

# **CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA IMPRESORA DE CIRCUITOS IMPRESOS PARA EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.**

*Jose Alberto Maldonado Tituaña , Ibarra - Ecuador*

**Resumen** — El presente trabajo de grado está orientada a construir una Máquina CNC que permita imprimir directamente sobre (placa de cobre) baquelita circuitos de electricidad y electrónica básica, para lo cual se utiliza como herramienta un dispensador de tinta indeleble. El proceso de sus funciones básicas puede ser realizado manualmente por medio de los botones de su panel de control y desde un computador el proceso automático, mediante comunicación por el pórtilo paralelo. Luego de la impresión, la placa impresa debe ser sometida a un proceso químico conocido como "atacado con ácido", donde eliminara todo el cobre que no esté protegido por la tinta, dejando así únicamente las pistas del circuito diseñado. Su mayor ventaja es guardar en un archivo de la Pc después de un proceso que se realiza el de vectorización( mapeo matricial) para convertir cualquier formato que se tenga, a un formato final que indique posición para movimiento en los ejes X,Y y Z, lo cual permite repetir la misma impresión las veces que se desee desde su formato final.

La máquina impresora construida tiene dos motores que permiten los desplazamientos a lo largo y ancho sobre el plano horizontal y uno que sube o baja el marcador de tinta indeleble. El sistema está conformado por un panel de control de funciones básicas, una pantalla LCD que despliega opciones elementales de la máquina impresora, sensores fin de carrera que ayuda a definir el área de trabajo, pórtilo paralelo de comunicación. Para el control automático se utiliza un programa CNC que es KCAM4, y para el diseño de pistas y ruteado, cualquier programa de electrónica que permite realizar el diseño de los circuitos impresos. Para el proyecto se ha utilizado PROTEL para el ruteado y pruebas. Su control lo tiene los microcontroladores PIC16F628A programado en PICBASIC Pro, el mismo que permite manejar los motores, sensores y demás elementos electrónicos que posee.

Seguidamente se procede a ejecutar y analizar el funcionamiento de los sistemas y las pruebas de operación en modo manual, modo automático y mantenimiento de la máquina impresora de circuitos eléctricos y electrónica básica.

## **I. INTRODUCCION**

La construcción de la máquina impresora de circuitos impresos, es una alternativa y ayuda para las prácticas que se realiza en el laboratorio de automatización industrial de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, puesto que estos últimos

años la tecnología para la fabricación de circuitos impresos y las herramientas para su diseño han avanzado a pasos agigantados de tal manera que existen circuitos electrónicos muy complejos, que un humano no podría realizarlo con facilidad.

Esta máquina impresora está dividida en dos grandes sistemas, el electrónico y mecánico.

El primero está formado de una Pc, programas y dispositivos de control, donde se realizara los diseños de los circuitos electrónicos colocando los componentes y las conexiones correspondientes. Para luego enviar mediante una comunicación de interfaz paralela un conjunto de órdenes que siguen una secuencias lógicas que constituye un programa maquinado CNC, dándole así ordenes o instrucciones a la máquina a imprimir en la placa de cobre (baquelita) el circuito electrónico.

## **II. DESCRIPCION**

El sistema sera descrito de acuerdo a los siguientes componentes:

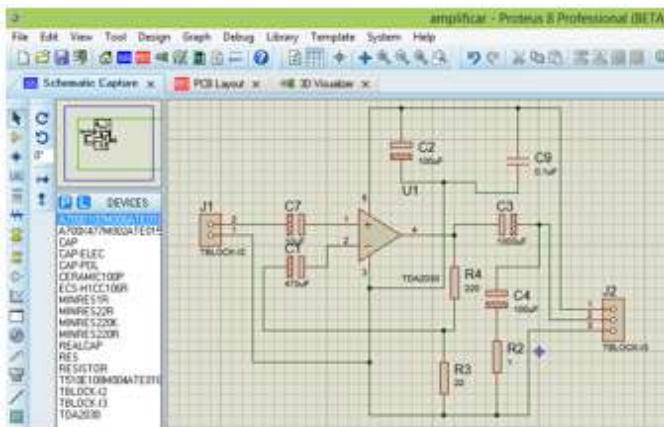
♦ **Software:** Contiene el diseño de la PCB, genera y lee archivos descriptos, interfaz para usuario, comunicación y visualización de las coordenadas y otros datos necesarios al controlador por medio del portico paralelo de la Pc.

