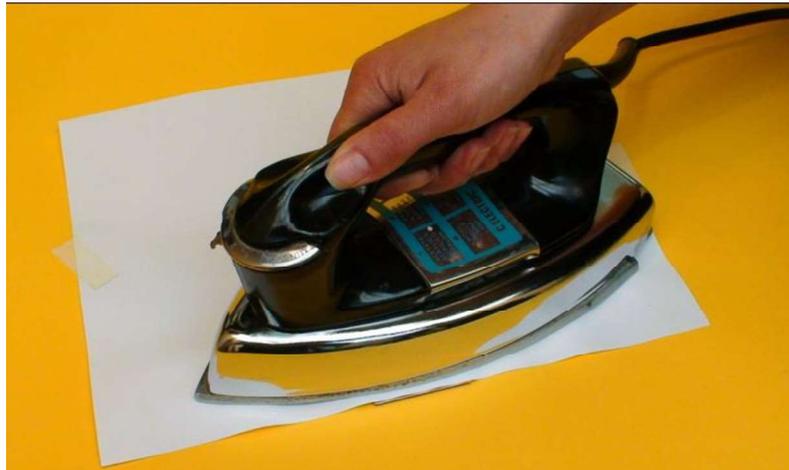
**Figura 1.3.** *Impresión por serigrafía casera.*

*Fuente: [http://i.ytimg.com/vi/cdFgO\\_v3sbk/maxresdefault.jpg](http://i.ytimg.com/vi/cdFgO_v3sbk/maxresdefault.jpg)*

### 1.6 Por transferencia térmica de toner

Este método consiste en crear una imagen negativa en un papel brillante y liso con el fin de que el toner no se adhiera completamente a dicho papel. Antes de realizar la transferencia del diseño a la placa, dicha placa debe someterse a un proceso de limpieza con el fin de eliminar toda suciedad que pueda transferir con el proceso, posteriormente se juntan la imagen negativa y la placa para realizar el planchado

calentando los dos materiales para permitir la transferencia de la imagen negativa a la placa de cobre, se procede entonces a disolver el cobre no necesario introduciendo la placa en un agente químico atacante, uno de los más utilizados es el cloruro férrico en solución de soda caustica [1]. Ver figura 1.4.



**Figura 1.4.** *Planchado de circuito impreso.*

*Fuente: [http://construyasuvideorockola.com/imagenes/impresos/PCB\\_09.jpg](http://construyasuvideorockola.com/imagenes/impresos/PCB_09.jpg)*

## **1.7 Fresado CNC**

Se utiliza una fresadora de control numérico de tres ejes para quitar el cobre del sustrato. La fresadora control numérico CNC funciona en forma similar a un plotter, recibiendo comandos desde un programa que controla el cabezal de los tres ejes X, Y y Z. Los datos para controlar la máquina son generados por el programa de diseño y son almacenados en un formato HPGL o Gerber [1]. Ver figura 1.5.



**Figura 1.5.** *Fabricación de circuitos impresos por CNC.*

*Fuente: <http://cnc-robotica.com/es/inicio/411-pcb-s-circuitos-impresos.html>*

## **1.8 Análisis de los métodos de fabricación de los circuitos impresos**

El fotograbado es una técnica de fabricación presente en la fabricación industrial de grandes volúmenes de circuitos impresos, donde se imprime por separado la película fotosensible y a continuación se transfiere el grabado a la placa. El espacio que ocupa el fotoplotter de cumplir con ciertas características, entre las que destaca un lugar con muy poca iluminación similar a un cuarto de revelado fotográfico.

El proceso por impresión serigráfica es un método utilizado principalmente en las grandes industrias de producción de circuitos impresos, donde se evidencia que su capacidad de producción es muy alta, sus equipos son robustos y especializados, la utilización de tintas y solventes químicos, generan un impacto ambiental significativo, además su tiempo de producción es mayor comparado con otros procesos.

Proceso por transferencia térmica de toner es una de las técnicas viables para la producción de prototipos caseros ya que poseen baja calidad y resolución, además de que resulta contaminante a la hora de atacar el cobre sobrante.

### 1.9 Ventajas y desventajas de cada método

En la tabla 1.1 se caracterizan cada uno de los métodos descritos, así se tendrá más claridad sobre cual método más viable utilizar.

**Tabla 1.1.** Ventajas y desventajas de los métodos de elaboración de PCB's. Fuente: Elaboración propia.

Método	Costo de equipos	Volumen de producción	Nivel de automatización	Exactitud
Fotograbado	Alto	Medio	Alto	Alto
Impresión por serigrafía	Medio	Alto	Medio	Alto
Transferencia de toner	Bajo	Bajo	Bajo	Baja
Fresado CNC	Bajo	Bajo	Medio	Media

### 1.10 Procesamiento rápido multi-resolución de imagen para la manufactura de PCB

En este trabajo se aborda el problema de localizar las características visuales en un circuito impreso para facilitar la fabricación y el montaje automatizado de los PCB's presentando un algoritmo que es capaz de localizar características en la imagen de un PCB a cualquier escala rápidamente y luego determinar su posición.

Este algoritmo se basa en la suma parcial de los niveles de gris de la imagen, como se explica a continuación:

Considerar una fila  $X$  de pixeles de una imagen  $I$ , donde  $1 \leq x \leq X$ , (ecuación 1). Y una segunda estructura de datos  $J$  que se genera de la suma acumulada de valores de  $I$ . [2]

$$J(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ \sum_{i=1}^x I(i), & 1 \leq x \leq X \end{cases} \quad (1)$$

$J(x)$  contiene la suma parcial de los niveles de gris de manera arbitraria de los pixeles consecutivos de  $I$ , desde  $I(r)$  hasta  $I(s)$  inclusive (ecuación 2).

$$\sum_{i=r}^s I(i) = J(s) - J(r - 1) \quad (2)$$

Este método puede extenderse a cualquier número de dimensiones, pero es el de dos dimensiones el más interesante debido a su aplicación en el procesamiento de imágenes. Estos dos pasos son necesarios para el procesamiento. En el primero se calcula la suma parcial para cada fila de la imagen. Como se muestra en la ecuación 3:

$$J(x, y) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ \sum_{i=1}^x I(i, y), & x = 1, 2, \dots, X \end{cases} \quad (3)$$

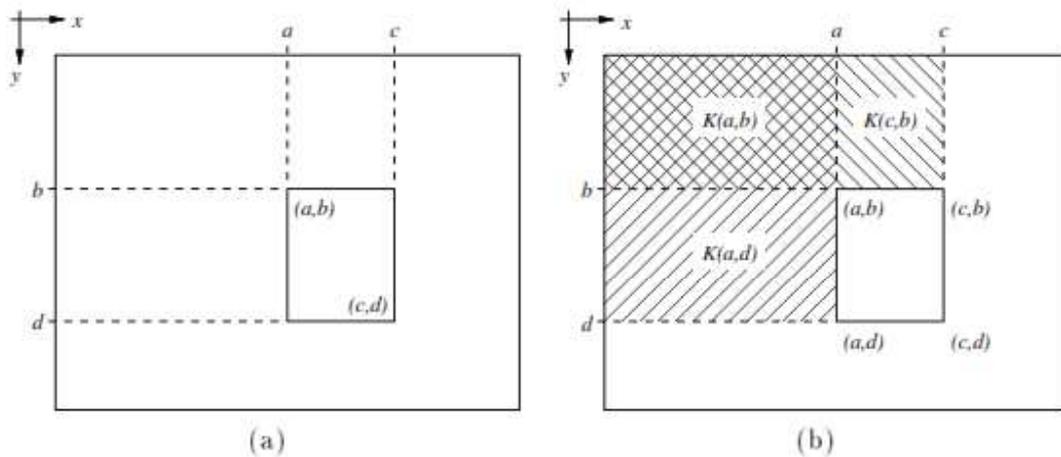
En el segundo paso se calcula la suma parcial vertical de la matriz  $J(x, y)$ , como se muestra en la ecuación 4:

$$K(x, y) = \begin{cases} 0, & x = 0 \text{ o } y = 0 \\ \sum_{j=1}^y J(x, j), & x = 1, 2, \dots, X; y = 1, 2, \dots, Y \end{cases} \quad (4)$$

Cada elemento  $K(x,y)$  contiene la suma de los niveles de gris de todos los pixeles desde la izquierda hacia la derecha, incluyendo la posición de los pixeles  $I(x,y)$  en la imagen  $I$  esto ahora es posible con la suma de los niveles de gris dentro de cualquier área rectangular de la imagen  $I$  encerrada en  $I(a,b)$  y  $I(c,d)$  (ver figura. 1).  $K(c,d)$  es la suma de los niveles de gris de todos los pixeles de izquierda y sobre  $I(c,d)$ .

Tal que, (ecuación 5):

$$\sum_{x=a}^c \sum_{y=b}^d I(x,y) = K(c,d) - K(a-1,d) - K(c,b-1) + K(a-1,b-1) \quad (5)$$



**Figura 1.6.** a) Región rectangular en  $I$  definida por dos vértices; b) Usando  $K$  la suma de niveles de gris en la región. [2]

Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo se muestran en las figuras 2, 3 y 4.

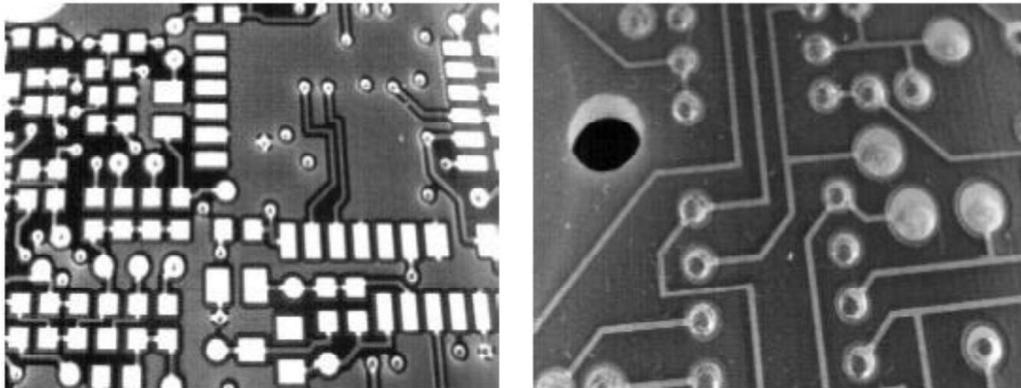


Figura 1.7. a) & b) Imágenes de prueba. [2]

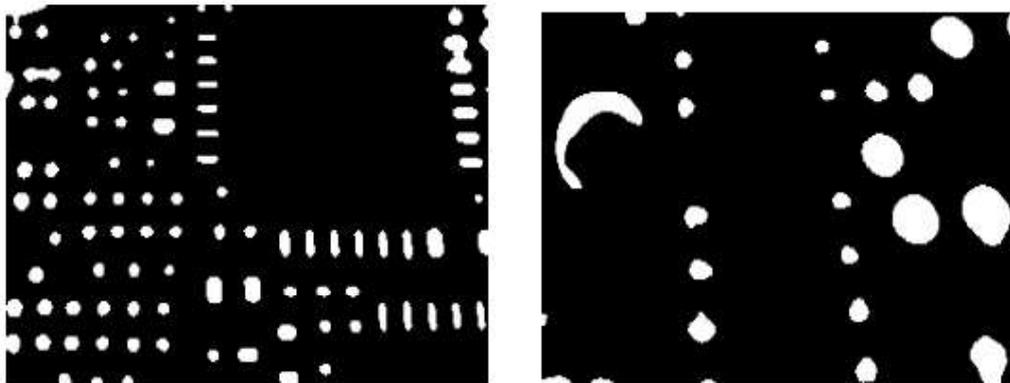


Figura 1.8. Resultados de la detección de características. [2]

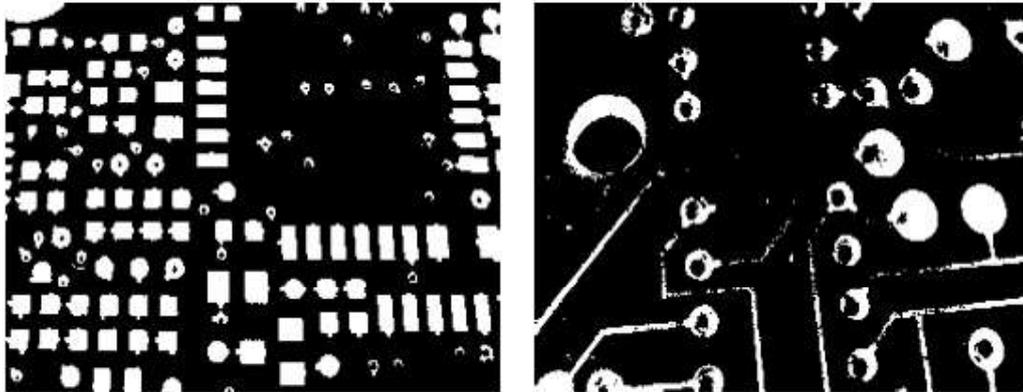


Figura 1.9. Resultados utilizando un umbral simple. [2]

### 1.11 Máquinas CNC con sistema de visión artificial

En esta sección se mencionan desarrollos de máquinas CNC con visión artificial para la medición de piezas en el área industrial.

#### 1.11.1 PP4 SMD Pick and Place Machine and Paste Dispenser

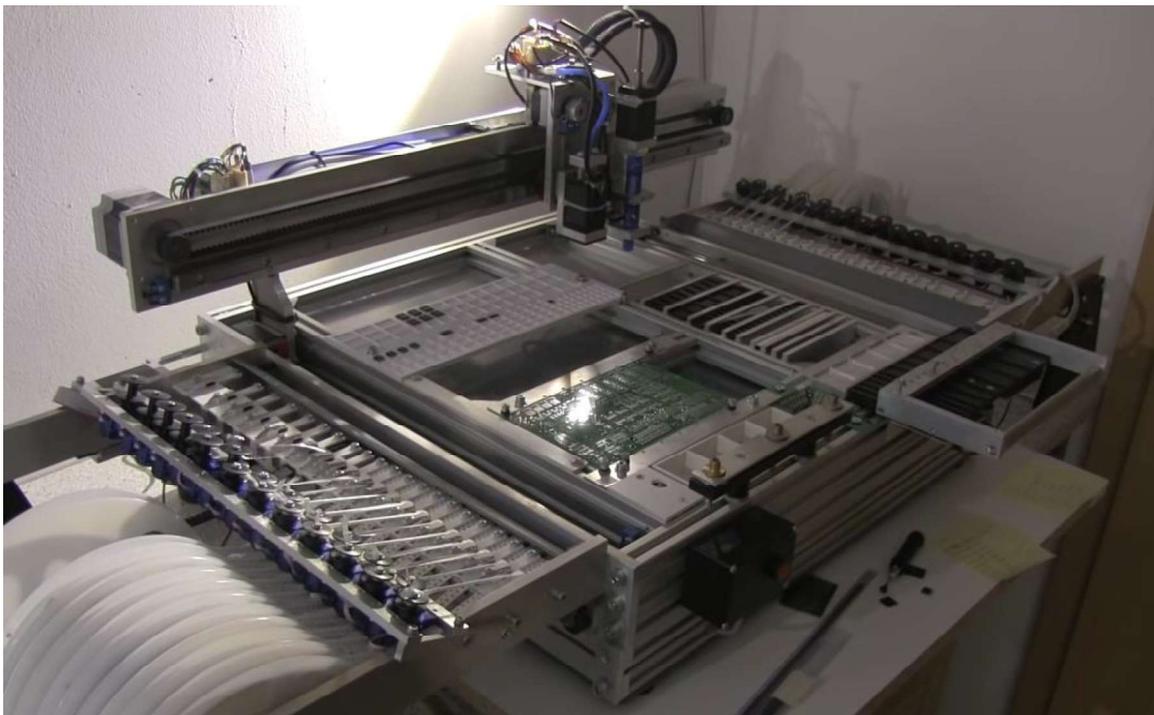
Es una maquina SMD Pick & Place aun en desarrollo por VB's Projects para la elaboración de PCB, realiza un ciclo completo de dispensación de pasta para soldar, colocación de componentes y soldadura por reflujo de pequeñas piezas de hasta 0.65 mm, por medio de visión artificial [3].

Partes Mecánicas: la trasmisión se realiza por medio de rieles lineales, los ejes x, y son controlados por servomotores *BLDC* con *encoders* de 2000 imp/rev y el movimiento es transmitido por medio bandas *HDT5*, consta de 2 ejes Z uno para la ubicación del componente y otro para el dispensado de la pasta. Utiliza una cámara con luz led montada en el cabezal de colocación y se utiliza para encontrar las marcas de referencia en el *PCB* y para hacer una comprobación de ubicación visual después que la colocación de los componentes haya terminado.

Otra montada dentro de la maquina se utiliza para la alineación de los componentes, ambas cámaras son *USB (Microsoft LifeCam Cinema)*.

Controladores: el dispositivo se comunica a la *PC* vía *USB* usando un chip *FTDI* y la *CPU* principal es *PIC* de 32 bits de *Microchip*®, los ejes *X* e *Y* se controlan mediante el controlador *UPCX530 BLDC*. Los controladores de motores paso a paso son los *TB6560AH* de *Toshiba*®; tiene separadores automáticos para controlar los dispensadores de componentes controlados por *dsPIC*.

El software empleado es el *Delphi XE4*, la sección de visión utiliza *Open CV* y las librerías de *Delphi*. En la figura 1.10 se puede ver el dispositivo en desarrollo.



**Figura 1.10.** Prototipo PP4 SMD Pick and Place Machine and Paste Dispenser. [3]

## **CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO**

## **2.1 La tecnología de visión**

La tecnología de visión es una disciplina relativamente reciente que tuvo su introducción en la industria en la década de los 80. Aplicada en sistemas basados en la tecnología de los *PC*, se beneficia de los rápidos avances informáticos y de redes.

Se puede definir la Visión Artificial como un campo de la Inteligencia Artificial que, mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales [4].

## **2.2 Características principales en sistema de visión artificial**

- ❖ Analizan luz o color reflejado: miden nivel de luz.
- ❖ Detectan bordes y formas.
- ❖ Analizan color.
- ❖ Actúan sin contacto: No deforman el material.
- ❖ Se puede analizar un objeto en movimiento
- ❖ Son automáticos: Alta velocidad de procesado.
- ❖ Flexibles: basados en software.
- ❖ Entorno informático.

## **2.3 Componentes de un sistema de visión**

- ❖ Iluminación: en los sistemas industriales puede estar sujeta a control estricto.
- ❖ Cámara/Sensor.
- ❖ Sistema de procesado/Reconocimiento.
- ❖ Sistema de control/retroalimentación.

