

# Diseño y construcción de una prototipadora CNC que realiza el ruteo de pistas y el taladrado de circuitos impresos utilizando procesamiento de imágenes en LabVIEW

Danilo Arévalo, Diana Hermosa  
Universidad de las Fuerzas Armadas  
Sangolquí, Ecuador  
agb\_ad2000@hotmail.com  
diany\_hermosa\_89@hotmail.es

**Abstract**— The present document shows the design procedure and construction of a CNC prototyper to manufacture printed circuit boards (PCB) which is a mechatronic system that consists of three fundamental elements: a mechanical system that controls movement along three spatial axes; a CNC control system based on a microcontroller; and image processing software.

**Resumen**— Este documento presenta el procedimiento de diseño y construcción de una prototipadora CNC para la fabricación de circuitos impresos, la cual es un sistema mecatrónico que está constituido por tres elementos fundamentales: un sistema mecánico para movimiento en tres ejes; el sistema de control CNC basado en un microcontrolador; y el software de procesamiento de imágenes.

**Índice de términos:** prototipadora CNC, imágenes LabVIEW, circuito impreso PCB, código G, diseño mecatrónico.

## I. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de la tecnología electrónica y su uso, tanto en universidades como en institutos tecnológicos, ha promovido la elaboración de aplicaciones de mayor complejidad, en las que se requieren placas de circuito impreso cada vez de mayor densidad, por tanto es indispensable el uso de placas de una o más capas.

El presente proyecto propone el diseño de una prototipadora CNC que simplifica los procedimientos manuales y permite realizar el ruteo y taladrado de circuitos impresos con montaje THT (Tecnología de agujeros pasantes). Este sistema consta de: una máquina CNC y un computador para el proceso de diseño, CAD, CAM del circuito impreso.

La característica principal del proyecto está en el procesamiento de imágenes, que se realizará mediante un HMI, en la cual, a partir de una imagen se procesará de manera eficiente los códigos necesarios para la fabricación del circuito impreso.

## II. SISTEMA MECATRÓNICO

Un sistema mecatrónico es diseñado generalmente para controlar una máquina, equipo o proceso mecánico o electromecánico “*ver [1]*”. En un sistema mecatrónico, existe intrínsecamente el flujo de información y el flujo de energía. Las variables de referencia y las variables medidas son las entradas en el flujo de información, y sus salidas son las variables monitoreadas y manipuladas. El flujo de energía es producto de la potencia aplicada al sistema “*ver [2]*”.

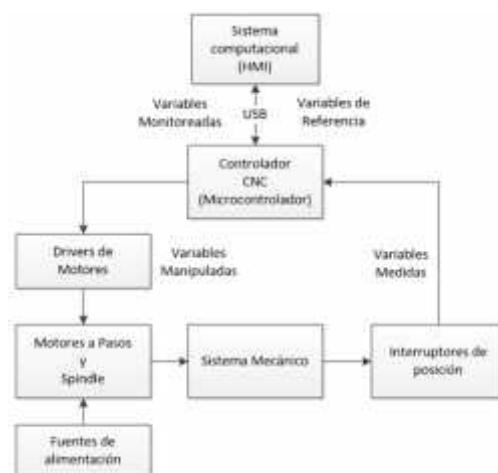


Fig. 1 Sistema mecatrónico

## III. SISTEMA MECÁNICO

Después de analizar las necesidades de los estudiantes, se obtienen las características técnicas y operativas satisfactorias de la prototipadora mediante una matriz QFD (Quality Function Deployment). De la que se obtuvieron las siguientes especificaciones.

TABLA I  
ESPECIFICACIONES PROTOTIPADORA

Parámetro	Especificación
Dimensión Máxima del material	260 x 240 mm (Formato D3)
Área de Trabajo	352 x 268 mm
Precisión	0.1 mm
Repetibilidad	± 0.1 mm
Velocidad de Taladrado	30 Agujeros/min
Velocidad (Travel Speed)	500 mm/min
Motores	Paso a paso 12 kg.cm (lazo abierto)
Peso	30 kg
Interfaz de comunicación	USB HID
Software	Procesamiento de Imágenes

La prototipadora CNC tiene tres ejes como se aprecia en la figura.2. Dos de ellos se asocian al movimiento en el plano horizontal (movimiento longitudinal y transversal), mientras que el tercero es el desplazamiento vertical del cabezal de la máquina.