♦ **Hardware:** Formada por dispositivos electrónicos, la cual se encarga de tomar los datos de la Pc y generar señales de control para los dos ejes de posicionamiento, como para el electroiman del marcador indeleble.

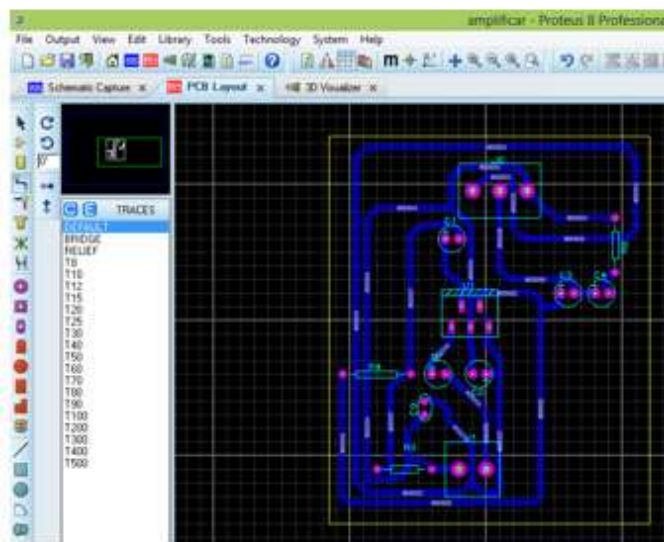
♦ **Estructura Mecánica:** Corresponde al cuerpo de la máquina, la cual consta de dos tornillos sin fin de posicionamiento, con sus adecuados actuadores y sensores; al igual que con un electroiman CC para el graficado del circuito.

## II – A. Software

**II – A1. Diseño del PCB y Creacion de archivos DXF:** La realizacion de circuitos impresos casi siempre requiere programas de diseño elctronico automatico para distribuir e interconectar cada uno de los componentes. Los cuales convierten el esquematico en una lista de los nodos y pines del circuito, donde para es te proceso se arma el circuito deseado en ISIS (Fig. 1a) parte del programa Proteus y por ultimo el circuito conectado se pasa a ARES (Fig. 1b) donde se crea un diseño de pista del circuito y se guarda en forma de conjunto de datos e instrucciones en formato HPGL ,PDF o DXF. Para esta aplicación se genera un archivo DXF.



(a)



(b)

Fig. 1: Esquema del circuito en ISIS (a) y Diseño del Circuito en ARES (b)

**II – A2. Interfaz con el Usuario y lectura de archivos DXF:** El software que se utilizo es el Kcam4 (Fig. 2) que permite abrir los archivos DXF (Fig. 3a), interpretar las características del PCB y relizar la lectura de las instrucciones

previstas, el mapeo matricial , su unidad de medida pulgadas o milímetros formato de las coordenadas, su tipo de movimiento ; es decir desplazarse graficando , desplazarse sin graficar , hacer saltos y marcar un punto . con esta informacion se procese a cargar el archivo DXF generado en el software Kcam4 (fig. 3b).