## **2.4 Aplicaciones de la visión artificial**

La visión se aplica en distintos sectores de la industria como, industria alimentaria, automoción, electrónica, farmacia, parking, etc. Las aplicaciones de Visión Artificial se dividen en tres grandes categorías:

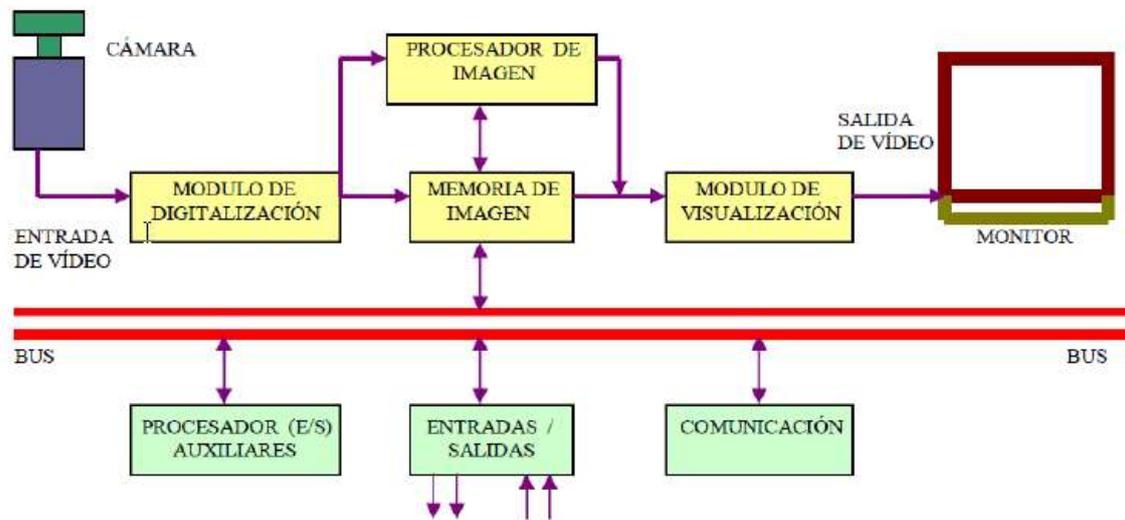
- ❖ Control de procesos.
- ❖ Control de calidad.
- ❖ Aplicaciones no Industriales.

## **2.5 Definición técnica**

La visión artificial consiste en la captación de imágenes en línea mediante cámaras CCD y su posterior tratamiento a través de técnicas de procesamiento avanzadas, permitiendo así poder intervenir sobre un proceso (modificación de las variables del mismo) o producto (detección de unidades defectuosas), para el control de calidad y seguridad de toda la producción [4]. En la figura 2.1 se observa un sistema de visión artificial.

Un sistema de visión artificial:

- ❖ Capta una imagen de un objeto real.
- ❖ La convierte en formato digital.
- ❖ La procesa mediante un ordenador.
- ❖ Obtiene unos resultados del proceso.



**Figura 2.1.** Sistema de Visión Artificial. [4]

Módulo de digitalización: Convierte la señal analógica proporcionada por la cámara a una señal digital para su posterior procesamiento.

Memoria de imagen: almacena la señal procedente del módulo de digitalización.

Módulo de visualización: convierte la señal digital residente en memoria, en señal de video analógico para poder ser visualizada en el monitor de TV.

Procesador de imagen: procesa e interpreta las imágenes captadas por la cámara.

Módulo de entradas/salidas: gestiona la entrada de sincronismo de captación de imagen y las salidas de control que actúan sobre dispositivos externos en función del resultado de la inspección.

Comunicaciones: Vía I/O, ethernet, RS232, USB3.

## **2.6 Cámara**

Su función es capturar la imagen proyectada en el sensor, vía las ópticas, para poder transferirla a un sistema electrónico. Las cámaras utilizadas en visión artificial requieren de una serie de características que permitan el control del disparo de la cámara para capturar piezas que pasen por delante de ella en la posición requerida. Son más sofisticadas que las cámaras convencionales, ya que tienen que poder realizar un control completo de: tiempos, señales, velocidad de obturación, sensibilidad, etc. [4].

Se clasifican en función de la tecnología del sensor y la disposición física:

- ❖ Cámaras de tubo: se basan en la utilización de un material fotosensible que capta la imagen, siendo leída por un haz de electrones.
- ❖ Cámaras de estado sólido CCD (Charge-Coupled-Device). Se basan en materiales semiconductores fotosensibles para cuya lectura no es necesario un barrido electrónico.
- ❖ Cámaras lineales: se basan en un sensor CCD lineal.
- ❖ Cámaras matriciales: se basan en un sensor CCD matricial, lo que permite es el análisis de imágenes bidimensionales.

### **2.6.1 Cámaras lineales.**

Construyen la imagen línea a línea realizando un barrido del objeto junto con un desplazamiento longitudinal del mismo. Las cámaras lineales utilizan sensores que tienen entre los 512 y 8192 pixels, con una longitud lo más corta posible y gran calidad de imagen. El hecho de construir imágenes de alta calidad a partir de líneas

individuales requiere de una alta precisión. La alineación y el sincronismo del sistema son críticos si se quiere obtener una imagen precisa del objeto a analizar [4].

#### **2.6.1.1 Características técnicas**

- ❖ Número de elementos del sensor: A mayor número de elementos (píxeles) mayor tamaño de la óptica.
- ❖ Velocidad: Número de píxeles capaces de ser leídos por unidad de tiempo. En las cámaras lineales es un valor mucho más alto que en las matriciales. En las cámaras de última generación se alcanzan velocidades superiores a los 200 MHz.
- ❖ Cámaras lineales a color: Tienen tres sensores lineales, uno para cada color (rojo verde y azul). Pueden ser de dos tipos:
  - Trisensor: Los sensores CCD están posicionados unos junto a otros separados por un pequeño espacio. Tienen una buena sensibilidad, pero solo pueden utilizarse en aplicaciones con superficies planas.
  - Prisma: Los sensores están posicionados en las tres caras de un prisma. Pueden utilizarse para cualquier tipo de aplicación, pero necesitan de una mayor iluminación.

#### **2.6.2 Cámaras matriciales**

El sensor cubre un área que está formada por una matriz de píxeles. Los sensores de las cámaras modernas son todos de tecnología CCD formados por miles de diodos fotosensibles posicionados de forma muy precisa en la matriz. El tamaño de

los CCD está definido en pulgadas, sin embargo, su tamaño real no tiene nada que ver con su valor en pulgadas, sino que están basados en la relación de los primeros con el tamaño de los tubos Vidicón. Formatos habituales son 1/3", 1/2" y 2/3" [4].

### 2.6.2.1 Características de los sensores

- ❖ Factor de relleno: Porcentaje del área de píxel que es sensible a la luz, el ideal es el 100%, porcentaje imposible de obtener por la separación entre los registros.
- ❖ Tipo de transferencia: Según la forma de transferencia de la información.
  - Transferencia *Inter-línea (ITL)*: Son los más comunes, utilizan registros de desplazamiento situados entre las líneas de píxel para almacenar y transferir los datos de la imagen lo que permite una alta velocidad de obturación.
  - Transferencia de cuadro: Disponen de un área dedicada al almacenamiento de la luz, la cual está separada del área activa, esto permite un mayor factor de relleno, aunque se pierde velocidad de obturación [4].
  - Cuadro entero: Son los de arquitectura más simple, emplean un registro paralelo para exposición de los fotones, integración de la carga y transporte de la misma, alcanzando con este sistema factores de relleno del 100% [4].

## 2.7 Iluminación

Conseguir una adecuada iluminación es de importancia para extraer características deseadas del objeto, que permitan al sistema de visión realizar tareas de inspección, medición, clasificación, monitorización y control de los procesos [6].

Se debe elegir una iluminación suficiente e idónea, para que el procesamiento de la imagen se realice en menor tiempo y el proceso de inspección sea lo más rápido posible, ya que el sistema no tendrá que realizar un tratamiento extra para mejorar la imagen. Existen diferentes tipos de iluminación y cada una se adecúa a la necesidad de lo que se requiera extraer [6]:

- ❖ Iluminación por fibra óptica.
- ❖ Iluminación fluorescente.
- ❖ Iluminación por LED.
- ❖ Iluminación Laser.

## 2.8 Cámara de visión industrial con interfaz USB3

La cámara *Basler® Ace acA1300-30um/uc*. Con interfaz *USB3 VISION*, esta cámara la provee la compañía *National Instrument®*, de uso industrial y para su segmento comparado con otras marcas, son de bajo costo. Es una cámara *Progressive Scan* (escaneo progresivo) para superficies y es ideal para el prototipo que aquí se describe; es una cámara de tipo monocromática ya que en la mayoría de los procesos de inspección se utilizan en escala de grises para evitar un procesamiento extra. La resolución de esta cámara es de 1296 X 966. En la figura 2.2 se observa la cámara.



**Figura 2.2.** Cámara Basler Ace aCA1300-30uc.

Fuente: <http://www.baslerweb.com>

## 2.9 Comunicación USB3

Las señales eléctricas de una cámara forman la señal de video, existe la tendencia de digitalizarla. Para ser tratadas es necesario un muestreo y una cuantificación, ambas tareas las realiza una tarjeta de adquisición o frame grabber. La tarea de estas tarjetas es adquirir la imagen, digitalizarla y transferirla a la memoria de la computadora a fin de realizar el procesamiento adecuado [6], pero en la actualidad se están empleando tecnologías de *USB* y conexión a red *Ethernet* que empiezan a sustituir a este tipo de tarjetas. Algunas ventajas de utilizar una conexión *USB3* son las siguientes [6].

- ❖ Los datos pueden ser transferidos mucho más rápido que las interfaces actuales.
- ❖ Fácil integración.
- ❖ Puede alcanzar velocidades de 5Gbps/s.
- ❖ Conexión *plug and play*.

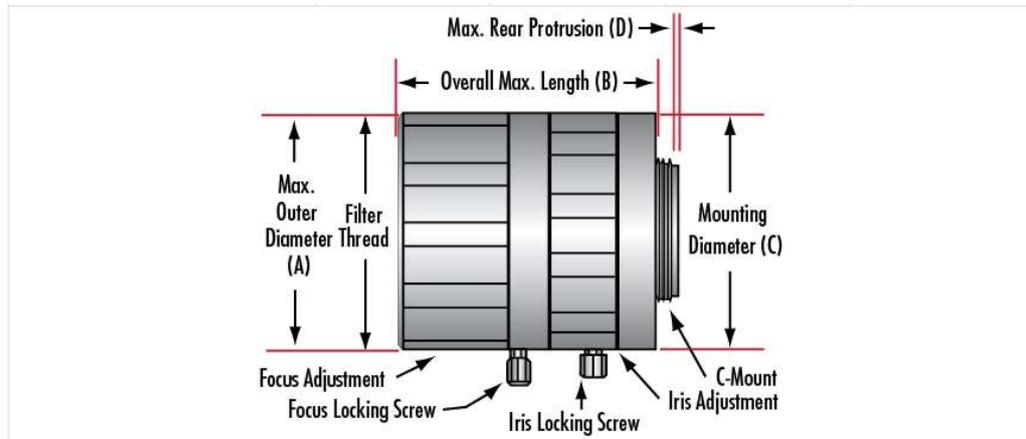
El protocolo *USB* es hoy en día la interfaz más utilizada, por qué utilizarla en una cámara de visión, esto es debido a la sencillez de conectividad y adaptabilidad. *USB3* es una mejora del *USB* tradicional alcanzando velocidades de 5Gbt/s. Sin embargo, las cámaras aún no llegan a esas velocidades de transmisión de datos, pero utilizar una cámara con conectividad a *USB3* nos da la ventaja de fácil integración [6].

## 2.10 Óptica

La óptica son los lentes que construyen la imagen para que el sensor obtenga la luz necesaria y pueda realizarse la captación adecuada. El lente a utilizar es el *Compact Fixed FL lens 3.5 mm*, número de parte 784587-01. *National Instruments®* ofrece lentes estándares de montura *C* fabricados por *Edmund Optics*, un proveedor líder de lentes para visión artificial. Estos lentes funcionan con cualquier cámara de montura *C*, incluyendo cámaras de visión artificial *Basler®* y *NI Smart Cameras*.

**Tabla 2.1.** Distancias focales para un lente de 3.5 mm. Fuente:  
<https://www.edmundoptics.com/imaging-lenses/fixed-focal-length-lenses/c-series-lenses/89410/>

<b>Focal Length</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
3.5mm	50mm	39.3mm	32mm	2.72mm
4.5mm	40mm	37.5mm	32mm	2.78mm
6mm	36mm	48.9mm	35.8mm	1.4mm
8.5mm	32mm	34.5mm	32mm	0mm
12mm	32mm	27.9mm	32mm	0.5mm
16mm	33mm	40.5mm	33mm	1mm
25mm	31mm	30.5mm	31mm	1.3mm
35mm	33mm	41mm	33mm	0mm
50mm	35.8mm	53.7mm	35.8mm	2.85mm
100mm	52mm	93.5mm	41mm	7mm



**Figura 2.3.** Óptica compact Fixed FL Lens 3.5 mm.

Fuente: <https://www.edmundoptics.com/imaging-lenses/fixed-focal-length-lenses/c-series-lenses/89410/>

## 2.11 Resolución especial

La resolución especial es la cantidad de píxeles por área física se decide a partir de que tan pequeños sean los errores a detectar, la extensión del área a inspeccionar, la distancia de la cámara al objeto a inspeccionar y exigencias del algoritmo de detección. Eso tiene como objetivo obtener un parámetro que indique el número de píxeles o puntos por centímetro cuadrado (*PPC*) o píxeles o puntos por centímetro cuadrado (*PPC*) o píxeles por pulgada cuadrada (*PPI*), según estándar norteamericano [7] [8].

## 2.12 Tratamiento básico de Imágenes en Matlab

Existen varias técnicas y algoritmos para la detección de los *PAD*'s en el proceso de manufactura de *PCB*'s, por lo tanto, este tema estará enfocado a la teoría básica del tratamiento de imágenes con *Matlab*®.

### 2.12.1 Image Processing Toolbox de Matlab

Proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencias y *apps* de flujo de trabajo para el procesamiento, el análisis y la visualización de imágenes, así como para el desarrollo de algoritmos. Puede llevar acabo segmentación de imágenes, mejora de imágenes, reducción de ruido, transformaciones geométricas, registro de imágenes y procesamiento de imágenes *3D*. A continuación, se hará una breve descripción de los comandos utilizados en el algoritmo que se implementará.

### 2.12.2 Imread

Lee una imagen desde el archivo especificando por el nombre del archivo, deduciendo el formato del archivo de su contenido. Si el nombre de la imagen es un archivo de múltiples imágenes, *imread* lee la primera imagen del archivo [9].

Sintaxis:

```
I=imread('filename');
```

### 2.12.3 Graythresh

Calcula un umbral nivel global, que puede usarse para convertir una imagen a binaria. La función *graythresh* utiliza el método de *Otsu*, que elige el umbral para minimizar la varianza intraclase de los píxeles en blanco y negro [10].

Sintaxis:

```
level=graythresh(I)
```

#### 2.12.4 *Im2bw*

Convierte la imagen en escala de grises en una imagen binaria. La imagen de salida *BW* reemplaza todos los píxeles de la imagen de entrada con luminancia mayor que el nivel con valor 1 (blanco) y reemplaza todos los píxeles con el valor 0 (negro). Especifique el nivel en el rango [0,1]. Este rango es relativo a los niveles de señal posibles para la clase de la imagen. Por lo tanto, un valor de nivel de 0.5 es a medio camino entre blanco y negro, independientemente de la clase. Para calcular el argumento de nivel, puede utilizar la función *graythresh*. Si no especifica nivel, *im2bw* utiliza el valor 0.5 [11].

Sintaxis:

```
BW=im2bw(I,level);
```

#### 2.12.5 *Centroid*

Devuelve un vector *1XQ* que especifica el centro de masa de la región. El primer elemento del *Centroid* es la coordenada horizontal (o coordenada x) del centro de masa, y el segundo elemento es la coordenada vertical (o coordenada y). Todos los demás elementos de *Centroid* están en orden de dimensión [12].

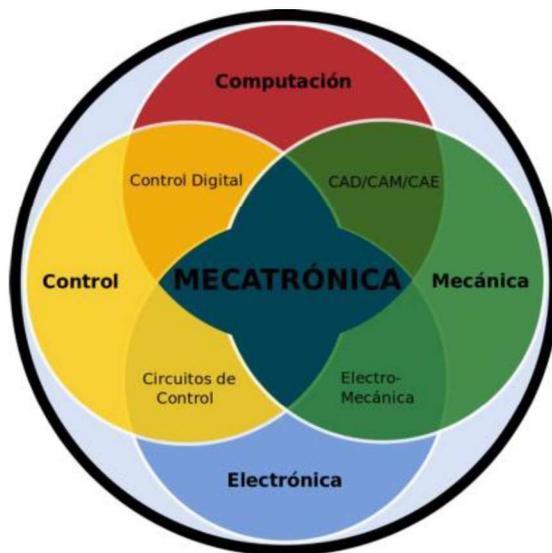
Sintaxis:

```
S=regionprops(BW,'centroid');
```

### 2.13 Revisión de las tecnologías y materiales disponibles para la implementación del sistema

Se pretende en esta sección elegir los materiales y componentes necesarios o más variables para el diseño del sistema.

Un sistema mecatrónico se define como la sinergia de la electrónica, la mecánica, los sistemas de control y computación. Dichos elementos conforman un sistema mecatrónico, y se puede tomar como ejemplo una máquina *CNC* automática para fabricar circuitos impresos. En la figura 2.4 se muestra la sinergia de un sistema mecatrónico.



**Figura 2.4.** Sistema mecatrónico.

Fuente: <http://www.ni.com/white-paper/53254/es/>

## 2.14 Software de control de la máquina

*Mach3®*: convierte una computadora típica en un controlador de máquina *CNC*. Es muy rico en características y ofrece un gran valor para aquellos que necesitan un paquete de control de *CNC*. *Mach3®* funciona en la mayoría de *PC* de Windows para controlar el movimiento de los motores (de pasos) mediante el procesamiento de *G-Code*. Mientras que comprende muchas características avanzadas, es el software de

control más intuitivo *CNC* disponible. *Mach3*® es adaptable y se ha utilizado para muchas aplicaciones con numerosos tipos de hardware [13].

*CirQWizard*®: es un software de código abierto multiplataforma diseñado para controlar máquinas de control numérico cuyo fin es la fabricación de *PCB*.

Tal como es, está perfectamente adaptado para trabajar con máquinas *Cirqoid*. Pero, al ser código abierto y que tiene una arquitectura modular, se puede adaptar a cualquier máquina de su elección [14].

*Grbl controller*: software libre de control soportado por GRBL, ideal para trabajar con hardware de bajo poder como el *raspberry Pi*® y *Arduino*®.

*Universal G-code sender*: software libre multiplataforma diseñado para correr bajo *RGBL*, sencillo de usar y con las herramientas básicas de una *CNC*.

*GRBL*: es un firmware libre disponible para ejecutarse en la plataforma *Arduino Uno*®, cuya función es brindar la capacidad de interpretación de *código G* a dicha placa.

## **2.15 Software de diseño de circuitos**

*Eagle*®: su nombre proviene de las siglas en inglés *Easily Applicable Graphical Layout Editor*, es un software de diseño de circuitos impresos el cual posee un autoenrutador; ha tomado gran acogida a nivel mundial ya que es muy utilizado en proyectos “hágalo usted mismo”; además es un programa con licencia freeware, aclarando que existen versiones de pago como la versión *free*. Una de sus mayores ventajas es que posee una gran variedad de elementos para el diseño electrónico dispuesto en una gran variedad cantidad de bibliotecas [15].