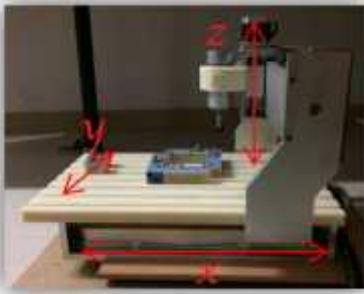


Fig. 2 Prototipadora CNC

Para lograr el movimiento en cada uno de los ejes se debe seleccionar actuadores mecánicos, los cuales convierten el movimiento rotativo del motor en movimiento lineal.

#### A. Transmisión de movimiento

El requerimiento más importante para el desarrollo del sistema de transmisión obtenido del QFD es la precisión de 0.1 mm. Por tal razón se implementó un sistema de transmisión de movimiento por husillo de bolas, ya que el mismo que garantiza una marcha suave, mínimo rozamiento y aceptable velocidad de trabajo, controlada eficientemente con precisión, durante todos los desplazamientos, además de ser la opción más económica de las alternativas planteadas.



Fig. 3 Husillo de bolas

#### B. Soportes de carga

Los mecanismos de soporte de carga constituyen una consideración crítica en cualquier sistema de movimiento lineal, ya que permiten un movimiento liso, de baja fricción entre dos superficies. Se utilizaron Rodamientos de Bolas de Ranura Profunda ya que son el tipo más común son muy aconsejables por su bajo par, altas velocidades y bajas pérdidas de potencia. Adicionalmente a las cargas radiales se les puede imponer cargas axiales en ambas direcciones “ver [3]”.



Fig. 4 Rodamientos de ranura profunda

#### C. Cálculos de ingeniería

Es necesario calcular la potencia requerida de los motores debido a la carga mecánica, así como el diámetro de los ejes:

- Potencia del motor portaherramientas

$$pc = \frac{pa \times pr \times vf \times kc}{60 \times 1000}$$

Dónde:

$pc$  = potencia de corte para fresado [W]

$vf$  = velocidad o tasa de avance [mm/min]

$kc$  = fuerza específica de corte [N/mm<sup>2</sup>]

$pa$  = profundidad axial de fresado [mm]

$pr$  = profundidad radial de fresado [mm]

- Dimensionamiento del diámetro de los ejes

$$\sigma_{max} = \frac{Sy}{Fs}$$

$$Sm = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

$$dz = \sqrt[3]{\frac{32 * Sm}{\pi}}$$

verificación de trayectorias de herramientas, inspección y ensamblaje.

Dónde:

$pc = potencia$

$Sy = Resistencia a la fluencia del material$

$M = Momento Flector Máximo$

$Fs = Factor de Seguridad$

$\sigma_{max} = Esfuerzo normal Maximo$

$S_m$

$= Módulo de Resistencia sección circular$

$d_z = diametro del eje$

- Torque motores de cada eje

$$T = 2 \times 10 \times \frac{w'}{t} \times \frac{\pi \times \theta}{180} \times \frac{1}{24}$$

Dónde:

$T = Torque requerido (onz * pulg)$

$I\theta = Carga Inercial (lb * pulg)^2$

$w' = step rate(pasos/s)$

$\theta = Ángulo de Paso (grados) motor a pasos$

#### D. CAD/CAM/CAE

El Diseño y la fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM) utilizan sistemas informáticos en todos los procesos de diseño y fabricación de prototipos.

Como se observa en la figura 5 el CAD incluye todas las herramientas de modelado geométrico “ver [4]”.

Posteriormente el CAE evalúa y verifica el diseño por medio de herramientas de análisis que incluyen cálculos de masas, análisis por elementos finitos, análisis de tolerancias y detección de colisiones.