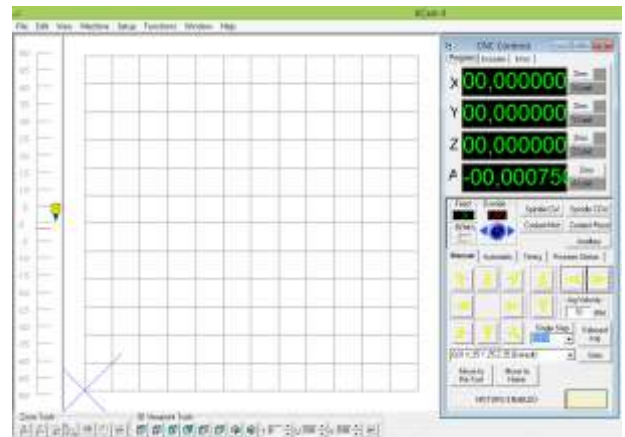
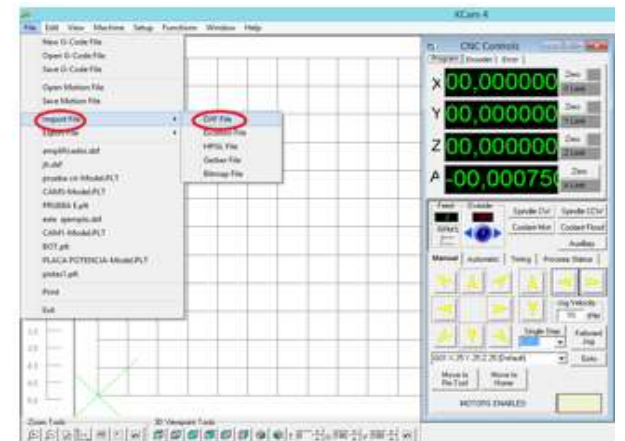
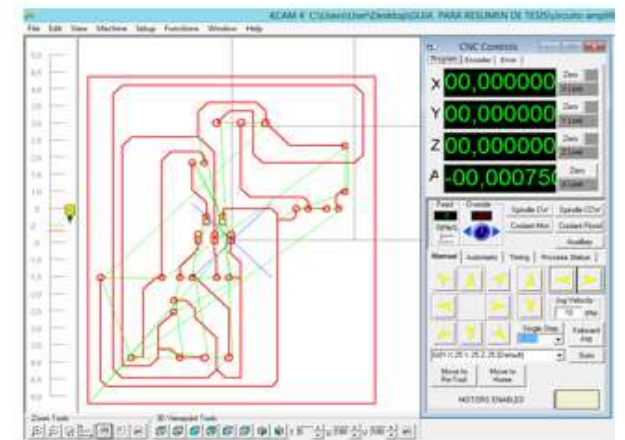


Fig. 1: Plataforma Kcam4.



(a)



(b)

Fig. 3: Importar archivo DXF( a) y Archivo Generado (b).

El proceso de graficado se inicia con un comando ubicado en CNC Controls , donde se genera la condicion de cero es decir mueve y ubica el eje Z (marcador indeleble ) en la coordenada (0, 0,0). Una vez encendido la plataforma se da un enter en el boton de modo automatico ubicado en la misma pantalla de Kcam4 , obiamente la maquina tiene que estar encendida , seguidamente el programa Kcam4 envia pulsos de cada uno de las coordenadas de los ejes al circuito de control y la cual verifica los movimientos respectivos , empleando el portico paralelo de comunicacion .

## II – B. Hardware

**II – B1. Controlador :** El controlador esta constituido por 3 microcontroladores PIC16F628A, los mismos que toman la señales de cordenadas de cada uno de los ejes provenientes desde el programa de la PC (fig. 4) , donde generan respectivas secuencias para la activacion del electroiman y movimiento de los motores a paso ,acompañados de sensores fin de carrera quines limitan el lugar de trabajo , esto mediante la comunicacion portico paralelo .

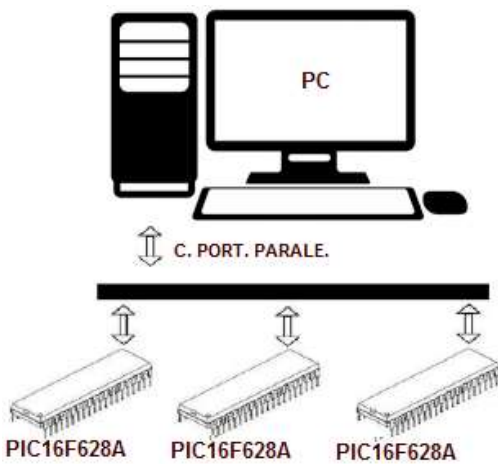


Fig. 4: Esquema de Comunicación.