*Proteus®*: es una compilación de programas de diseño y simulación electrónica, desarrollado por *Labcenter Electronics* que consta de los dos programas principales: *Ares* e *Isis* y los módulos *VSM* y *Electra* [16].

*NI MultiSim® (Electronics Workbench)*: *NI Multisim®* es una poderosa herramienta para el diseño electrónico. Fue diseñado pensando en las necesidades de educadores y estudiantes, además de cumplir ampliamente con los requerimientos de los ingenieros y diseñadores a nivel profesional. Cuenta con nuevas características técnicas como puntas de prueba industriales, intercambio de datos con instrumentos virtuales y “reales”, corrector de errores y sugerencias de cambios sobre el circuito, simulación integrada con microcontroladores.

*Liveware®*: es un sofisticado software para el diseño para el diseño y simulación de circuitos electrónicos, interruptores, transistores, diodos, circuitos integrados y cientos de componentes más pueden ser interconectados para observar el comportamiento de un circuito. No hay límites para diseñar, no hay falsos contactos o componentes defectuosos por qué preocuparse [17].

## **2.16 Software para el diseño mecánico**

*COMSOL®*: Es una plataforma de software de propósito general, basado en métodos numéricos avanzados, para el modelado y simulación de problemas basados en física. Con *COMSOL® Multiphysics*, se pueden resolver problemas acoplados o multifísicos. Con más de 30 productos adicionales para elegir, se puede ampliar más la plataforma de simulación [18].

*AUTODESK INVENTOR PRO®*: Autodesk Inventor es un programa de diseño mecánico y para desarrollo de producto 3D que permite integrar AutoCAD® y los datos 3D en un solo modelo digital para crear un prototipo digital del producto final.

El software Inventor puede ser usado para diseño de producto, moldes, chapa metálica, simulación y comunicación del diseño en 3D.

*SOLIDWORKS®*: es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas. Las principales características que hace de SolidWorks® una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variacional y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además, utiliza el gestor de diseño que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados.

## **2.16 Hardware de control de la máquina**

*Arduino®*: es una de las plataformas de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos. El microprocesador en la placa *Arduino®* de marca *Atmel®* se programa mediante un lenguaje de programación y el entorno de desarrollo *Arduino®* (basado en *Processing®*). Los proyectos hechos con *Arduino®* pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tiene la posibilidad de hacerlo y

comunicar con diferentes tipos de software (por ejemplo: *Matlab*®, *Processing*®, *Visual Basic*®) [19].

*Raspberry PI*®: es una tarjeta de ordenador de bajo costo que se conecta a un monitor de ordenador o un televisor, y utiliza un teclado y un ratón estándar. Es un dispositivo que permite que las personas de todas las edades explorar la computación y aprender a programar en lenguajes como *Scratch*® y *Python*®. Es capaz de hacer todo lo que espera un ordenador de sobremesa puede hacer, desde navegar por internet y reproducción de video de alta definición, hasta hacer hojas de cálculo, procesador de textos y jugar [20].

*Microcontrolador PIC*: son los circuitos integrados de *Microchip Technology Inc.*, que pertenece a la categoría de componentes que integran en un único dispositivo todos los circuitos necesarios para realizar un completo sistema digital programable [21].

En la industria de la electrónica se encuentran gran cantidad de dispositivos de control como *PLC*; sin embargo, se opta por mencionar aquellos que, teniendo en cuenta el hecho de que se trata de un proyecto de aplicación de conocimiento, se consideran adecuados por su fácil utilización y experiencia de uso.

## **2.17 Hardware de desplazamiento de órganos móviles**

Motores de paso a paso: el motor de paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos electrónicos en desplazamiento angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control. Este motor presenta las ventajas de

tener alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. Entre sus principales aplicaciones destacan como motor de frecuencia variable, motor de corriente continua sin escobillas, servomotores y motores controlados digitalmente [22].

Servomotores: son dispositivos que poseen un motor acoplado a una serie de piñones cuya posición de eje es controlada mediante una señal codificada de pulsos eléctricos.

## **2.17 Hardware controlador de motores**

*Grbl shield*: Es un controlador de motores paso a paso diseñado para trabajar con tres motores bipolares de hasta 2.5 amperes y es compatible con el firmware *grbl*.

*Gecko drive Gm215*: es un controlador para motores paso a paso, capaz de manejar motores Nema y soporta codificadores de alta resolución. Es recomendado para uso en robótica, industria de automatización y manufactura. Su tamaño es pequeño y su manual de uso e implementación es fácil de entender [23].

*Controlador Arduino CNC shield*: es un circuito desarrollado para ser usado con la plataforma *Arduino*®, capaz de controlar hasta 4 motores paso a paso, con el uso del controlador de motor paso a paso *A4988* que es un pequeño chip de fácil operación capaz de controlar motores paso a paso de hasta 2 amperes y 35 voltios de salida; además de contar con un regulador de corriente *Controlador EasyDriver* para motores paso a paso. Este controlador *CNC* es además compatible con el firmware *grbl*.

Controlador de motores paso a paso con *L297* y *L298*, el chip *L297* es un controlador de motores paso a paso, el cual carece de la parte de potencia, es decir,

de los puentes *H* de salida. El *L298* son dos puentes *H* completos, necesarios para excitar un motor paso a paso bipolar, es como *L293* pero con menor potencia [24].

## **CAPÍTULO III – DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA**

### 3.1 Planteamiento del diseño

El diseño que se plantea elaborar se guiará bajo los siguientes lineamientos:

**Bajo costo:** se busca que al momento de la fabricación de la maquina sea de un costo relativamente bajo, asequible para la institución.

**Componentes de fácil adquisición:** se espera elaborar un diseño en el cual se utilice la mayor cantidad posible de elementos que se puedan adquirir en el mercado local y regional; sin embargo, no se descarta la adquisición de piezas en el exterior, debido a las necesidades específicas.

**Exactitud:** se espera inicialmente una exactitud de al menos 0.1 mm, se defina por la menor exactitud encontrada entre las piezas, que se cree, puede ser en este caso, el tipo de transmisión de movimiento usado entre los motores y los correspondientes ejes de trabajo X, Y y Z.

**Programación:** la programación para poner en marcha los sistemas que controlan la maquina al mecanizar el circuito impreso, debe ser en un lenguaje claro y ampliamente conocido; en lo posible se aplicará la estandarización con códigos G&M, un lenguaje bastante usado en las máquinas CNC.

**El tamaño máximo de un circuito impreso:** se limita principalmente a elaborar circuitos no muy complejos, de un tamaño moderadamente pequeño, de una sola capa. Dicho esto, el tamaño de 25 X 25 cm, ya se considera suficiente para la mayoría de aplicaciones convencionales.

**Funcionalidad:** Con la adecuada selección de los elementos se espera un adecuado funcionamiento del sistema, acorde a los requerimientos anteriormente planteados.

### 3.2 Diagrama de bloques del sistema

La arquitectura esperada del sistema a diseñar obedece al diagrama en la figura 3.1; se presenta los procesos a seguir, desde el diseño del circuito hasta su fabricación.

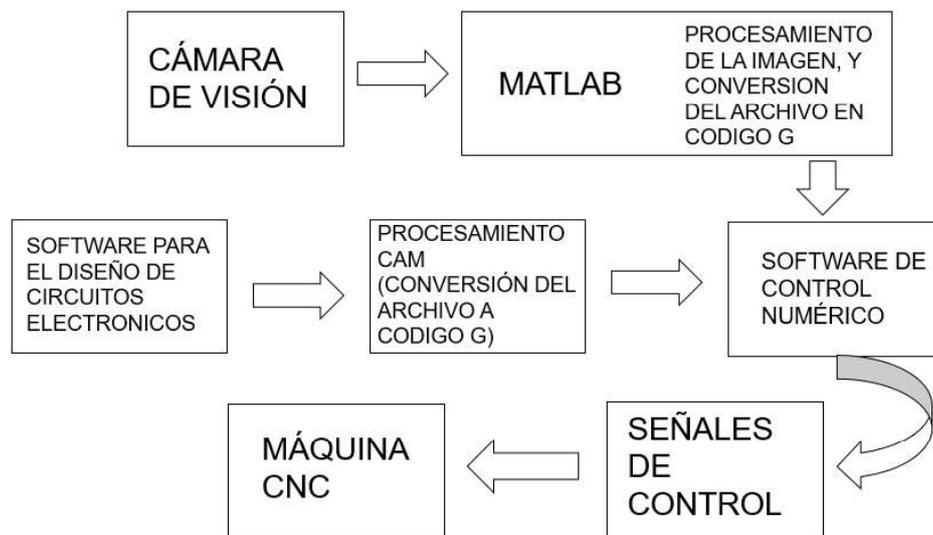


Figura 3.1. Diagrama de bloques. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Elección del método más viable

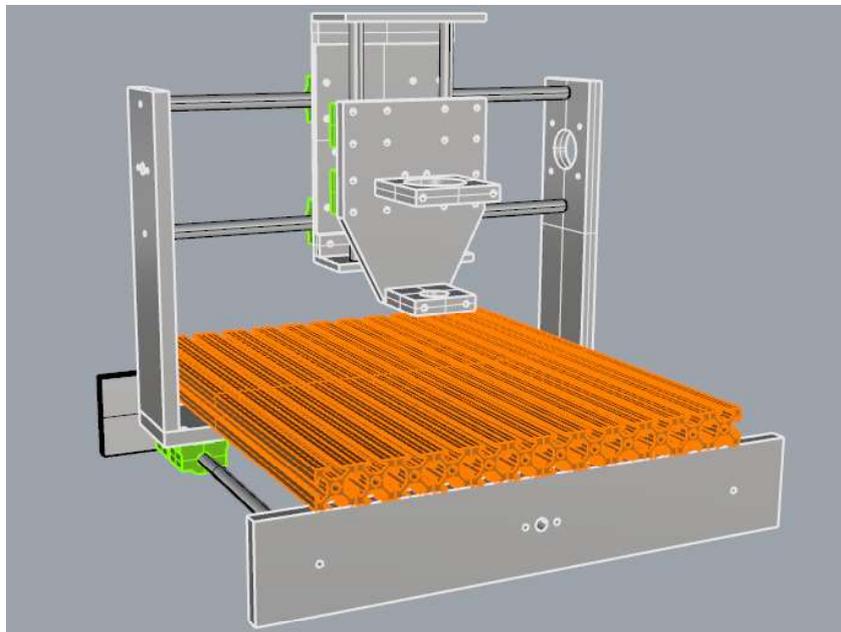
Se propone el diseño de una máquina de control numérico computarizado *CNC* para fabricación de *PCB*, aplicando la técnica de mecanizado por fresado; con fresados longitudinales o transversales se generarán las pistas del circuito, y posteriormente se utilizará un sistema de visión para realizar el posicionamiento y taladro de los agujeros por último se realizará montaje de los componentes electrónicos que integran el circuito. Se decide elegir el método de mecanizado por fresado debido a lo siguiente:

- Puede integrarse conveniente con la mayoría de los componentes de los sistemas mecatrónicos.

- Es uno de los métodos de fabricación más limpios que se pueden implementar para fabricar bajos lotes de circuitos impresos.
- No utiliza sustancias tóxicas para su fabricación como el cloruro férrico que se utiliza para grabar o decapar el cobre en una reacción *redox*.
- El costo de la máquina es mucho más bajo que la maquinaria que se utiliza en otros métodos.
- El mantenimiento es poco frecuente y menos riguroso.

### 3.3 Bosquejo inicial del sistema mecánico

En la figura 3.2, se puede observar la estructura propuesta para la máquina *CNC*, será de tres ejes (*X*, *Y* y *Z*) y con la mesa de trabajo ranurada para fijar la baquelita o materiales a trabajar con tornillos o *grippers*.



**Figura 3.2.** *Diseño inicial de la máquina CNC. Fuente: Elaboración propia.*

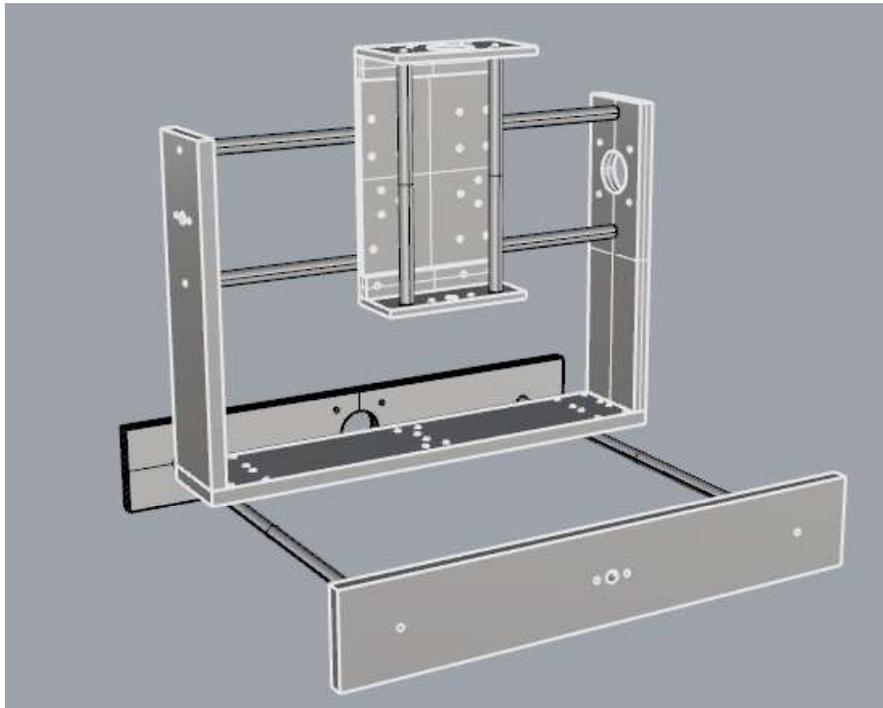
### **3.4 Diseño del sistema mecánico y estructural**

En este punto se pretende realizar el diseño mecánico y estructural siguiendo las características mencionadas en el planteamiento original.

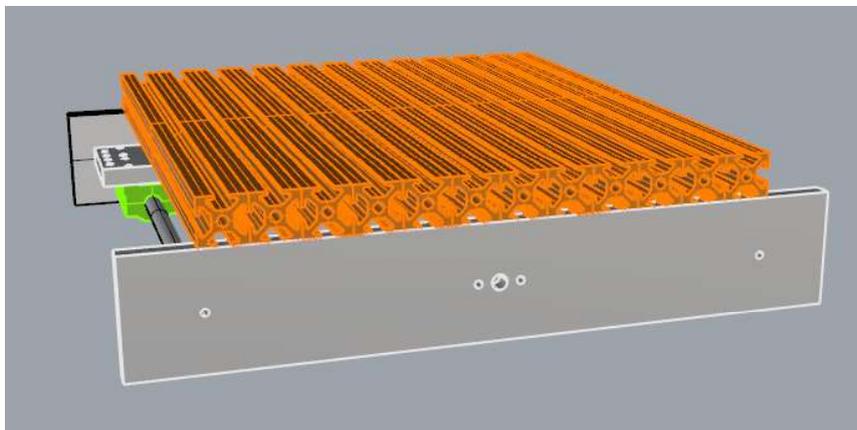
Revisando las opciones de diseño estructural de la máquina se llegó a la conclusión que se usará solera de aluminio de: 3" X 1/2", 4" X 1/4" y 6" X 1/2"; para la mesa de fresado, perfilaría de aluminio estructural, ya que este tipo de perfiles de aluminio cuenta con sistema de sujeción y de deslizamiento lineales que resultan apropiados para la máquina; buscando en el mercado se encontró una empresa de Estados Unidos cuyo nombre es *Parker®*, la cual tiene una distribuidora en Mérida Yucatán.

#### **3.4.1 Diseño del bastidor**

En la figura 3.3 se observa el diseño del bastidor principal en solera de aluminio de 3" X 1/2". En la figura 3.4 se observa el perfil utilizado (perfil estructural de 30 X 30 mm) para el diseño de la mesa de fresado.



**Figura 3.3.** Bastidor principal de máquina CNC. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.4.** Mesa de trabajo de la máquina. Fuente: Elaboración propia.

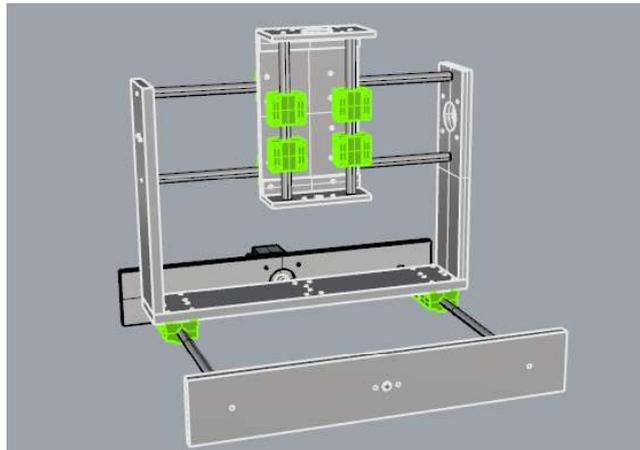
### **3.4.2 Diseño del sistema de desplazamiento lineal**

El sistema de desplazamiento lineal de los ejes X, Y y Z se realizará por medio de varillas de acero templado cromado de 12mm de diámetro (por su dureza y

resistencia a la oxidación), para reducir la fricción por el movimiento de los ejes se usarán baleros lineales *modelo SC12UU* de 12mm para acoplar cada uno de los ejes al bastidor principal. Para transmitir el movimiento de los motores a cada uno de los ejes se utilizará tornillo de 4 hilos de un paso de 8mm por revolución con su respectiva tuerca. El acople de los motores a los tornillos se realizará por medio de un *copple* de aluminio ranurado para obtener flexibilidad en el montaje y ajuste de los motores y del otro extremo se fijará por medio de una chumacera tipo pared de 8mm de diámetro. En la figura 3.5 se observa un ejemplo del montaje propuesto para el eje Z de la máquina, que será el mismo que se aplicará para los ejes X y Y, solo se aumentará la carrera de cada uno de los ejes, ver figura 3.6.



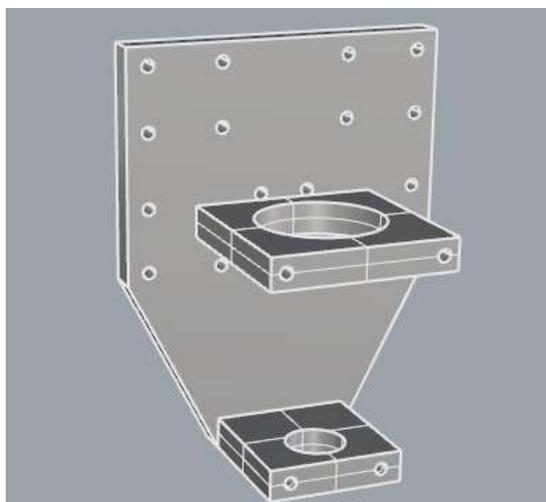
**Figura 3.5.** Propuesta de diseño para el eje Z. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.6.** Propuesta de diseño para la transmisión de los ejes X, Y y Z. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Soporte de la herramienta de fresado

Como se pretende utilizar un rectificador se requiere un elemento que pueda sujetar la herramienta y cual tenga la cualidad de soportar otros tipos de herramientas, en la figura 3.7 se muestra el diseño de la pieza que sujetara el rectificador.