Una vez que el modelado se completa, se realizan los planos y la documentación con lo que el trabajo queda listo para continuar con el CAM en el que se realizan operaciones tales como planificación de procesos, generación y

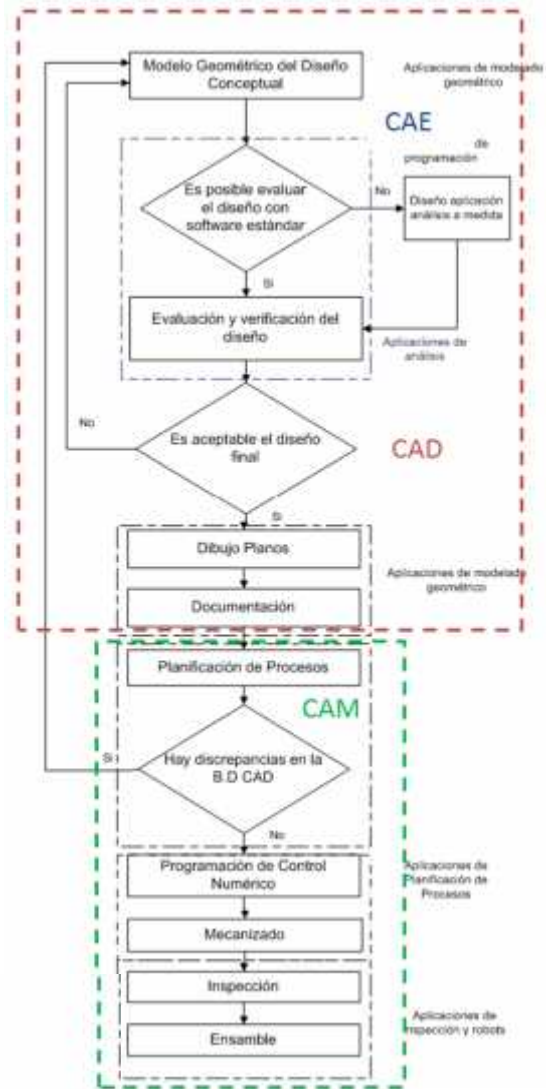


Fig. 5 Proceso CAD/CAM/CAE

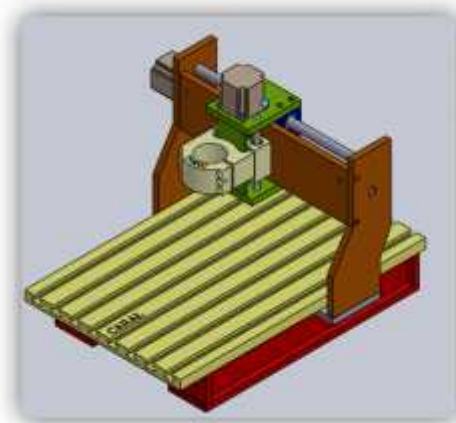


Fig. 6 CAD de la prototipadora

Por medio del método de Elementos Finitos se comprobó que no se sobrepasan los esfuerzos límites en las guías y en la estructura, además permitió determinar la deflexión máxima de los ejes.

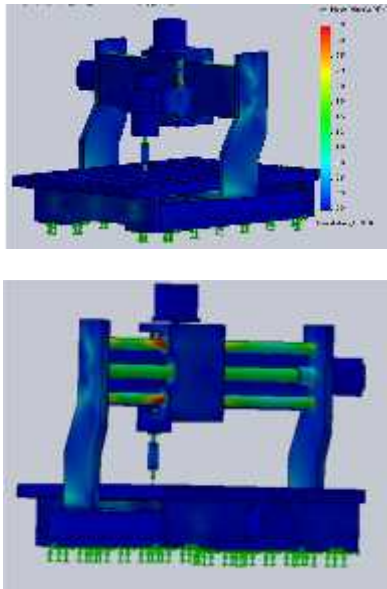


Fig. 7 Análisis de elementos finitos

Después de obtener el diseño CAD de las piezas, simular el prototipo y optimizarlo, se procede a realizar la manufactura de las partes (CAM).