**Figura 3.7.** Soporte para el rectificador. Fuente: Elaboración propia.

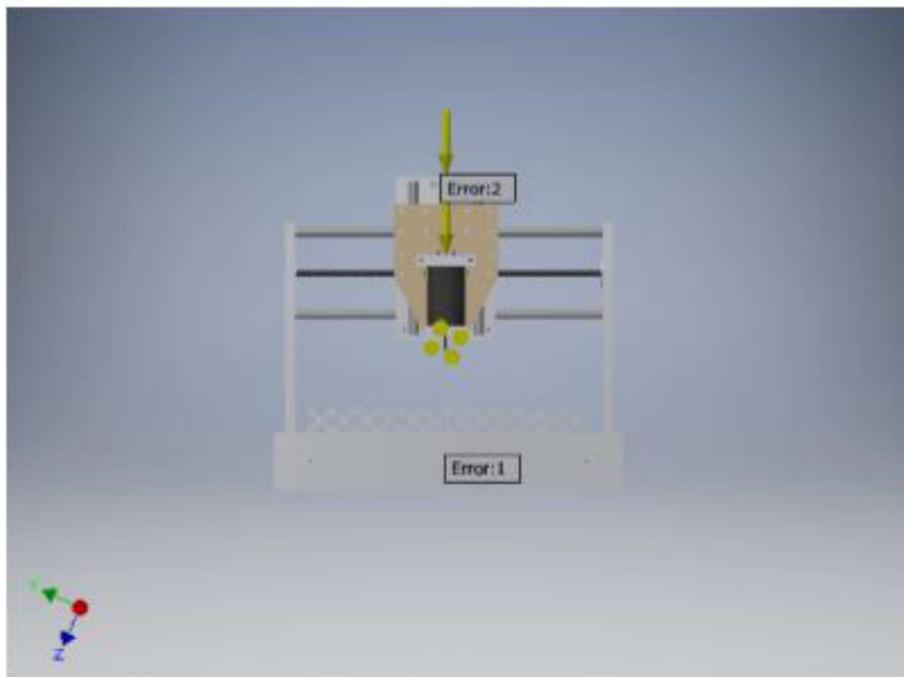
### 3.5 Software para la simulación del diseño estructural del sistema

Para la elaboración del diseño CAD de la máquina, se eligió el programa *Autodesk Inventor educacional*®; el cual es un software de diseño mecánico y de

simulación 3D. Además, este programa cuenta con un conjunto de herramientas fáciles de usar. Y por último se tiene una licencia educacional.

### 3.6 Simulación de la estructura propuesta

En este punto, se mostrarán los resultados obtenidos en la simulación de esfuerzos de la estructura propuesta utilizando el software *Autodesk Inventor educacional*®. Ver figura 3.8.



**Figura 3.8.** Estructura propuesta para la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran las propiedades de los materiales utilizados para el diseño de la maquina CNC.

**Tabla 3.1.** Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 1. Fuente: Elaboración propia.

<b>NOMBRE</b>	Acero, Carbono Guías lineales	
<b>GENERAL</b>	Densidad de masa	7.85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	350 MPa
	Resistencia máxima a tracción	420 MPa
<b>TENSIÓN</b>	Módulo de Young	200 GPa
	Coefficiente de poisson	0.29 su
	Modulo cortante	77.5194 GPa

**Tabla 3.2.** Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 2. Fuente: Elaboración propia.

<b>NOMBRE</b>	Aluminio 6061 Soportes	
<b>GENERAL</b>	Densidad de masa	2.7 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	275 MPa
	Resistencia máxima a tracción	310 MPa
<b>TENSIÓN</b>	Módulo de Young	68.9 GPA
	Coefficiente de poisson	0.33 su
	Modulo cortante	25.903 GPa

**Tabla 3.3.** Propiedades de los materiales utilizados, datos obtenidos en el software de simulación, parte 3. Fuente: Elaboración propia.

<b>NOMBRE</b>	Acero, tornillo de deslizamiento	
<b>GENERAL</b>	Densidad de masa	7.85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	207 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345 MPa
<b>TENSIÓN</b>	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de poisson	0.3 su
	Modulo cortante	80.7692 GPa

En las tablas 3.3 y 3.4, se muestran los parámetros configurados en el software.

**Tabla 3.3.** Condiciones de funcionamiento, datos obtenidos en el software de simulación. Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE CARGA	FUERZA
Magnitud	40.000 N
Vector X	-0.000
Vector Y	-16.594 N
Vector Z	36.396 N

**Tabla 3.4.** Gravedad, datos obtenidos del software. Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE CARGA	GRAVEDAD
MAGNITUD	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
VECTOR X	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
VECTOR Y	-4069.691 mm/s <sup>2</sup>
VECTOR Z	8926.013 mm/s <sup>2</sup>

En la tabla 3.5 se configuran las cargas para la simulación por el método Von Mises.

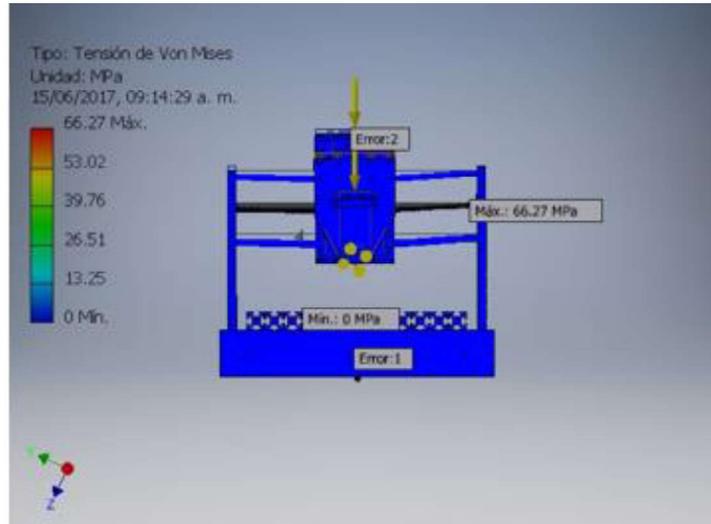
**Tabla 3.5.** Cargas seleccionadas, datos obtenidos del software. Fuente: Elaboración propia.

NOMBRE DE LA RESTRICCIÓN	FUERZA DE REACCIÓN		PARES DE REACCIÓN	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija: 1	133.057 N	4.32385 N	6.24102 Nm	-6.14871 N m
		72.8146 N		-1.0242 N m
		-111.281 N		-0.307731 N m
Restricción fija: 2	0 N	0 N	0 N	0 N
		0 N		0 N
		0 N		0 N
Restricción fija: 3	102.923 N	-4.33059 N	0.0964838 N m	-0.0761676 N m
		23.5463 N		-0.00895208 N m
		-100.1 N		-0.00895208 N m
Restricción fija: 4	0 N	0 N	0 N	0 N
		0 N		0 N
		0 N		0 N

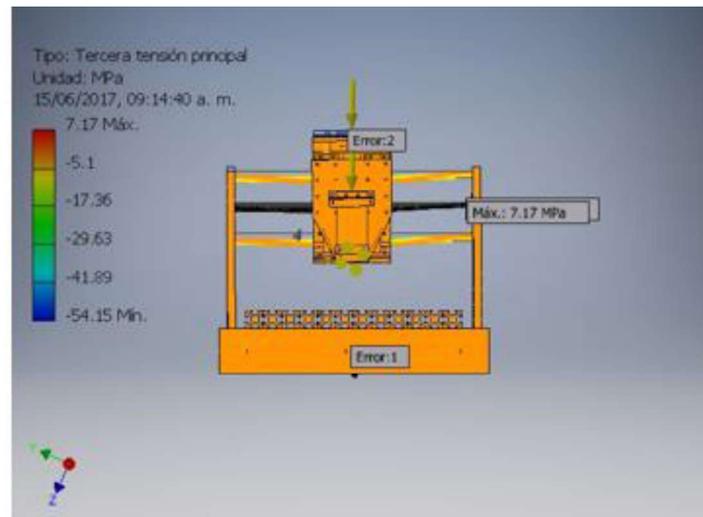
En la tabla 3.6 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la simulación por el método Von Mises; y en las figuras 3.9 a 3.13 se muestran las deformaciones producidas por los esfuerzos.

**Tabla 3.6.** Resumen de resultados del software de simulación. Fuente: Elaboración propia.

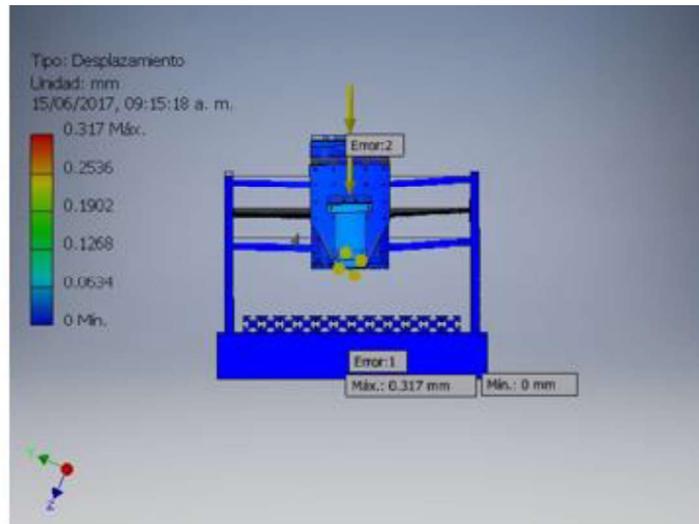
<b>NOMBRE</b>	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
Volumen	5768470 mm <sup>3</sup>	
Masa	19.9642 kg	
Tensión de Von Mises	0.0000246074 MPa	66.2697 MPa
Primera tensión principal	-7.61527 MPa	65.7798 MPa
Tercera tensión principal	-54.152 MPa	7.16539 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.316989 mm
Coeficiente de seguridad	3.1236 su	15 su
Tensión XX	-20.4305 MPa	19.8812 MPa
Tensión XY	-21.6567 MPa	15.4825 MPa
Tensión XZ	-18.7779 MPa	9.09292 MPa
Tensión YY	-26.2714 MPa	56.1653 MPa
Tensión YZ	-28.376 MPa	17.2876 MPa
Tensión ZZ	-47.894 MPa	21.1742 MPa
Desplazamiento X	-0.0284981 mm	0.0212432 mm
Desplazamiento Y	-0.140947 mm	0.00538 mm
Desplazamiento Z	-0.00388021 mm	0.283936 mm
Deformación equivalente	0.000000000339749 su	0.000404626 su
Primera deformación principal	-0.00000152267 su	0.000435292 su
Tercera deformación principal	-0.000352534 su	0.000000964004 su
Deformación XX	-0.000159751 su	0.000197223 su



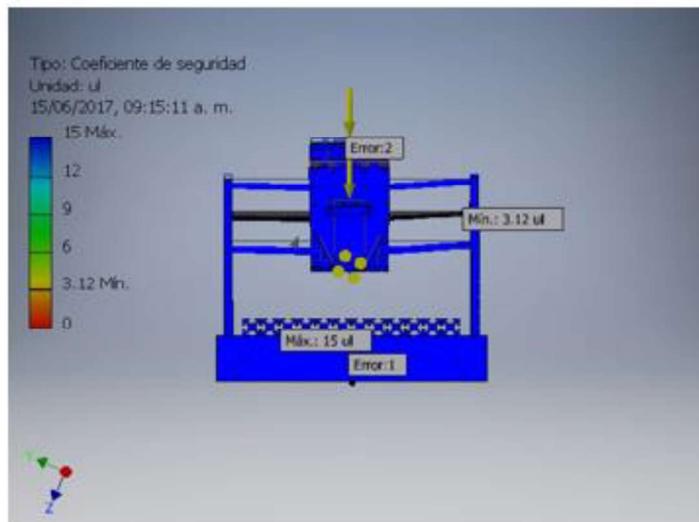
**Figura 3.9.** Tensión Von Mises. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.10.** Tensión Von Mises, tercera tensión principal. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.11.** Tensión Von Mises, Desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.12.** Tensión Von Mises, Coeficiente de seguridad. Fuente: Elaboración propia.

### 3.7 Selección de herramientas y parámetros de corte

Una vez realizadas las etapas que involucran el diseno a nivel sistema y haber elegido de entre un numero de conceptos propuestos en el capítulo anterior, a

continuación, se describe el proceso para la selección de la herramienta de corte adecuada para llevar a cabo el proceso de maquinado con el *router* manual.

La selección adecuada de la herramienta de corte para cada tipo de maquinado es un factor importante para el correcto funcionamiento de la máquina-herramienta, de esto también depende la calidad y precisión de la pieza de trabajo. En esta selección debemos considerar principalmente el tipo de material con el cual se trabajará y el tipo de sujeción entre la herramienta de corte y la máquina-herramienta. En el mercado existen diversos tipos de herramientas para diferentes materiales y diferentes aplicaciones.

El diseño del *router* CNC debe tener la capacidad para maquinar la baquelita y la resina epóxica de las placas fenólicas para circuitos impresos (*PCB*) y así poder cumplir con los requerimientos de diseño, todo esto depende en gran parte del tipo de *router* y la herramienta que se utilizaran para cada material.

### **3.8 Herramientas de corte**

Existe una gran variedad de herramientas de corte en el mercado para distintas máquinas-herramientas, las cuales se pueden clasificar de diversas formas, por ejemplo: según el tipo de material para maquinar, tamaño, material con el que están hechas y muchas otras características particulares. Específicamente, las herramientas para la fabricación de *PCB*'s se pueden clasificar de la siguiente manera [25]:

**Aislamiento:** Se utiliza para formar el contorno de los conductores del circuito impreso. Durante el corte de la punta en *V*, la lámina de cobre se secciona en dos, obteniendo un área intermedia sin contacto eléctrico, conocida como "aislamiento". Es

recomendable utilizar herramientas de aislamiento solamente en contorno de pistas e isletas (*pads*), para secciones de “aislamiento” de mayor área (tramas) es recomendable utilizar herramientas de punta plana *endmill*. Las brocas de grabado mecánico de dos flautas V (ver figura 3.13) ofrecen una óptima combinación de alta resolución de corte y fuerza en la punta. La geometría en la punta asegura una remoción confiable del cobre en todos los aislamientos. Si se desea alargar la vida de la herramienta tenemos una opción con recubrimiento de Nitrato de Zirconio.

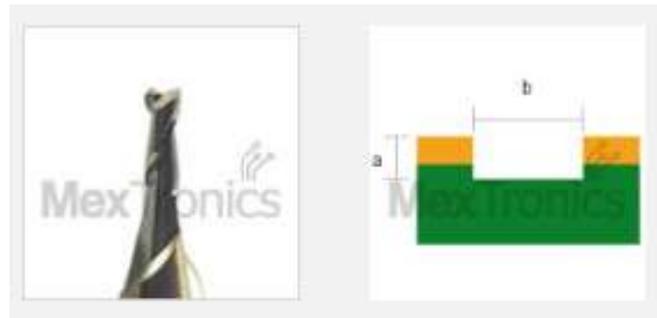


**Figura 3.13.** Brocas de grabado mecánico de dos flautas “V”.

Fuente: <http://www.mextronics.com/index.php/fabrica-tus-pcb-s/tutoriales/tutoriales-fabricacion-de-pcbs-con-cnc>

**Tramado:** Especialmente en las zonas donde se debe retirar un área más extensa de cobre, se recomiendan las herramientas tipo *endmill* de punta plana, ya que en un menor número de pasadas se reduce el área, a diferencia de las herramientas de aislamiento que requerirían de mayor trabajo para obtener el mismo resultado. En la medida que se utilicen mayores diámetros se reduce el número de “pasadas” sin embargo los vértices con ángulos más agudos no podrán ser detallados. Los buriles punta *endmill* de dos flautas (ver figura 3.14) están caracterizados por sus geometrías de flauta de baja proporción, asegurando poca desviación y una larga vida

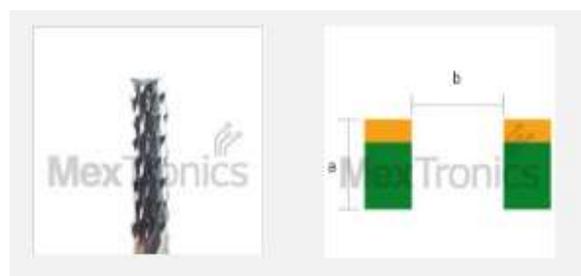
de la broca a velocidades de avance relativamente altas. El alivio radial reduce la formación de rebabas resultando en un corte liso y más uniforme.



**Figura 3.14.** Burril punta endmill.

*Fuente: <http://www.mextronics.com/index.php/fabrica-tus-pcb-s/tutoriales/tutoriales-fabricacion-de-pcbs-con-cnc>*

**Corte:** Con esta herramienta (ver figura 3.15) puede realizar el corte de contorno en la parte externa del circuito, dejando una superficie de corte libre de residuos. Así mismo, puede utilizar esta herramienta para cortar “huecos” dentro del circuito, independientemente estos sean rectangulares, circulares o cualquier forma irregular.



**Figura 3.15.** Burril para corte de PCB's.

*Fuente: <http://www.mextronics.com/index.php/fabrica-tus-pcb-s/tutoriales/tutoriales-fabricacion-de-pcbs-con-cnc>*

**Perforación:** Las brocas (ver figura 3.16) de perforación pueden utilizarse para los orificios donde atraviesan los componentes, las vías de interconexión, orificios de sujeción y en general cualquier perforación que requiera el circuito impreso. Existen actualmente una gran cantidad de diámetros disponibles que pueden cumplir prácticamente con cualquier diámetro necesario.



**Figura 3.16** Brocas para la perforación de PCB's.

Fuente: <http://www.mextronics.com/index.php/fabrica-tus-pcb-s/tutoriales/tutoriales-fabricacion-de-pcbs-con-cnc>

### 3.9 Elección de motores

Básicamente hay dos opciones de motores: paso a paso y servomotores.

Motores paso a paso: es un tipo de motor que tiene la capacidad de mover su propio eje en desplazamientos angulares discretos, dependiendo de la cantidad de pulsos de entrada.

Servomotores SM: es un dispositivo que posee un motor acoplado a una serie de piñones cuya posición de eje es controlada mediante una señal codificada de pulsos eléctricos.

Se decidió usar motores paso a paso por su bajo costo y su fácil disponibilidad en el mercado. Además, que de que se tenía stock de estos motores de un proyecto anterior. A su vez, los motores paso a paso vienen en dos presentaciones comerciales:

Motores unipolares paso a paso: este tipo de motor de pasos son lentos por su elevado número de polos y las reactancias inductivas de su estator; además tienen un par motor bajo y suele ser usado en discos duros e impresoras donde el par motor es bajo.

Motores bipolares paso a paso: su par motor es aproximadamente un 40% mayor que un motor unipolar, y su velocidad es más baja en comparación con estos.

Los tamaños están normalizados; siendo los motores de  $1.8^\circ/\text{paso}$ , uno de los más comunes. Alguna de las formas en las que se pueden encontrar son *NEMA 17*, *23* o *34*, los de menor diámetro (*NEMA 17*) tienen un par motor que puede llegar hasta los  $4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ . Por otro lado, los *NEMA 34*, llegan a un par motor de  $120 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ . El *NEMA 23* suele ser el formato más común con voltajes de (12V-48V) y un par motor de  $30 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ .

### 3.10 Cálculo del torque de los motores paso a paso

Para determinar la potencia de maquinado de la máquina, primero se determina el avance de la herramienta que está definida con la ecuación 6 [26] [27]:

$$F_m = RPM * IPT * Z \quad (6)$$

Donde:

$F_m$  = Avance de herramienta en mm/min.

$RPM$  = 32000 (Velocidad de trabajo de fresadora en 1/min).

$IPT = 0.0254$  (Avance de fresa en mm/diente).

$Z = 2$  (Número de dientes de herramienta de corte).

Sustituyendo los valores en la ecuación 6, se obtiene el siguiente resultado:

$$F_m = 32000(1/\text{min}) * 0.0254(\text{mm}/\text{diente}) * 2\text{diente}$$

$$F_m = 1626 \text{ mm}/\text{min}$$

Ahora que se ha calculado el avance podemos calcular la tasa de remoción del material la cual será definida mediante la siguiente ecuación 7:

$$Q = (F_m * W_c * d)/60000 \quad (7)$$

Donde:

$Q$  = Tasa de corte o remoción de material en  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

$F_m = 1626$  (Avance de herramienta en  $\text{mm}/\text{min}$ ).

$W_c = 1$  (Espesor de corte en  $\text{mm}$ ).

$d = 6.5$  (Profundidad de corte en  $\text{mm}$ ).

Sustituyendo los valores en la ecuación 7 se obtiene el siguiente resultado:

$$Q = ((1626\text{mm}/\text{min})(1\text{mm})(6.5\text{mm}))/60000$$

$$Q = 0.176 \text{ cm}^3/\text{s}$$

El siguiente paso será determinar la potencia requerida de maquinado, la cual se define con la ecuación (8):

$$P_c = K_p * C * Q * W \quad (8)$$

Donde:

$P_c$  = Potencia en herramienta de corte en  $\text{kW}$ .

$K_p = 0.27$  (Constante de potencia).

$C = 1.7$  (Factor de avance).

$W = 1.1$  (Factor de desgaste de herramienta).

$Q = 0.176$  (Tasa de corte o remoción de material en  $\text{cm}^3/\text{s}$ )

Sustituyendo los valores en la ecuación 8 obtenemos:

$$P_c = (0.27)(1.7)(1.1)(0.176\text{cm}^3/\text{s})$$

$$P_c = 0.0808 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la potencia del splinde con la ecuación 9, [30]:

$$P_m = \frac{P_c}{E} \quad (9)$$

Donde:

$P_m$  = Potencia del motor en kW.

$P_c = 0.0818$  (Potencia en herramienta de corte en kW).

$E = 0.9$  (Factor de eficiencia de máquina/herramienta).

$$P_m = \frac{0.0808\text{kW}}{0.9}$$

$$P_m = 0.0898 \text{ kW.}$$

El siguiente paso es calcular la fuerza de la herramienta de corte con la ecuación 10. [28].

$$T = 0.05 K_d F_f F_t B W + 0.007 K_d D^2 J W \quad (10)$$

Donde:

$T$  = Fuerza o empuje de la máquina/herramienta en N.

$K_d = 4000$  (Factor de trabajo del material).

$F_f = 0.06$  (Factor de avance).

$F_t = 2.54$  (Factor de empuje para diámetro de la fresa).

$B = 1.62$  (Factor de punto de fresa para empuje).

$W = 1.1$  (Factor de desgaste de herramienta).

$D = 3.2$  (Diámetro de fresa en mm).

$J = 0.16$  (Factor punta de fresa).

Sustituyendo los valores en la ecuación 10 se obtiene el siguiente resultado:

$$T = [(0.05)(4000)(0.06)(2.54)(1.62)(1.1)] + [(0.007)(4000)(3.2 \text{ mm})^2(0.16)(1.1)]$$

$$T = 104.778 \text{ N}$$

Por último, calculamos el torque de los motores de cada eje con las ecuaciones 11, 12 y 13. [28].

$$P_{eje} = M_{eje} g \quad (11)$$

Donde:

$P_{eje}$  = (Fuerza del eje producido por inercia en N).

$M_{eje}$  = (Masa de la estructura en el eje en kg).

$g = 9.8$  (Valor de gravedad en  $\text{m/s}^2$ ).

$$F_{eje} = T + p_{eje} \mu \quad (12)$$

Donde:

$F_{eje}$  = (Fuerza para moverla carga del eje en N).

$T$  = (Fuerza o empuje de la máquina/herramienta en N).

$P_{eje}$  = (Fuerza del eje producido por inercia en N).

$\mu=0.14$  (Coeficiente de fricción).

$$T_{eje} = F_{eje} \frac{P}{2\pi\eta} \quad (13)$$

Donde:

$T_{eje}$  = (Torque de la carga del eje en Nm).

$F_{eje}$  = (Fuerza para moverla carga del eje en N).

$P= 0.008$ (Paso de husillo en m).

$\eta=0.8$  (Rendimiento del husillo de paso).

Torque necesario para mover la carga del eje Z:

$$P_{eje} = M_{eje} g$$

$$P_{eje} = 2 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 19.62 \text{ N}$$

$$F_{eje} = T + p_{eje} * \mu$$

$$F_{eje} = 104,778 \text{ N} + 19.62 \text{ N} * 0.14 = 107.5 \text{ N}$$

$$T_{eje} = F_{eje} \frac{P}{2\pi\eta}$$

$$T_{eje} = 107.5 \left( \frac{0.008 \text{ m}}{2\pi * 0.8} \right) = 0.1707 \text{ Nm} = 24.17 \text{ oz in}$$

Torque necesario para mover la carga del eje X:

$$P_{eje} = M_{eje} * g$$

$$P_{eje} = 4.036 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 39.593 \text{ N}$$

$$F_{eje} = T + p_{eje} * \mu$$

$$F_{eje} = 104.778N + 39.593N * 0.14 = 110.3N$$

$$T_{eje} = F_{eje} \frac{P}{2\pi\eta}$$

$$T_{eje} = 110.3N \left( \frac{0.008m}{2\pi 0.8} \right) = 0.17556 Nm = 24.86$$

Torque necesario para mover la carga del eje Y:

$$P_{eje} = M_{eje} * g$$

$$P_{eje} = 9.611 kg * 9.81m/s^2 = 94.18 N$$

$$F_{eje} = T + p_{eje} * \mu$$

$$F_{eje} = 104.778N + 94.18N * 0.14 = 116.6 N$$

$$T_{eje} = F_{eje} \frac{P}{2\pi\eta}$$

$$T_{eje} = 118N \left( \frac{0.008m}{2\pi 0.8} \right) = 0.1856 Nm = 26.28 oz in$$

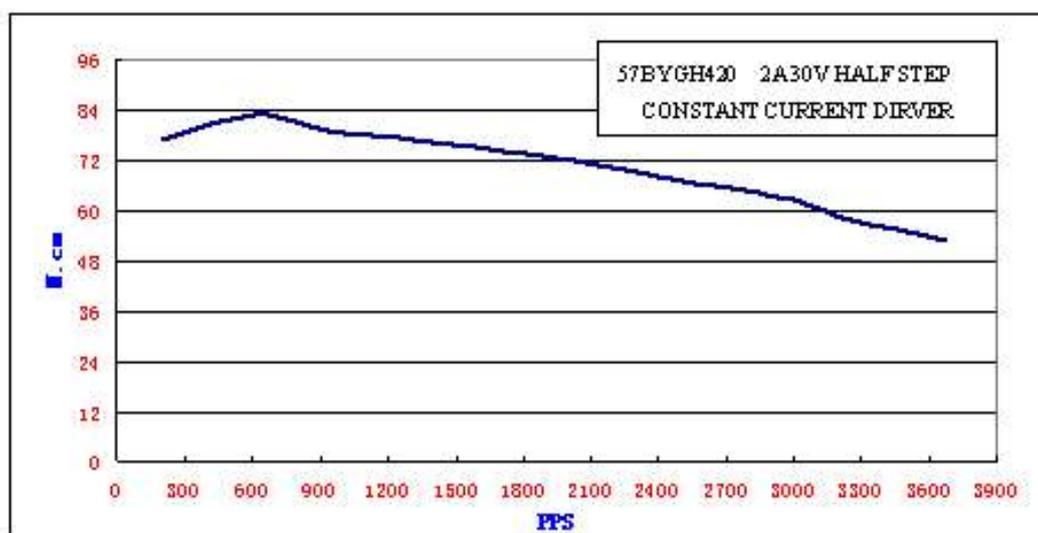
### 3.11 Elección de los motores paso a paso

En la tabla 3.6 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la sección 3.10, estos valores servirán para seleccionar los motores paso a paso adecuados para el diseño propuesto. En la figura 3.17 se observa la curva *torque vs PPS* del motor paso a paso 57BYGH420, el torque es aproximadamente 0.9 Nm. El torque hallado en las memorias de cálculo es de 0.1711 y 0.1756 Nm para el eje X y Z respectivamente, se deduce que el motor 57BYGH420 cumple con el torque necesario para mover el eje X y Z. En la figura 3.18 se observa la curva *torque vs PPS* del motor paso a paso KL23H276-30-8A, el torque es aproximadamente 2 Nm. Teniendo en cuenta que el

torque hallado en las memorias de cálculo para el eje Y es de 0.1877 Nm, se concluye que el motor *KL23H276-30-8A* cumple con el torque necesario para mover el eje Y.

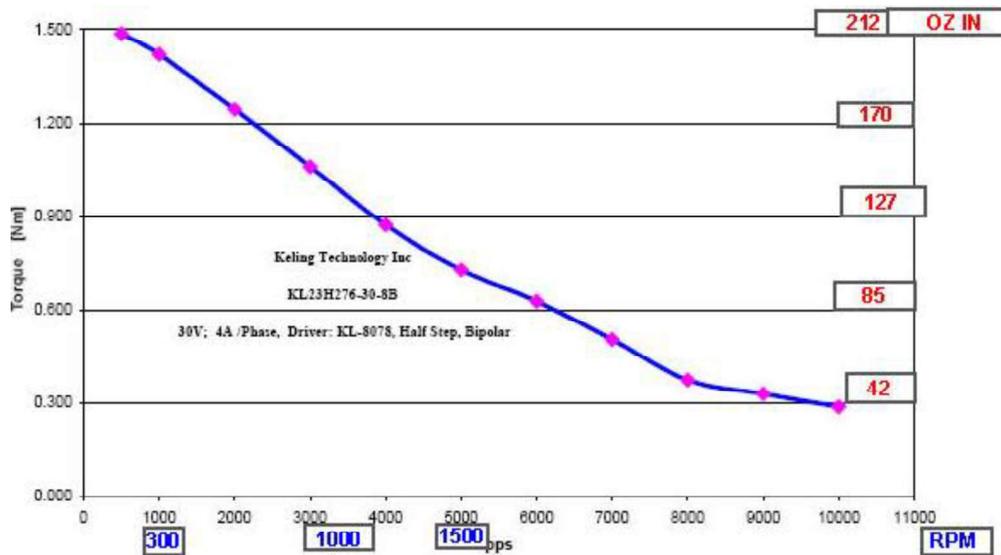
**Tabla 3.7.** Resumen de resultados obtenidos en la sección 3.10. Fuente: Elaboración propia.

Variabes	Eje X	Eje Y	Eje Z
Masa de la estructura en kg	4.03	9.61	2
Gravedad en m/s <sup>2</sup>	9.81		
Fuerza-Peso en N	39.59	94.18	19.62
Fuerza de la máquina herramienta en N	104.77		
Coefficiente de fricción	0.14		
Fuerza para mover la carga en N	110.3	116.6	107.5
Paso del husillo en m	0.008		
Rendimiento del husillo de paso en N	0.8		
Torque de la carga en Nm	0.1755	0.1877	0.1711



**Figura 3.17.** Curva de Torque vs RPM del motor paso a paso 57BYGH420.

. Fuente: [http://www.longwaymotor.com/p\\_detail.php?cata\\_code=p-5-1&id=11](http://www.longwaymotor.com/p_detail.php?cata_code=p-5-1&id=11)



**Figura 3.18.** Curva de Torque vs RPM del motor paso a paso KL23H276-30-8A. Fuente: <https://www.machsupport.com/forum/index.php?topic=9943.0>

### 3.12 Tipo de router

Un *router* manual tiene como función principal desbastar material con movimientos giratorios parecido a una fresadora vertical, solo que de menor tamaño y su potencia es mucho menor.

Existen diferentes marcas y tipos de *routers* en el mercado, la gran mayoría son utilizados en la industria carpintera, esto debido a su fácil funcionamiento y las necesidades que puede llegar a satisfacer. Un inconveniente que se puede presentar al utilizar un *router* de este tipo es la precisión, ya que son herramientas de uso manual que dependen de la destreza y habilidad de la persona que lo maneja.

A continuación, se presenta una serie de herramientas viables para conformar la herramienta de la maquina CNC; se procederá a describir cada una de ellas y

posteriormente se realizarán los cálculos sobre potencia y velocidad angular para determinar cuál de ellos es el más indicado.

En la figura 3.19 se pueden observar algunos modelos de rectificadores comerciales pequeños de la marca Dremel® de diferentes tamaños, potencia y capacidad.



**Figura 3.19.** Rectificadores de la marca Dremel.

Fuente: <https://es.dremel.com/Rotativas/3000-Herramienta-rotativa-velocidad-variable-6o5/>

Dependiendo del modelo, cada uno proporciona diferentes revoluciones por minuto, ya sea de carácter fijo o variable, esto por medio de velocidades. Estas revoluciones van de las 5000 a las 20000 RPM. A continuación, en la tabla 3.8 se muestran las especificaciones de 5 modelos diferentes rectificadores, los cuales fueron seleccionados por su potencia, eficiencia y velocidad de rotación de cada uno.

**Tabla 3.8.** Especificaciones de cinco mototool de diferentes capacidades. Fuente: <https://es.dremel.com/Rotativas-1ft/>

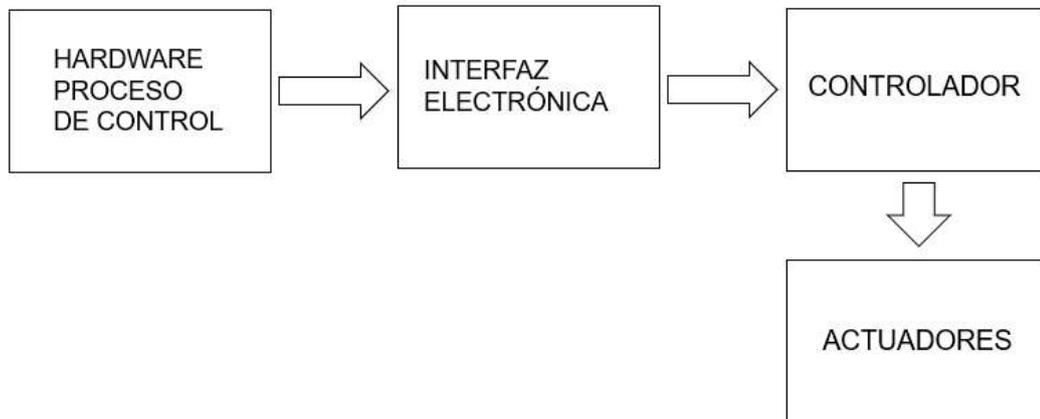
<b>Modelo Router</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Rango de velocidad (RPM)</b>	<b>Rango del Chuck (in)</b>	<b>Peso (kg)</b>
<i>Dremel® 4300</i>	216	120	5000-35000	1/32-1/8	1.9
<i>Dremel® 4200</i>	192	120	5000-35000	1/32-1/8	1.175
<i>Dremel® 4000</i>	192	120	5000-35000	1/32-1/8	NA
<i>Dremel® 3000</i>	144	120	5000-32000	1/32-1/8	1.25
<i>Truper® MOTO-A2</i>	144	120	12000-33000	1/32-1/8	0.76

De acuerdo con los cálculos obtenidos en la ecuación 9, la potencia necesaria para el splinde es de 90 W, por lo que se decidió usar el *Dremel® 3000* por la relación precio potencia.

### 3.13 Hardware Electrónico

El prototipo debe poseer dispositivos electrónicos que le permitan ejecutar las tareas de movimiento deseado y que es controlado mediante software; además, debe contar con una fuente de alimentación que suministre las tensiones y corrientes adecuadas para cada dispositivo.

Las partes en que se dividen el sistema electrónico son principalmente el sistema de alimentación eléctrica, el sistema electrónico de interpretación de señales proveniente del software, y el sistema de potencia que permita la ejecución de las señales eléctricas traducidas en movimiento, ver figura 3.20.



**Figura 3.20.** *Arquitectura general del sistema electrónico. Fuente: Elaboración propia.*

### 3.13.1 Interfaz Electrónica

La interfaz electrónica es el circuito que se encarga de establecer la comunicación entre la computadora y el controlador de etapa de movimiento de los motores paso a paso. Este sistema se encarga además de realizar un aislamiento o desacople entre la etapa de control y la etapa de potencia, es decir cumple el papel de protección contra cortocircuitos.

El dispositivo encargado de interpretar adecuadamente los comandos enviados por el software CNC ejecutando en la computadora debe tener las siguientes características.

- Ser de bajo costo
- Ser de fácil reemplazo o reparación en caso de daños.
- Ser compatible con el software implementado

- Ser lo suficiente potente para llevar a cabo las operaciones de control de forma adecuada.

Se eligió utilizar la plataforma *Arduino® Uno Rev. 3* (ver figura 3.21) como el sistema encargado de la interfaz electrónica. Dicha elección se debe a que ya se han realizado proyectos con esta plataforma anteriormente, obteniendo buenos resultados, además de su bajo costo y amigable programación. A continuación, se en listan las características de la placa.

- Usa un microcontrolador *Atmega 328*
- Tiene 14 pines configurables como entradas o salidas.
- Conexión *USB*
- Voltaje de operación de 12-15V.
- Salidas de Voltaje 5 y 3.3 V.
- Velocidad de reloj de 16 MHz.
- Memoria Flash de 32kB.



**Figura 3.21.** *Arduino® Uno Rev. 3.* Fuente: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

### 3.13.2 Diseño de los drivers para los motores

Para el control de los motores paso a paso se decidió usar el driver el L297 y el L298N por su bajo costo y accesibilidad en el mercado local. Es capaz de manejar hasta 2 amperes por canal.

Los motores paso a paso seleccionados en el punto 3.11 de esta sección tienen un par máximo de 0.9 Nm @ 1.5 A (57BYGH420) y 2 Nm @ 2 A (KL23H276-30-8A). Para solucionar el problema del consumo de corriente de los motores se decidió conectar dos L298N en paralelo (Ver figura 3.22 y 3.23), con este arreglo se puede obtener hasta 3.5 amperes por canal que es más que suficiente para el consumo de estos motores. También es importante señalar que los motores no consumirán esta corriente, pues el par máximo para el movimiento de los ejes no supera 0.2 Nm por tal motivo los motores se ajustarán a la mitad de la corriente del par máximo o sea 0.75 A y 1 A respectivamente.