La mayoría de las partes que conforman la prototipadora CNC fueron fabricadas con aleación de Aluminio 6063 por su Resistencia mecánica, Durabilidad y Resistencia a la corrosión. El soporte del motor porta herramientas y la mesa se fabricaron con Duralón para disminuir la inercia y por sus propiedades de Rigidez, Dureza, Ductilidad y Manufacturabilidad.

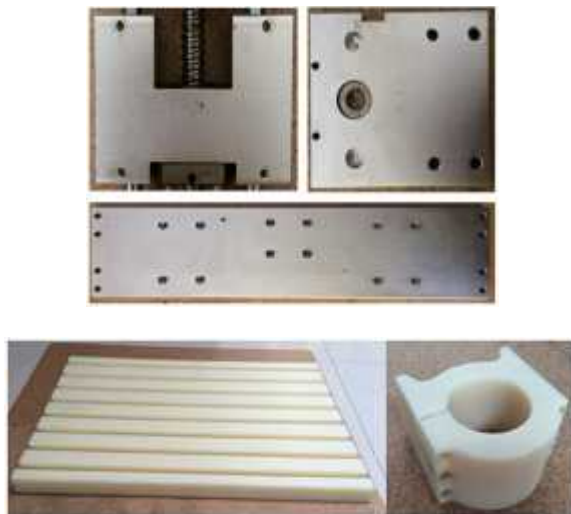


Fig. 8 Construcción de los elementos mecánicos

#### IV. SISTEMA DE CONTROL

El sistema propuesto consta de varios componentes, como se muestra en la figura 9, el componente principal es el controlador CNC pues en este se realizan las operaciones principales para el control de posicionamiento numérico, velocidades, entradas y salidas digitales, y comunicación con el computador.

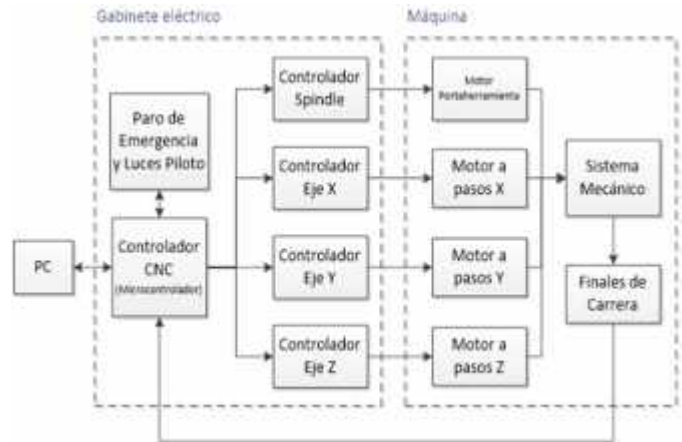


Fig. 9 Diagrama de bloques de los componentes del sistema

##### A. Control de posicionamiento y velocidad

El driver que se utiliza para el control del motor a pasos de cada eje, se encarga de realizar las tareas de control de corriente en las bobinas para el movimiento del motor, como se puede observar en la figura 148 solo necesita tres señales de entrada:

- Clk: Reloj, 1 paso por cada flanco ascendente.
- Dir: Dirección de movimiento.
- Enb: Habilitación o deshabilitación del driver.

Estas señales digitales se generan en el microcontrolador, todas son necesarias, sin embargo, la más importante es la señal de reloj clk, pues del número flancos (ascendentes o descendentes) que está presente en un determinado tiempo, dependerá la posición y la velocidad del motor y por ende, del eje respectivo.

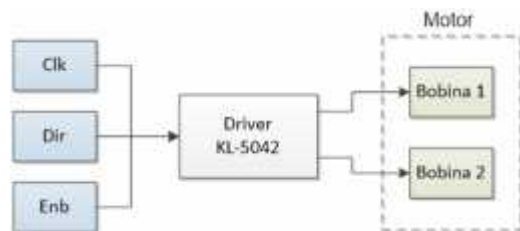


Fig. 10 Entradas digitales del driver de motores

## B. Interpolación Lineal

Las funciones de código que realizan una interpolación lineal son G00 y G01. En la siguiente figura se muestra una interpolación lineal desde el punto P al punto Q, con sus respectivos vectores de velocidad y sus desplazamientos.