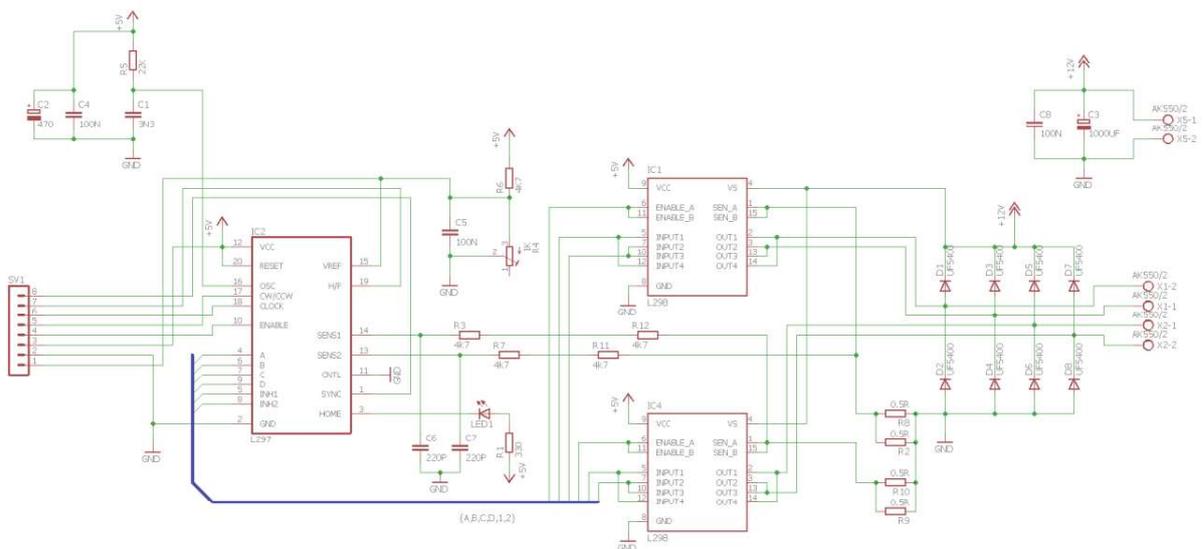
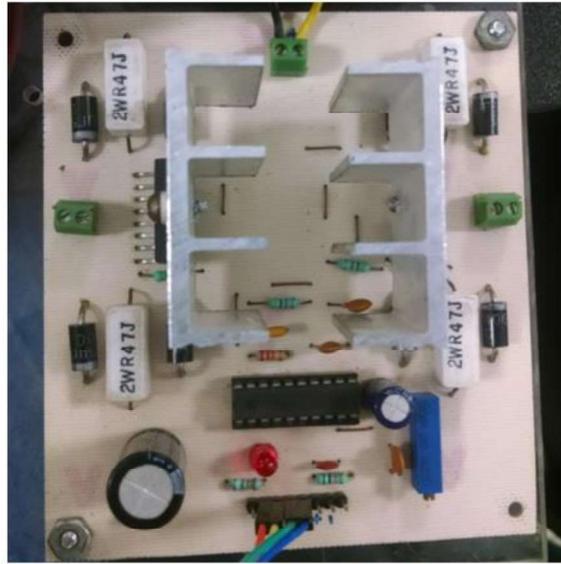


Figura 3.22. Diagrama del circuito para los drivers. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.23.** Driver para el control de motores paso a paso. Fuente: Elaboración propia.

### 3.13.3 Diseño de la fuente de alimentación

Para el diseño de la fuente de alimentación se consideró que sea de fácil mantenimiento y de bajo mantenimiento, por lo que se decidió realizar una fuente de poder clásica con un transformador y su etapa de regulación por medio de un puente de diodos y un regulador lineal como el *LM317T* en vez de una fuente conmutada cuyo precio es más elevado y difícil de reparar en caso de avería.

De acuerdo con el punto 3.13.2 la suma de la corriente total para alimentar los motores será de 2.5 amperes más 0.5 amperes para la alimentación de la lógica de la tarjeta de control, teniendo en total 3 amperes. Se utilizará un voltaje de 33 V pues a mayor voltaje los motores paso a paso pueden operar a más altas *RPM*, esto no causa ningún daño a los motores pues el driver diseñado posee un control de corriente para evitar que las bobinas de los motores se quemem. Por lo que se decidió usar un transformador de 24V a 5 A. El diseño final de la fuente tendrá una salida fija de 33V



### 3.14 Sistema de control

En la parte de control se define el tipo de software que se encarga del diseño del circuito impreso y su posterior conversión a formato *Gerber*, que contiene toda la información que permite posteriormente el mecanizado de este. También se define el software interprete de los comandos generados en el archivo *Gerber* que se encarga de convertir dichos códigos a señales eléctricos para la interfaz electrónica.

El sistema de control está dividido en las siguientes partes como se observa en la figura 3.26.

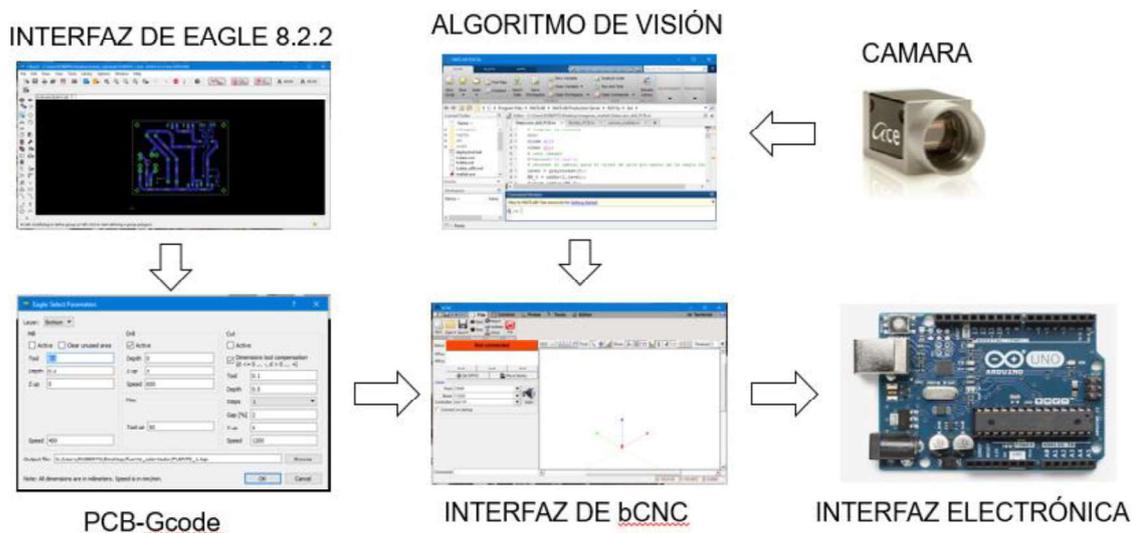


Figura 3.26. Arquitectura global del sistema de control. Fuente: Elaboración propia.

#### 3.14.1 Autodesk Eagle

Eagle es un software para el diseño de circuitos impresos el posee un auto-enrutador que ha tomado gran aceptación mundial, posee una gran variedad de elementos para el diseño electrónico dispuesto en una gran cantidad de bibliotecas y además una de sus mayores ventajas se debe a que es un programa con licencia

gratuita en su versión básica o educativa. En la figura 3.27 se observa la interfaz de *Eagle*® 8.2.2.

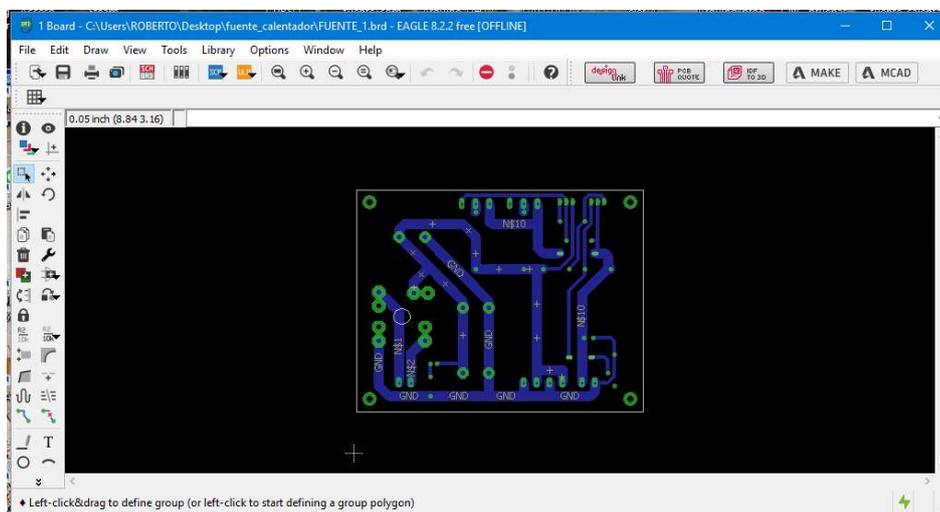


Figura 3.27. Interfaz de *Eagle* 8.2.2. Fuente: Elaboración propia.

### 3.14.2 PCB-Gcode

*Pcb-gcode* es una *upl* de *Eagle*® que permite utilizar la fresadora, enrutador, grabador, para hacer placas de circuito impreso sin usar productos químicos tóxicos. Primero se crea el diseño en *Eagle*®, luego use *pcb-gcode* para crear *g-code*, que ejecuta en la máquina. La máquina corta alrededor de las trazas para los circuitos. *pcb-gcode* también crea archivos de perforación para perforar agujeros, molar archivos para cortar el tablero, o hacer recortes en el tablero. También puede crear archivos para grabar texto en las tablas, como sus derechos de autor, nombres de componentes, etc. *pcb-gcode* ha sido gratuito desde 2003. En la figura 3.28 se observa la interfaz de *pcb-gcode*.

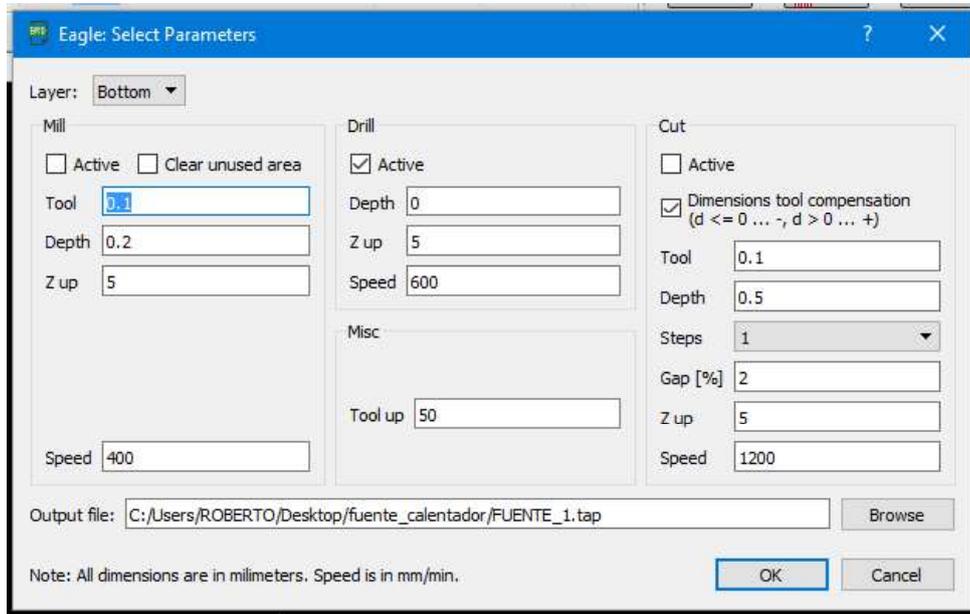


Figura 3.28. Interfaz de PCB-Gcode. Fuente: Elaboración propia.

### 3.14.3 bCNC

*CNC GRBL* command sender, autololever y editor de código G. Es un avanzado generador de *código G* para *GRBL*. *bCNC* es un programa multiplataforma (*Windows*®, *Linux*, *Mac Os*®) escrito en *Python*. Es robusto y rápido capaz de trabajar muy bien con hardware viejo o lento como *Raspberry PI*®. En la figura 3.29 se muestra la interfaz del software.

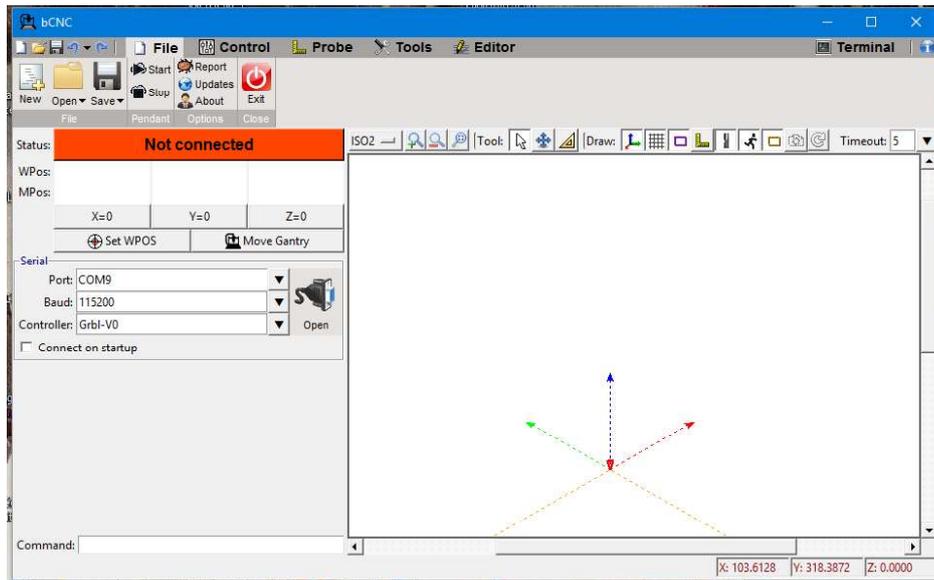


Figura 3.29. Interfaz de bCNC. Fuente: Elaboración propia.

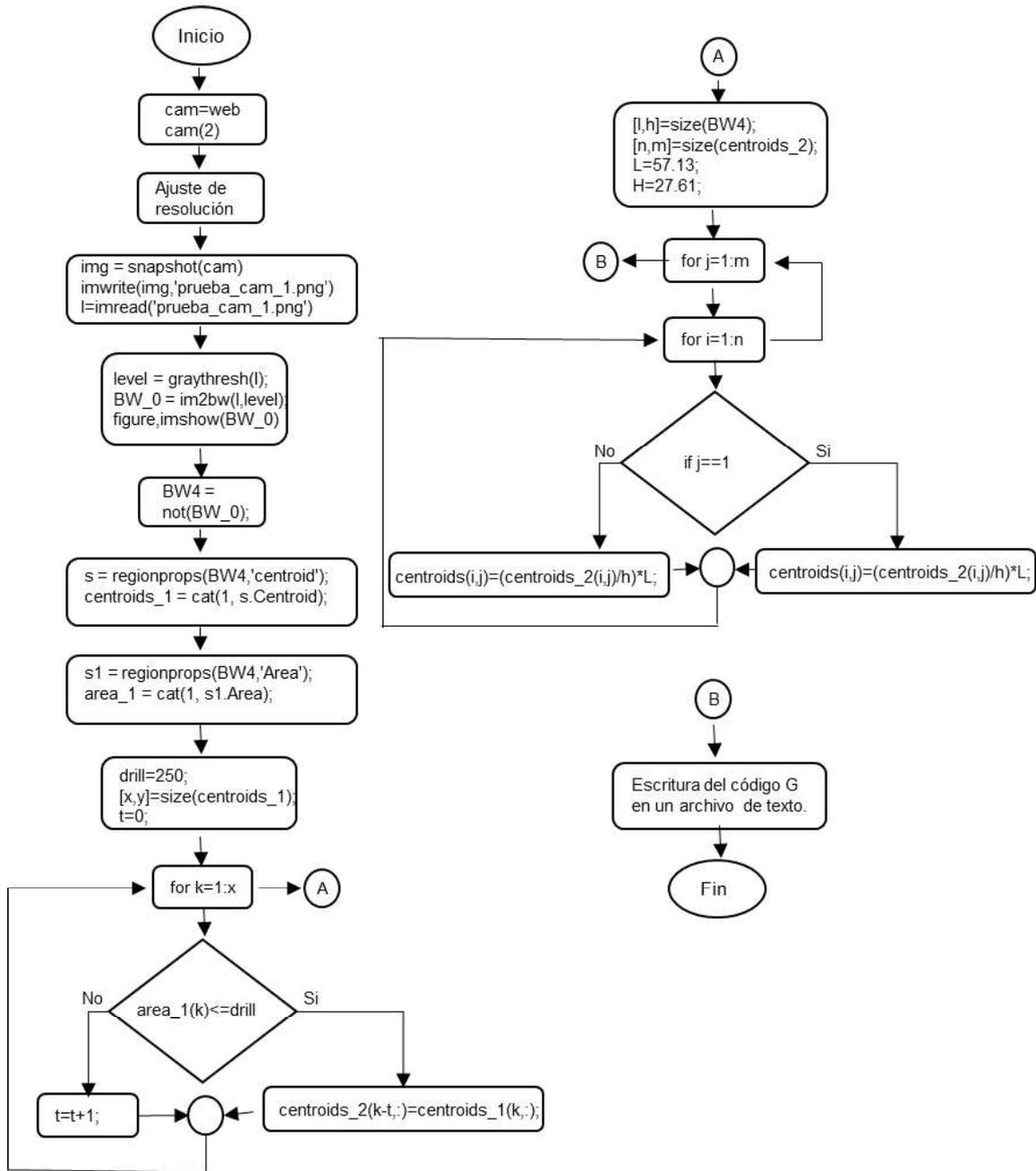
#### 3.14.4 Algoritmo de visión

El algoritmo fue desarrollado en *Matlab*® la función principal de este es detectar los centros de masa de los *drills* de la imagen de un *PCB* para luego obtener las coordenadas de dichos centros y realizar el *código G* a partir de estos datos.

Como primer paso se obtiene el umbral de nivel de gris por medio de la regla de *Ostus* para convertirla a binaria.

Después se invierte la imagen y se detectan los centros de gravedad de cada uno de los *drills*, por último, se hace un filtrado por área de los *drills* para seleccionar los correctos, posteriormente se obtienen las coordenadas en *X*, *Y* para finalizar con la escritura del *código G*.

## Algoritmo de visión para la detección de centros en PCB



## **CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

#### 4.1 Resultado final de la integración del sistema

En la figura 4.1 y 4.2 se observa el diseño e implementación de la estructura del eje X y Y. Esta estructura presenta un eje tuerca-tornillo de 8mm de diámetro con un paso de 8mm, dos ejes guía con sus baleros lineales para mejorar el movimiento lineal.



Figura 4.1. Montaje del eje X. Fuente: Elaboración propia.

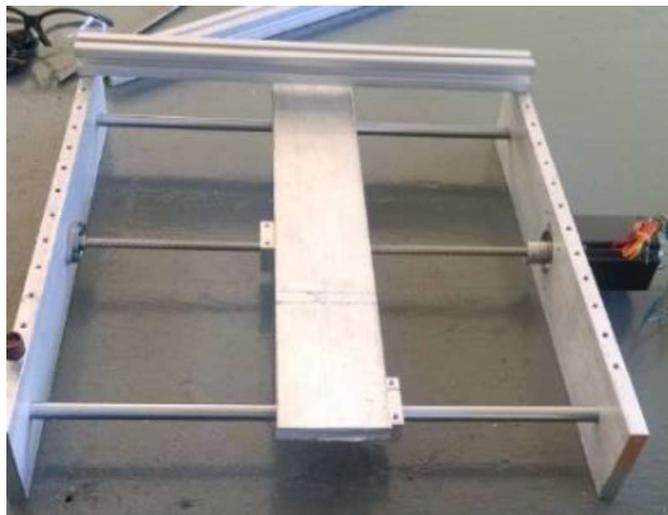
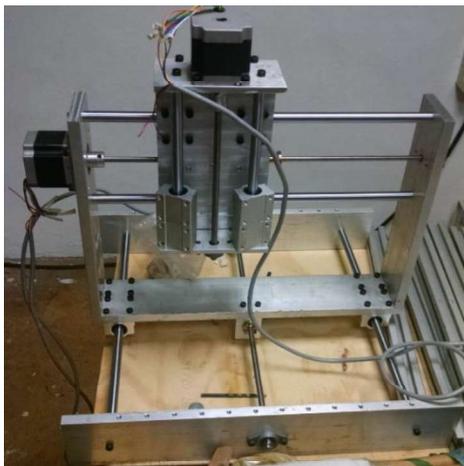


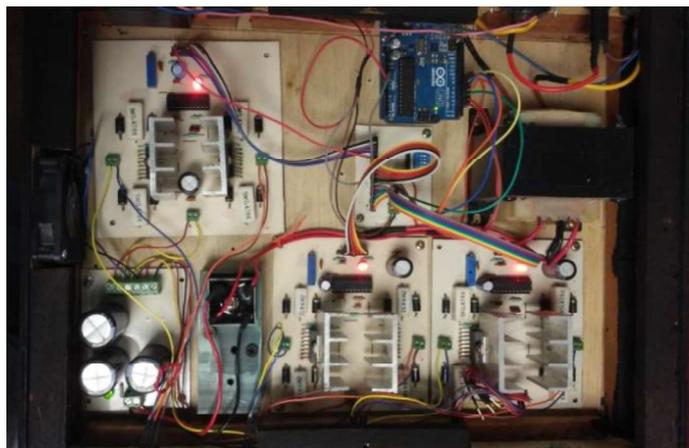
Figura 4.2. Montaje del eje Y. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.3 se observa el diseño e implementación de la estructura para el eje Z. Este eje al igual que los ejes X y Y presenta un eje tuerca-tornillo de 8mm de diámetro con un paso de 8mm, dos ejes guía con sus baleros lineales para mejorar el movimiento lineal. Así mismo cuenta con el soporte para la herramienta de corte.



**Figura 4.3.** Montaje del eje Z. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.5 se observa el ensamble de la electrónica para el control de los motores paso a paso y la conexión de la interfaz para la comunicación con la PC.



**Figura 4.5.** Montaje de la electrónica de control. Fuente: Elaboración propia.

En figura 4.6 y la figura 4.7 se observa la estructura final del prototipo de parte mecánica del sistema. Cuenta con unas medidas generales: eje X, 422 X 295 mm; eje Y, 500 X 422 mm y el eje Z 213 X 130 mm y un peso total de 16 kg aproximadamente y una precisión de 0.1 mm.



**Figura 4.6.** Montaje final del prototipo, parte 1. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.7.** Montaje final del prototipo, parte 2. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Pruebas y resultados con el Algoritmo

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el fresado y taladrado de un *PCB* de prueba. En la figura 4.8 se puede ver el diseño del circuito con el software *Eagle*®.

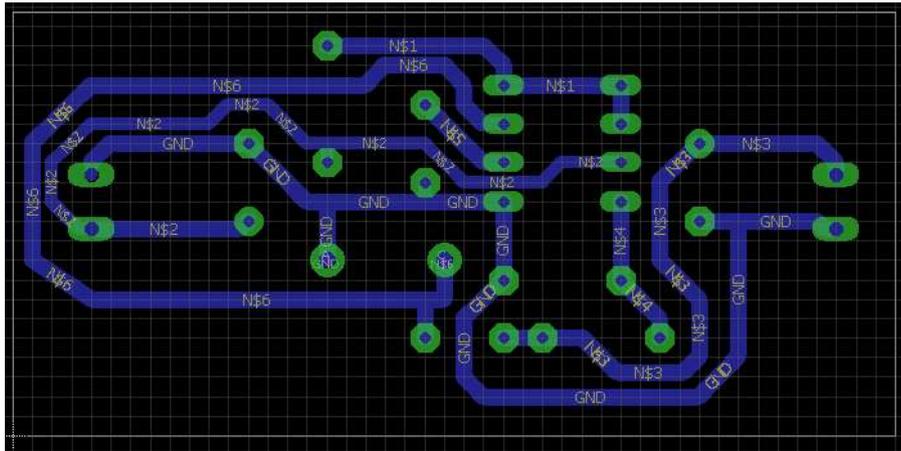


Figura 4.8. Diseño de *PCB* de prueba en *Eagle*®. Fuente: *Elaboración propia*.

En la figura 4.9 se observa la imagen capturada por la cámara de la máquina antes de aplicar el algoritmo de detección de centros.

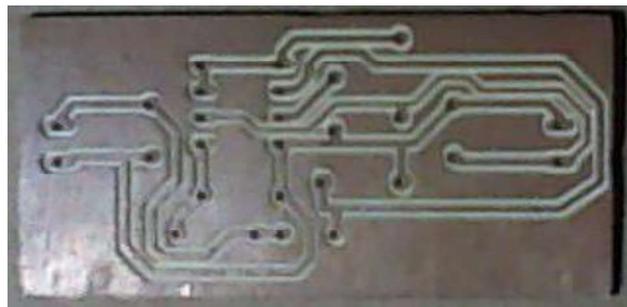
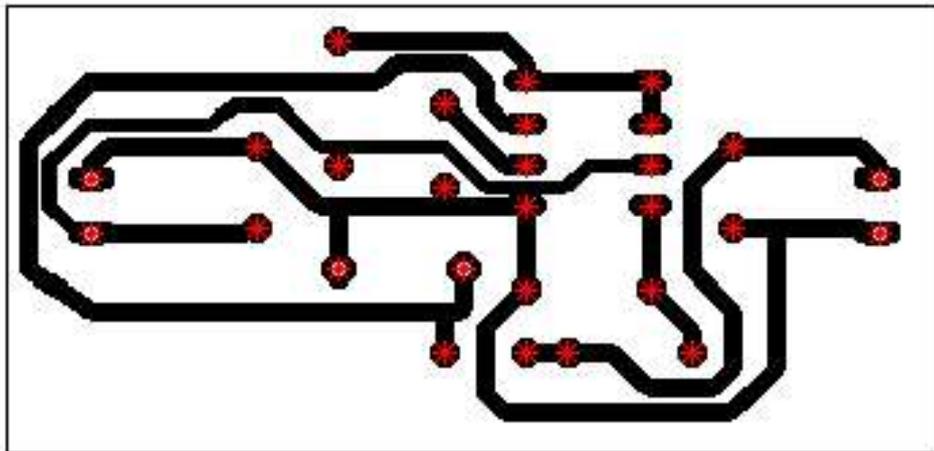


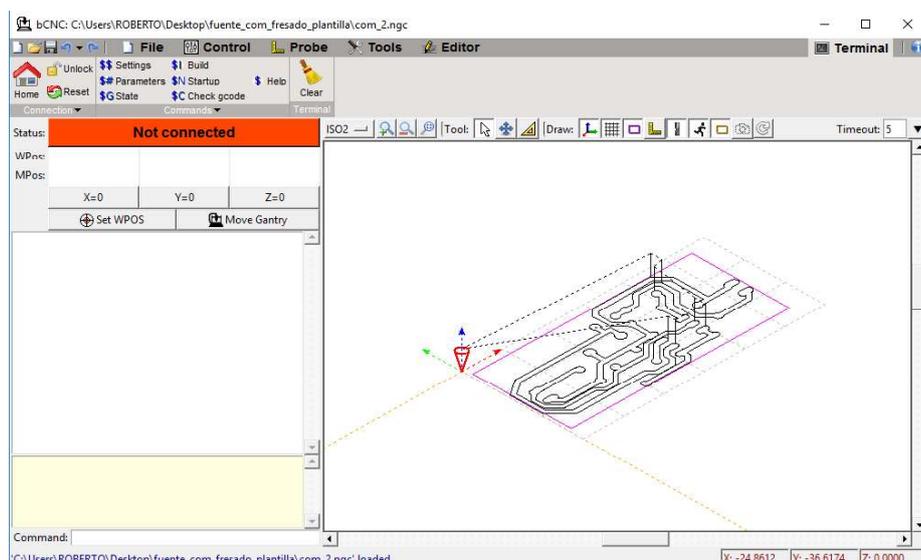
Figura 4.9. Imagen capturada por la cámara del equipo. Fuente: *elaboración propia*.

En la figura 4.10 se observa la imagen procesada por el algoritmo de detección de los centros de los drills del PCB de prueba. Los asteriscos en rojo señalan los centros de los puntos a barrenar.

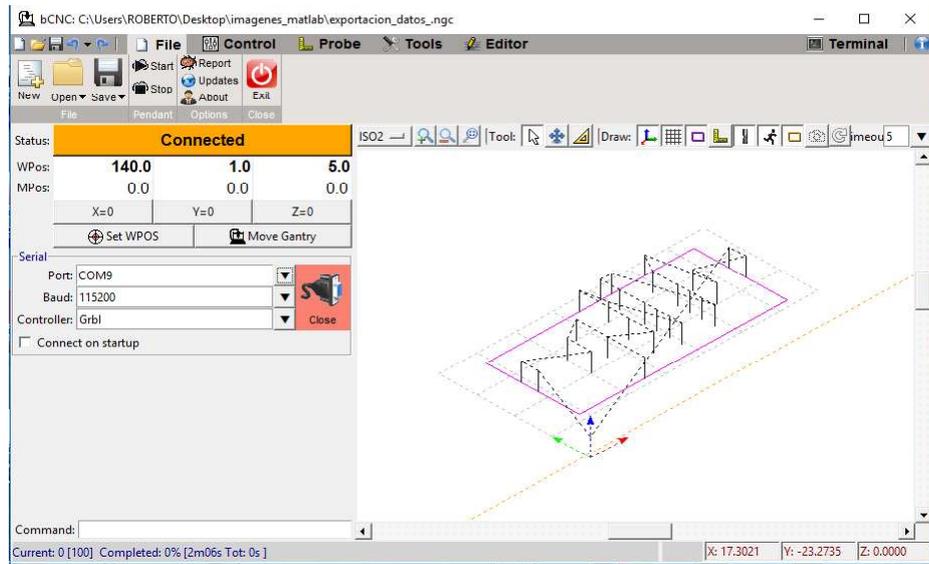


**Figura 4.10.** Centros de los drill's de un PCB de prueba. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.11 y la figura 4.12 se puede observar la exportación del código a la interfaz de *bCNC*.



**Figura 4.11.** Pistas del PCB de prueba. Fuente: Elaboración propia.



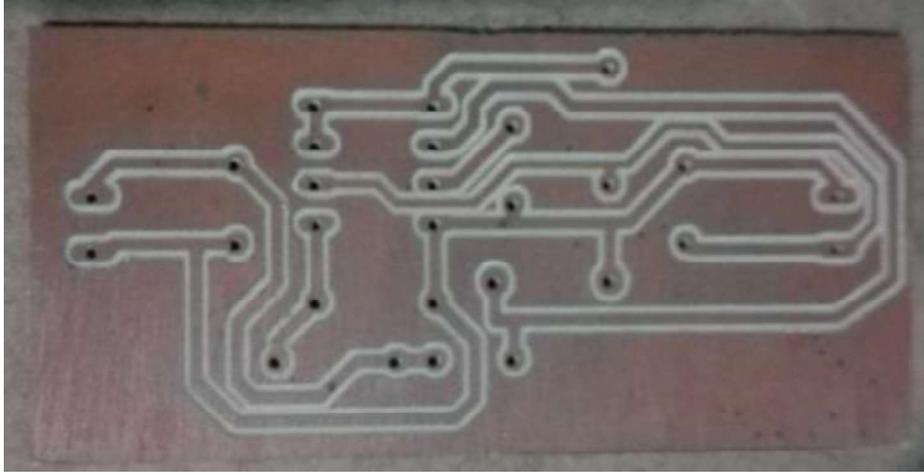
**Figura 4.12.** Centros de los drill's de un PCB de prueba. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.13 se puede observar el proceso de fresado y taladrado del PCB de prueba.



**Figura 4.13.** Fresado del PCB de prueba. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.14 se observa el PCB producido por la máquina.



**Figura 4.14.** PCB producido por la máquina. Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.3 Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo de visión para el microposicionamiento y fresado de *PCB* de las siguientes dimensiones: eje *X*, con un desplazamiento de: 422 X 295 mm; eje *Y*, con un desplazamiento de: 500 X 422 mm y el eje *Z*, con un desplazamiento de: 213 X 130 mm, con mesa de trabajo con área efectiva de 25 X 25 mm y un peso total de 16 kg aproximadamente, una precisión de 0.1 mm y una potencia de fresado de 144 W.

Se realizó un algoritmo visión para la detección de centros en los *PADs* en *matlab*® utilizando una cámara web *Logitech*®.

De acuerdo con las pruebas realizadas con el algoritmo se observó que la iluminación y la resolución de la cámara tienen un papel importante para obtención de buenos resultados. Aunque la necesidad de una cámara de mayor resolución se hizo presente en el desarrollo de este proyecto, pues solo se pudieron realizar pruebas con una cámara web, el problema principal que se presentó al usar este tipo de cámara fue el ruido ocasionado por la baja resolución de la cámara y las sombras generadas por la iluminación. En la siguiente tabla 4.1 se muestran los resultados funcionales del prototipo.

**Tabla 4.1.** Resultados Funcionales del prototipo. Fuente: Elaboración propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>
Error promedio de posicionamiento	0.105mm
Error máximo de la máquina	0.35 mm
Máxima velocidad de trabajo	1000mm/min
Ancho de corte	0.1-1.25mm
Rango del eje <i>X</i>	0-250mm
Rango del eje <i>Y</i>	0-250mm
Rango del eje <i>Z</i>	-13-0mm

### **Sobre el diseño mecánico**

Se observó que la precisión en el movimiento de la herramienta de fresado depende ampliamente del grado de *backlash* que se pueda generar en los baleros lineales y en la tuerca-tornillo que transmiten el movimiento del eje de los motores a la estructura de cada eje, por lo que fue necesario utilizar tuercas *antibacklash* para la transmisión del movimiento en cada uno de los ejes.

También la necesidad del manejo de un software *CAD* para el diseño de un prototipo simplifica mucho el cálculo y la selección de materiales óptimos para el diseño de la estructura final.

### **Sobre el diseño electrónico**

La necesidad del diseño de un driver de micropasos fue necesaria pues, aunque con los drivers actuales se obtienen buenos resultados la vibración que se genera por conmutación de las bobinas de los motores paso a paso ocasiona un ruido molesto. Otro factor importante es la velocidad de los motores con los drivers del primer diseño solo se pudo alcanzar una velocidad máxima de 1000 RPM, esto se resolvió con la implementación de drivers de micropasos.

### **Sobre el algoritmo**

En condiciones normales de operación del prototipo las imágenes son sometidas a cambios en la iluminación, esto se resolvió con un proceso de calibración en donde se ajusta la iluminación.

Se obtienen mejores resultados cuando se logra eliminar las sombras generadas alrededor del *PCB*.

Sin embargo, este umbral de iluminación se debe calibrar de tal manera que después de procesar cada imagen se imprime la imagen con los centros detectados por el algoritmo y se verifica que los centros detectados sean los correctos antes de generar el *código G* e enviar al software de fresado.

#### **4.3.1 Trabajos futuros**

Entre los trabajos futuros, se encuentra desarrollar un algoritmo de visión para el autocentrado de la herramienta de la máquina *CNC*, para la fabricación de *PCBs* de doble cara de manera automatizada.

Mejorar el diseño de la estructura del prototipo para reducir el *backlash* y diseñar una fuente de alimentación conmutada para una mayor eficiencia.

Diseñar un soporte para la cámara de visión más apropiado y un control de iluminación para el sistema de visión.

## REFERENCIAS

- [1] M. F. Cifuentes, J. S. Jaramillo, "Diseño de un sistema de manufactura automático para circuitos impresos", Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2015.
- [2] S. E. Hodges, R. J. Richards, "Fast Multi-Resolution Image Processing for PCB manufacture", University of Cambridge, Cambridge, abril 1995.
- [3] VB's Projects, "SMD-Pick and Place Machine and Paste Dispenser", octubre 2016. [online], Kiebitzheide, Havixbeck, Alemania. Disponible en: <https://www.vbesmens.de/en/pick-and-place.html>
- [4] Vision Artificial, "Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales" [online], Ministerio de educación Gobierno de España en colaboración con Fondo Social Europeo, febrero de 2012. Disponible en: [http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD\\_1\\_didac\\_Conceptos\\_previos.pdf](http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/UD_1_didac_Conceptos_previos.pdf)
- [5] V. Vargas, "Sistema de Visión Artificial para el control de calidad en piezas cromadas", Tesis de maestría, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Unidad Azcapotzalco, México, D.F, enero 2010.
- [6] J.C. Molina, " Prototipo mecatrónico de visión para la detección de defectos en cremalleras de poliester " Tesis de maestría, Dep. Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Mérida, Mérida, Yucatán, 2016.
- [7] J. Turpín, "Desarrollo de un Sistema de Inspección Visual Automatizado para una línea de envasado de morteros industriales" [online] Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, Colombia. Memorias, Octubre/2011. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1954/pfc4060.pdf?sequence=1>
- [8] C. A. Lujan. "Adquisición y procesamiento digital de imágenes para la obtención de la trayectoria de los vectores de posición de camarón y la jaiba" [online] Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia en cooperación con el Departamento de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Mérida. Valencia España, septiembre 2012. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/17502>
- [9] *MathWorks Documentation*. MathWorks. United States 2017. Acceso en febrero 2017. [Online]. Disponible [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/imread.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/imread.html?s_tid=srchtitle)
- [10] *MathWorks Documentation*. MathWorks. United States 2017. Acceso en febrero 2017. [Online]. Disponible [https://www.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html?searchHighlight=graythresh&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html?searchHighlight=graythresh&s_tid=doc_srchtile)
- [11] *MathWorks Documentation*. MathWorks. United States 2017. Acceso en abril 2017. [Online]. Disponible [https://www.mathworks.com/help/images/ref/im2bw.html?searchHighlight=im2bw&s\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/images/ref/im2bw.html?searchHighlight=im2bw&s_tid=doc_srchtile)
- [12] *MathWorks Documentation*. MathWorks. United States 2017. Acceso en mayo 2017. [Online]. Disponible