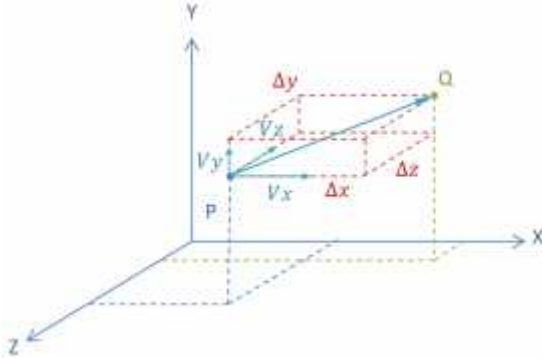


Fig. 11 Interpolación lineal y sus vectores

Las ecuaciones que se utilizan para calcular los desplazamientos y velocidades de cada eje son:

$$\Delta x = (x1 - x0) \cdot \frac{400 \text{ pasos}}{5 \text{ mm}} = np_x$$

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$$V = \frac{d}{t}$$

$$V_x = \frac{\Delta x}{d} \cdot V \quad nv_x = \frac{3}{8 \cdot V_x \cdot T_0}$$

$$V_y = \frac{\Delta y}{d} \cdot V \quad nv_y = \frac{3}{8 \cdot V_y \cdot T_0}$$

$$V_z = \frac{\Delta z}{d} \cdot V \quad nv_z = \frac{3}{8 \cdot V_z \cdot T_0}$$

Dónde:

- d = distancia total a recorrer.
- V = velocidad lineal de avance.
- t = tiempo total que toma recorrer la distancia d.
- x, y, z = distancia a recorrer en cada eje.
- Vx, Vy, Vz = Velocidad de avance en cada eje.
- nvx, nvy, nvz = Cantidad de interrupciones necesarias para alcanzar velocidad de avance.
- npx, npy, npz = cantidad de pasos.
- T0 = Tiempo de interrupción del Timer0.

## C. Control de velocidad motor porta-herramientas

El microcontrolador 18F4550, usado en este proyecto posee un módulo PWM.

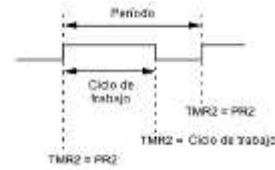


Fig. 12 Modulación de ancho de pulso

En la mayoría de entornos de desarrollo para programar microcontroladores, existen librerías pre-programadas para utilizar el módulo PWM, el cual se utilizará para variar la velocidad del motor. Las funciones que presentan la mayoría de librerías son las siguientes:

- Inicializar: Ejecuta los comandos necesarios para configurar los valores iniciales para el Timer 2 y el módulo PWM. Solo se utiliza al inicio del programa.
- Ciclo de Trabajo: Con esta función se puede indicar el porcentaje que se desea del ciclo de trabajo, variando este valor se puede mover el motor DC a diferentes velocidades.
- Iniciar: La onda PWM se activa.
- Detener: La onda PWM se desactiva.

## V. DISEÑO DEL SOFTWARE

El software creado tiene como objetivo la generación de código G a partir de imágenes, y la ejecución del mismo en un microcontrolador; esto mediante la transmisión de datos por comunicación USB-HID que no requiere drivers para su funcionamiento.

### A. Datos del programa

El primer paso que se consideró en el diseño del software de este proyecto es definir los datos que se utilizan, para esto es necesario indicar las funciones del sistema.