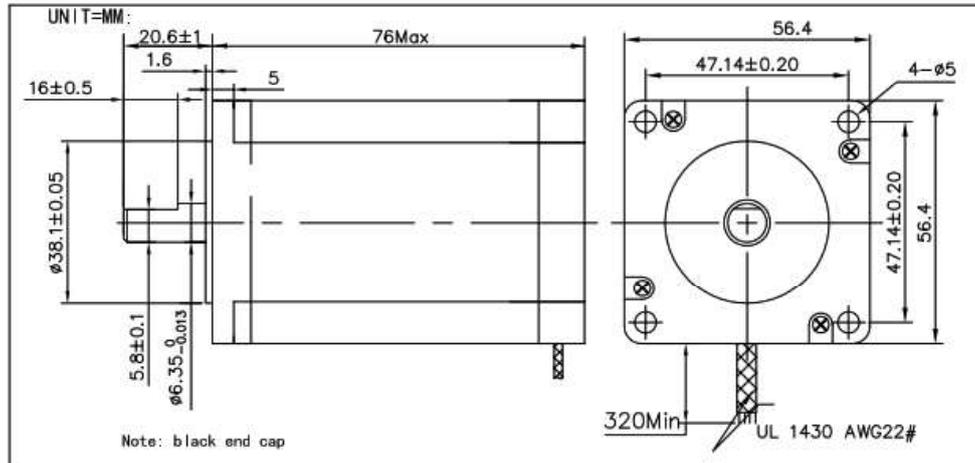
- <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html?requestedDomain=www.mathworks.com>
- [13] *Mach3*. Newfangled Solutions. 2017. Acceso en marzo 2016. [online] Disponible en <http://www.machsupport.com/software/mach3/>
- [14] *cirQWizard*. GNU Operating System Sponsored by the Free Software Foundation. Consultado en diciembre 2016. [online] Disponible en <http://cirqwizard.org/>
- [15] *Eagle*. Autodesk. Consultado en diciembre 2016. [online] Disponible en <http://www.cadsoftusa.com/>
- [16] *Proteus*. LabCenter Electronics. Inglaterra. Consultado en enero 2017. [online] Disponible en <http://www.labcenter.com/index.cfm>
- [17] Vicross (2009). "Programas de diseño electrónico y simulación". Yo reparo. Consultado en octubre 2016. [online] Disponible en [http://electronica.yoreparo.com/laboratorios\\_virtuales/programas-de-disenoelectronico-y-simulacion-t316534.html](http://electronica.yoreparo.com/laboratorios_virtuales/programas-de-disenoelectronico-y-simulacion-t316534.html)
- [18] *COMSOL Multiphysics*. Comsol Inc. Consultado en marzo 2017[online]. Disponible en <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [19] (2017) *Arduino*. Consulta en abril 2017. [online] Disponible en <http://www.arduino.cc/es/pmwiki.php?n=>
- [20] (2017) *Raspberry Pi*. Consulta en abril 2017. [online] Disponible en <http://www.raspberrypi.org/>
- [21] Septiembre 2017. Microcontrolador PIC.[online] Disponible en <http://es.scribd.com/doc/55830546/Que-son-los-PIC#scribd>
- [22] Septiembre 2017. "Motor paso a paso". [online] Disponible en [http://robotsargentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robotsargentina.com.ar/MotorPP_basico.htm)
- [23] *GM215 Step Motor / Motion Controller*. Gecko drive. Consultado en abril 2017. [online]. Disponible en <http://www.geckodrive.com/gm215-step-motor-motion-controller.html>
- [24] Lemac. (2014) "Controlador de motores PAP con L297 y L298". Klugers.net. Consultado en mayo 2017. [online] disponible en: <http://www.klugers.net/v3/hardware/11-controlador-de-motores-pap-con-l297-y-l298>
- [25] *Fabricación de PCB's con CNC*. MexTronics. Consultado en abril 2017. Disponible en: <http://www.mextronics.com/index.php/fabrica-tus-pcb-s/tutoriales/tutoriales-fabricacion-de-pcbs-con-cnc>
- [26] D. Alonso, J. Gil y F. Martínez, "Prototipo de maquina fresadora CNC para circuitos impresos", *Tekhné*, vol. 12, pp. 23-38, 2015. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/article/view/10439/11456>
- [27] A. Lopez, E. Ortiz, G. Padilla, y H. Tabares, "Diseño y manufactura de prototipo de fresadora vertical CNC" [Online] Instituto Politécnico Nacional, Informe Técnico, septiembre 2013. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12575/1920%202013.pdf?sequence=1>

**ANEXO A**  
**HOJA DE DATOS**

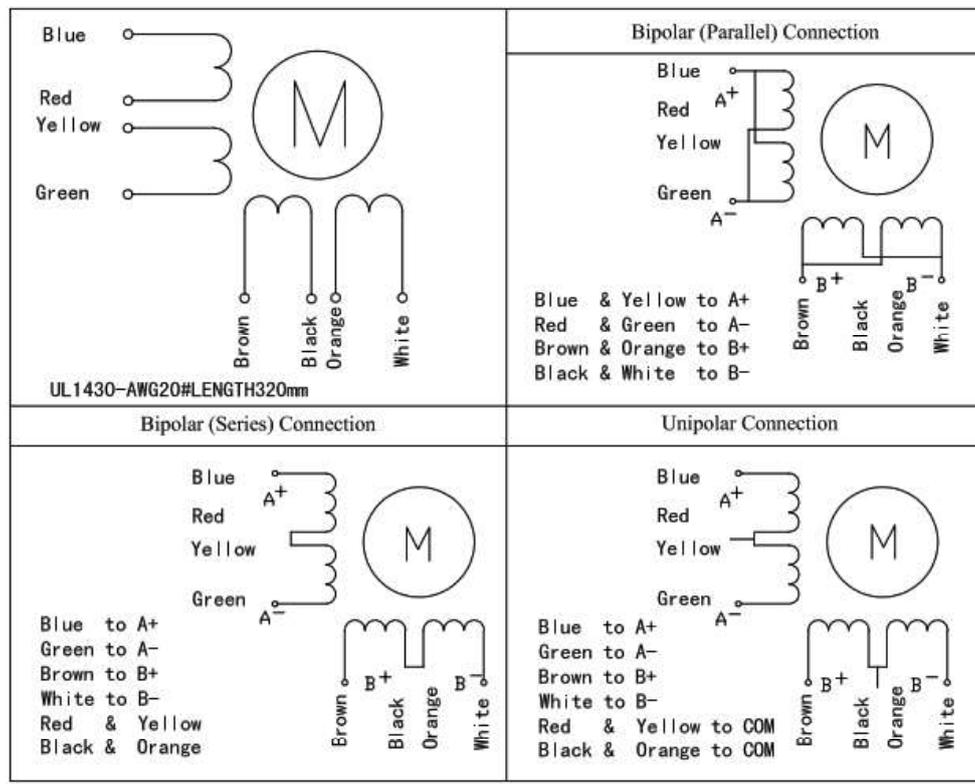


# Hybrid Stepper Motor

## KL23H276-30-8A



	STEP PHASE	RATED VOLTAGE	CURRENT /PHASE	RESISTANCE /PHASE	INDUCTANCE /PHASE	HOLDING TORQUE	ROTOR INERTIA	WEIGHT
	DEG/STEP	V	A	ohms	mH	OZ-IN	gcm <sup>2</sup>	Kg
Unipolar	1.8	2.76	3.0	0.92	2.2	200	480	1.0
Bipolar (Series)		3.86	2.1	1.84	8.8	282		
Bipolar (Parallel)		1.93	4.2	0.46	2.2	282		

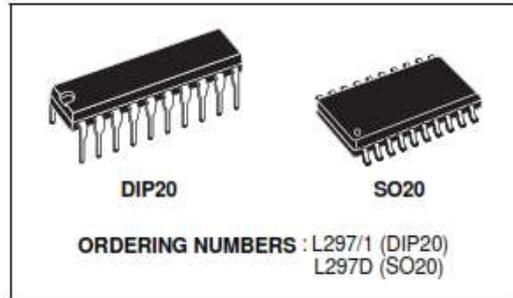




**L297**

## STEPPER MOTOR CONTROLLERS

- NORMAL/WAVE DRIVE
- HALF/FULL STEP MODES
- CLOCKWISE/ANTICLOCKWISE DIRECTION
- SWITCHMODE LOAD CURRENT REGULATION
- PROGRAMMABLE LOAD CURRENT
- FEW EXTERNAL COMPONENTS
- RESET INPUT & HOME OUTPUT
- ENABLE INPUT



### DESCRIPTION

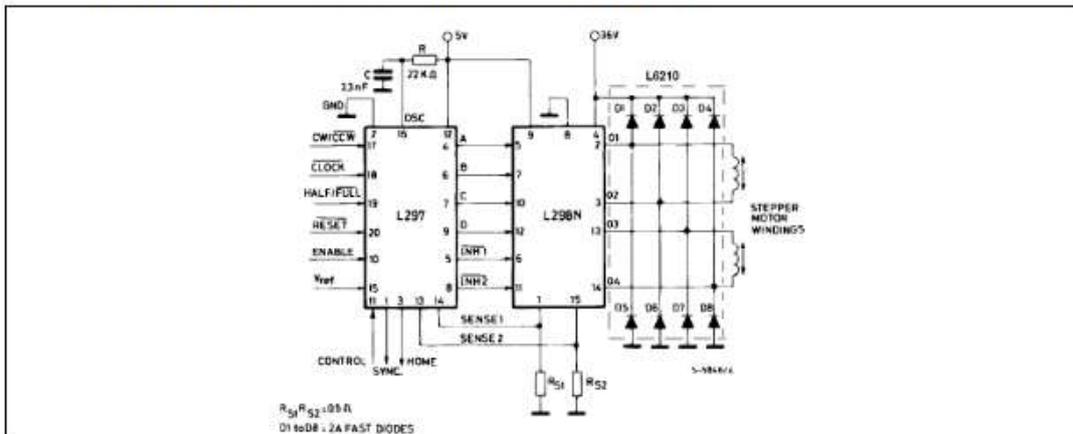
The L297 Stepper Motor Controller IC generates four phase drive signals for two phase bipolar and four phase unipolar step motors in microcomputer-controlled applications. The motor can be driven in half step, normal and wave drive modes and on-chip PWM chopper circuits permit switch-mode control of the current in the windings. A feature of

this device is that it requires only clock, direction and mode input signals. Since the phase are generated internally the burden on the microprocessor, and the programmer, is greatly reduced. Mounted in DIP20 and SO20 packages, the L297 can be used with monolithic bridge drives such as the L298N or L293E, or with discrete transistors and darlingtonts.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_s$	Supply voltage	10	V
$V_i$	Input signals	7	V
$P_{tot}$	Total power dissipation ( $T_{amb} = 70^\circ\text{C}$ )	1	W
$T_{stg}, T_j$	Storage and junction temperature	-40 to +150	$^\circ\text{C}$

### TWO PHASE BIPOLAR STEPPER MOTOR CONTROL CIRCUIT

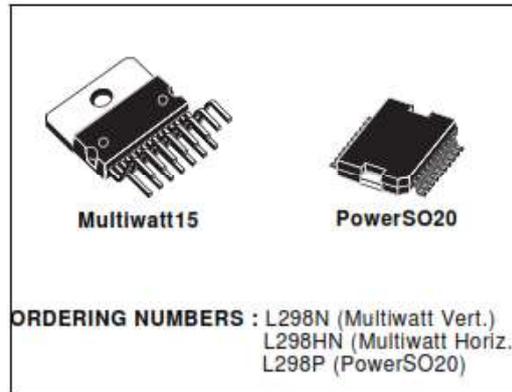


## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

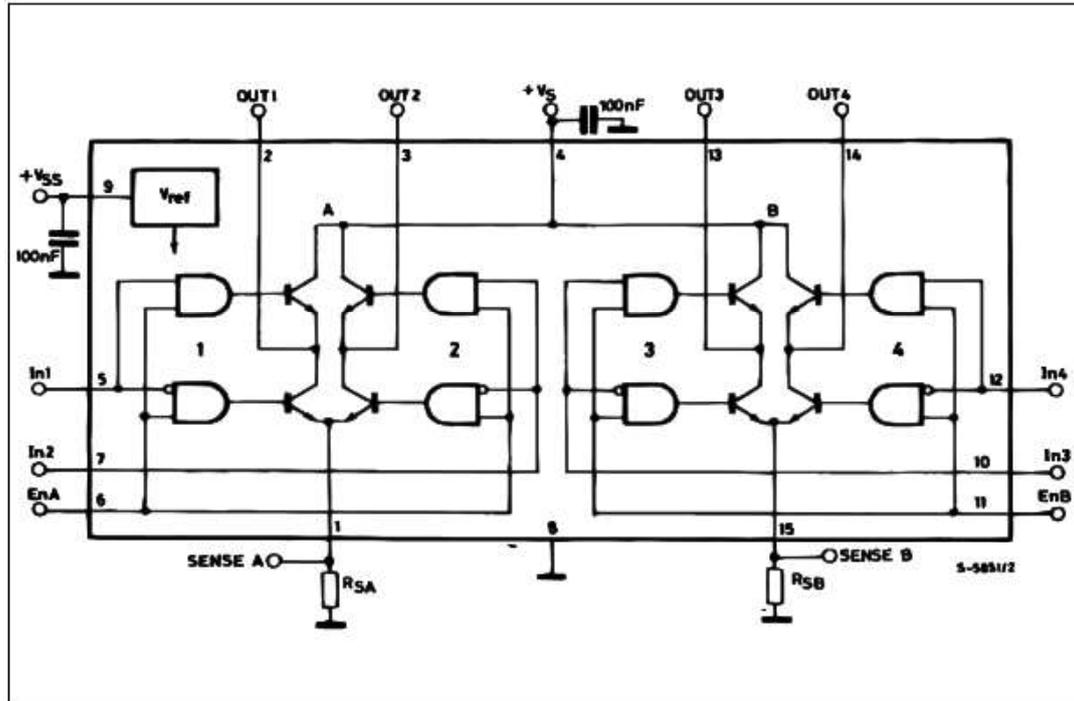
### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-

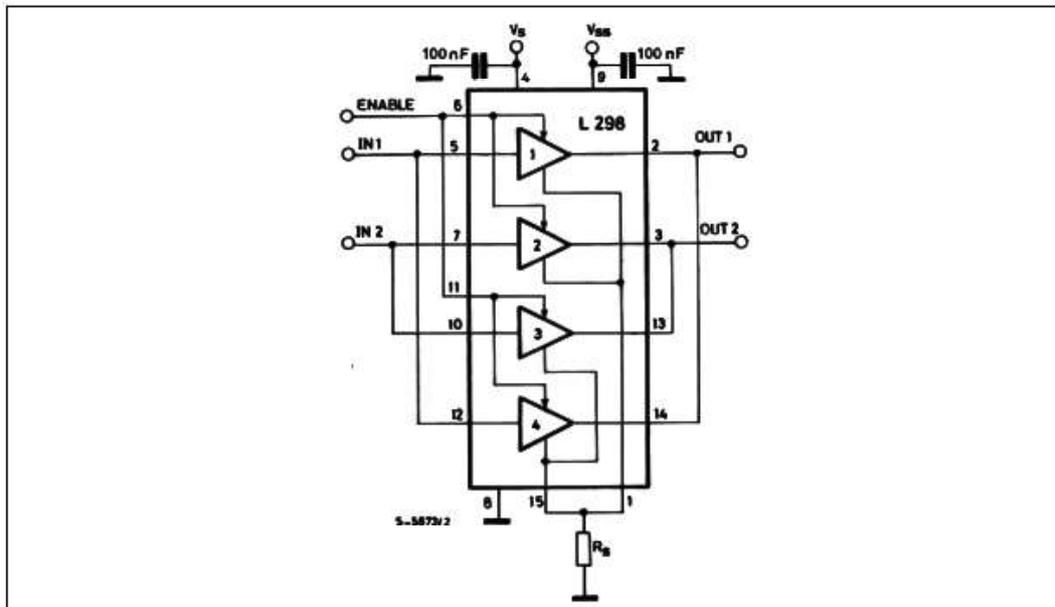


nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

### BLOCK DIAGRAM



**Figure 7 :** For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



#### APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

##### 1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A ; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output : an external resistor ( $R_{SA}$  ;  $R_{SB}$ ) allows to detect the intensity of this current.

##### 1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are  $In1$  ;  $In2$  ;  $EnA$  and  $In3$  ;  $In4$  ;  $EnB$ . The  $In$  inputs set the bridge state when The  $En$  input is high ; a low state of the  $En$  input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

##### 2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both  $V_S$  and  $V_{SS}$ , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of  $V_S$  that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off : Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

##### 3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes  $D1$  to  $D4$  is made by four fast recovery elements ( $t_{rr} \leq 200$  nsec) that must be chosen of a VF as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped ; Schottky diodes would be preferred.

**ANEXO B**  
**PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR**

```

clc;

clear all;

close all;

webcamlist %despliega la lista de las cámaras conectadas al PC

cam=webcam(2); %se selecciona la cámara

%preview(cam); % vista preliminar de la cámara

cam.AvailableResolutions % muestra las resoluciones disponibles de la
cámara

cam.Resolution = '640x480'; %cambia la resolución de la cámara

closePreview(cam)% se cierra la vista preliminar

img = snapshot(cam); % se toma una foto

imwrite(img,'prueba_cam_1.png');

imshow(img)%muestra imagen capturada

clear('cam'); % se limpia el buffer de la cámara % leer imagen

I=imread('12.jpg'); % obtener el umbral para el nivel de gris por medio de la
regla Ostu's

level = graythresh(I);

BW_0 = im2bw(I,level);

figure,imshow(BW_0); %encontrar el inverso de la imagen

BW4 = not(BW_0); % detección de los centros a barrenar

s = regionprops(BW4,'centroid');

centroids_1 = cat(1, s.Centroid); %cálculo del área

s1 = regionprops(BW4,'Area');

area_1 = cat(1, s1.Area); % visualización de los centros en la imagen

```

```

figure(1),imshow(BW4)

hold on

plot(centroids_1(:,1),centroids_1(:,2), 'b*')

hold off %depurar centroides

drill=250; % se especifica el valor máximo del drill a detectar

[x,y]=size(centroids_1);

t=0;

for k=1:x

    if area_1(k)<=drill

        centroids_2(k-t,:)=centroids_1(k,:);

    else

        t=t+1;

    end

end % visualización de los centros en la imagen

figure(2),imshow(BW4)

hold on

plot(centroids_2(:,1),centroids_2(:,2), 'r*')

hold off %escalar matriz

[l,h]=size(BW4);

[n,m]=size(centroids_2);

L=57.13; %dimensiones del PCB en mm

H=27.61;

for j=1:m

    for i=1:n

```

```

if j==1
    centroids(i,j)=(centroids_2(i,j)/h)*L;
else
    centroids(i,j)=(centroids_2(i,j)/l)*H;
end
end
end

%impresion de txt para el CNC
Label_1='M3';
Label_2='G21';
Label_3='G00 Z5.000';
Label_4='G01 Z0.000 F100.0';
Label_5='M5';
Label_6='G00 X0.000 Y0.000';
Label_7='M2';
fid = fopen('exportacion_datos_.txt','w+t');
fprintf(fid,'%s\n',Label_1);
fprintf(fid,'%s\n',Label_2);
fprintf(fid,'%s\n',Label_3);
formatSpec = 'G00 X%6.3f Y%6.3f\n';
for ii=1:n
    fprintf(fid,formatSpec,centroids(ii,:));
    fprintf(fid,'%s\n',Label_4);
    fprintf(fid,'%s\n',Label_3);

```

```
end  
fprintf(fid,'%s\n',Label_5);  
fprintf(fid,'%s\n',Label_6);  
fprintf(fid,'%s\n',Label_7);  
fclose(fid);
```