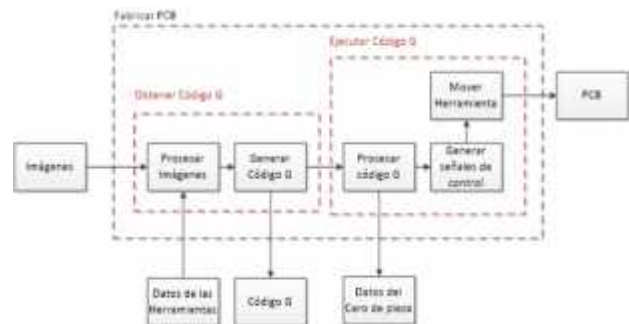


Fig. 13 Funciones del sistema

De esta manera, considerando las funciones del sistema se establecen los datos que se requieren.

Píxeles X	Espesor del PCB	Cero de pieza X
Píxeles Y	Profundidad de fresado	Cero de pieza Y
Longitud X	Agujeros	Cero de pieza Z
Longitud Y	Pistas	Posición X
Imagen	Fresa de borde	Posición Y
Brocas	Código G	Posición Z
Fresas	Tiempo	Emisión USB
		Recepción USB
		Línea de código G

Fig. 14 Datos del programa

### B. Arquitectura del programa

Al conocer los datos y la secuencia de fabricación de PCBs, se procede a desarrollar la arquitectura del programa, la misma que está representada por módulos estructurados (figura 15), de tal manera que se logre identificar las relaciones entre los mismos.

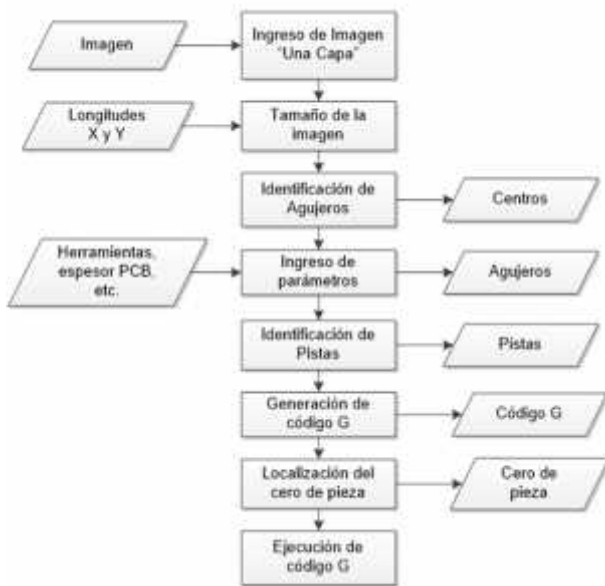


Fig. 15 Arquitectura del programa

### C. Interfaz Hombre-Maquina

Con la información obtenida hasta ahora, datos y arquitectura, se pueden determinar las características que debe tener la interfaz. Para mayor claridad en el uso del software, se crea por cada módulo de la arquitectura del programa una

pantalla con los controles necesarios para que el usuario pueda manejarla sin problemas. Las siguientes recomendaciones "ver [5]" son las que se siguieron para el desarrollo de la interfaz:

- Se debe presentar solamente la información relevante en el contexto actual.
- No abrumar al usuario con datos textuales.
- Los mensajes de error deben ser significativos.
- Utiliza ventanas para diferenciar información.
- Pregunta antes de ejecutar alguna posible acción destructiva.
- Permite deshacer la ejecución de las acciones.
- Protege al sistema de los errores que puede cometer el usuario.
- El significado de una pantalla de ser obvio.

Es necesario identificar la forma en que el usuario se desplazará entre cada pantalla de la interfaz:

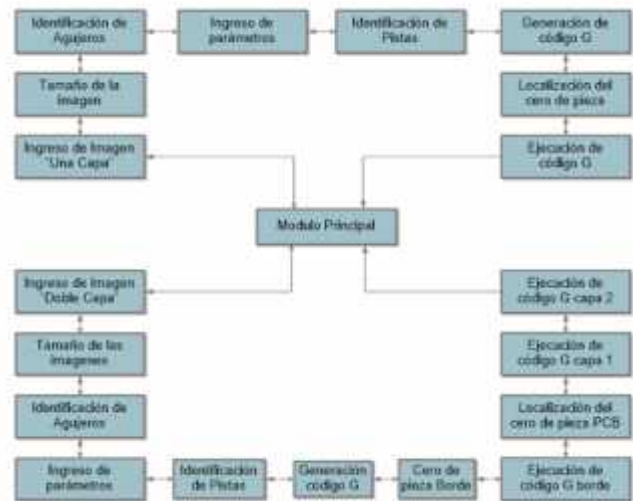


Fig. 16 Diagrama de navegación de la interfaz

### D. Detección de círculos en una imagen

Existen funciones pre-programadas en el módulo de visión de LabVIEW que nos ayudarán a la generación del algoritmo, estas se muestran en la figura 17. Permiten encontrar el diámetro y el centro de cualquier aproximación de circunferencia que se encuentre en la imagen respecto al punto mínimo (Match Score) "ver [6]".



Fig. 17 Detección de círculos en LabVIEW

### E. Detección de contornos en una imagen

De la misma manera que la sección anterior, existen funciones que nos permiten hallar los contornos de la imagen (figura 18), sin embargo, no basta solo con encontrar el contorno, se debe realizar un desplazamiento (offset) de las coordenadas de los contornos con el propósito de realizar la compensación de la herramienta que se utilizará. Para esto se emplea la Morfología de Danielsson (ver figura 19) que es un mapa de distancias euclidiano. “ver [7]”.

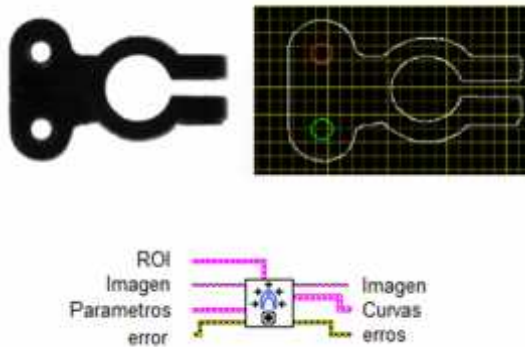


Fig. 18 Extraer curvas de imagen



Fig. 19 Morfología de Danielsson

### F. Generación de código G

Para la generación de código G se utilizan las siguientes herramientas de texto:



Fig. 20 Herramientas de texto

Los algoritmos de generación de código G tan solo dependen de la secuencia en que deben ser ejecutados los códigos, estas secuencias se muestran a continuación:

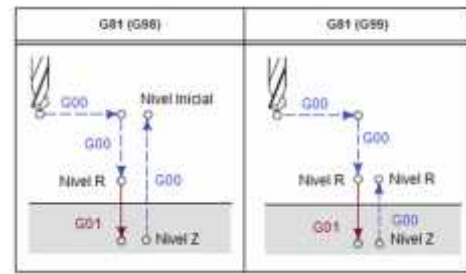


Fig. 21 Secuencia Taladrado

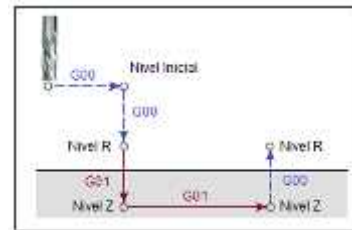


Fig. 22 Secuencia Fresado

### G. Protocolo de comunicación

El protocolo de comunicación se refiere a las reglas y procedimientos que se siguen para comunicar el computador con el microcontrolador “ver [8]”. A continuación se muestran los diagramas que indican la transmisión de datos y el proceso del protocolo.

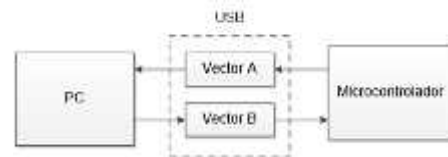


Fig. 23 Datos de transmisión del protocolo



Fig. 24 Protocolo de comunicación

## VI. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Después de finalizar por completo el diseño y construcción del sistema, se realizan varias pruebas de funcionamiento, como interpolación en varias líneas con diferentes valores angulares, anchos de pista, taladrado y una placa de circuito impreso, los resultados de estas pruebas se muestran en las siguientes figuras:

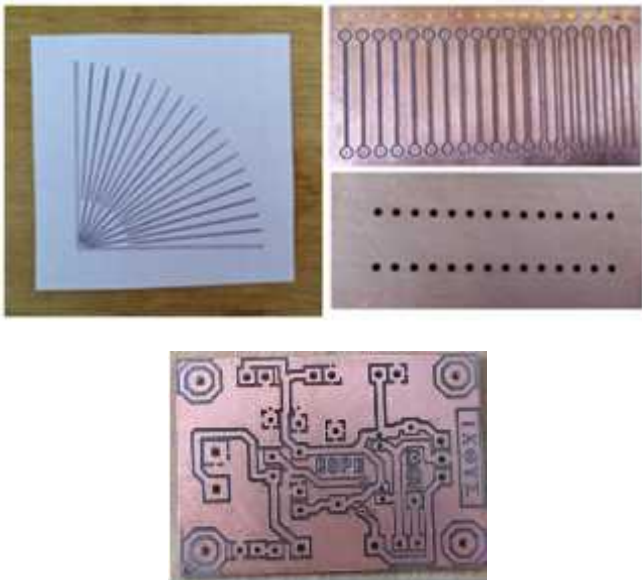


Fig. 25 Pruebas de funcionamiento

## VII. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó la prototipadora ESPE-MCT001 con tres ejes de posicionamiento, la cual implementa tecnología de mecanizado controlado por CNC y procesamiento de imágenes, lo que redujo el tiempo en un 40% en relación con la fabricación de circuitos impresos por métodos convencionales.
- El diseño del sistema mecánico de la prototipadora CNC se realizó en base a los requerimientos técnicos obtenidos de la matriz QFD (Quality Function Deployment) y cumplió con el requerimiento más importante que es la precisión de 0.1 mm, debido a que se utilizaron guías lineales y husillos de bolas de precisión.
- Para el proceso de diseño y construcción se utilizaron herramientas de ingeniería de vanguardia como son el CAD para el diseño del prototipo, el CAE para la evaluación del mismo y el CAM para el proceso de la fabricación de partes.
- Se desarrollaron los algoritmos necesarios para el procesamiento de imágenes utilizando las herramientas

del módulo de visión de LabVIEW, lo que permitió determinar con exactitud las coordenadas pistas y agujeros de un circuito impreso, para la generación de código G

- Se diseñó el sistema de control para el posicionamiento y velocidad de los tres motores mediante la creación de un algoritmo de interpolación lineal y su codificación en un microcontrolador que a su vez interpreta el código G recibido del computador
- Se desarrolló el protocolo de comunicación entre el computador y el microcontrolador, este protocolo cumple con las características deseadas pues opera mediante el estándar USB y permite la ejecución de código G y visualización de los parámetros de movimiento de la máquina en tiempo real

## REFERENCIAS

- [1] "Proceso de diseño," Establecimiento y aseguramiento del proceso de diseño , Ing. Giovanni Torres, [http://goodesgoesheaven.blogspot.com/2013/10/1\\_28.html](http://goodesgoesheaven.blogspot.com/2013/10/1_28.html)
- [2] "Design process," The Mechatronics Handbook, Bishop, R. (2002). Austin: Editor in Chief.
- [3] " Accionamientos de ejes piñón cremallera con juego cero," Interempresas.(2011).<http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/8336-Accionamientos-de-ejes-pinion-cremallera-con-juego-cero.html>
- [4] Sistema de Cad/Cam . (2014). Sistema de Cad/Cam . Recuperado el 14 de 1 de 2014, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4483/fichero/2.+Sistem as+de+CAD-CAM.pdf>
- [5] Amo, A., Martinez, L., & Segovia, F. (2005). Introducción a la ingeniería de software. Delta Publicaciones .
- [6] LabVIEW . (s.f). Recuperado el 2 de 3 de 2014, de <http://www.ni.com/labview/vision/esa/>
- [7] Morfología de Daniel Sson. (2003). Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision. Prentice Hall Professional.
- [8] Pablos, C., López, J., Martín, S., & Medina, S. (2004). Informática y comunicaciones en la empresa. ESIC Editoria.