**Comunicación Portico Paralelo :** Debido al facil manejo del puerto y por ser una de las mas aplicadas en la industria de la automatizacion se opto por escoger para la interconexion de los microcontroladores y la Pc el prortico paralelo , el cual puede realizar su trabajo en dos modos diferentes : 1.5 Mbps (baja velocidad) y el otro de 12 Mbps (alta velocidad) utilizando este ultimo para el desarrollo de este proyecto , donde Cada controlador del motor debe tener una entrada de CLK conectado a un pin en el puerto paralelo. Esta gira al motor pasó a paso cuando termina el pulso.

También se requiere una entrada de dirección para indicarle al controlador en qué dirección debe mover al motor. La entrada de habilitación se usa para indicarle al controlador de aplicar o no corriente al motor, la función de habilitación es opcional.

Si se tiene un controlador que tiene una entrada de habilitación y está se encuentra habilitada cuando los motores se paran, estos se apagan protegiéndoles así del sobrecalentamiento.

El control a través de pórtico paralelo, permite designar BIT por BIT cuales son los pines de control para CLK. Dirección y habilitación, para cada motor.

**Programacion de los Microcontroladores :** El firmware de los microcontroladores 16F628A se desarrollo en Microcodestudio del lenguaje basic con el compilador Pic Basic Pro, la cual contiene librerias necesarias para la comunicacion Portico Paralelo , la cual permite un control total del programa , siendo la programacion totalmente facil y transparente para el programador y admas es mucho más fácil de escribir y leer que el lenguaje ensamblador Microchip y otros .

## II – B2. Etapa de Potencia :

**Motores Paso a Paso :** Esta comandado desde el software Kcam4 a través de los Pics 16f628A y con el proposito de no tener ningun tipo de inconveniente , daños a los microcontroladores se utilizaron optoacopladores 4N33 conectados en cada una de sus salidas . Para la conexion de los motores a paso se utilizo los integrados ULN2003 para poder ampfilficar la coerriente y transistores Mosfets IRFZ44 las cuales sirvieron como drives de proteccion y para manejo directo de los motores a paso (fig. 5).

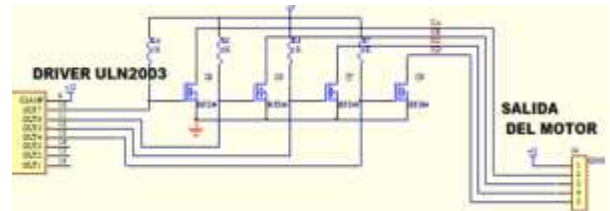


Fig. 5: Conexión a los motores a paso con la etapa de Potencia .

## II – B3. Sensores :

Se ubicaron sensores fines de carrera para asegurar el limite de trabajo formato A4 dentro del cual se va desplazar el carro principal como es en el eje X – Y, en caso de sobresalir del limite de trabajo estos se accionarian y enviarian un pulso a los pics y la maquina se detendria automaticamente y sonaria una alarma como señal de aviso para reiniciar la maquina impresora (fig. 6).



Fig. 6: Sensores Final de Carrera.

**II – C. Dispositivo Mecánico :** La estructura mecánica de esta maquina esta formada por 2 tornillos sin fin los cuales estan contruidos por dientes helicoidales , 2 ejes guias cilindricos los cuales otorgan movimiento rotacional, que permiten realizar un movimiento en desplazamiento lineal que provoca el movimiento de rotacion del motor , ademas estos ejes cilindicos son de baja friccion que da mas estabilidad al movimiento de la maquina impresora , en la figura 7, se puede observar cada uno de los ejes implementados en la maquina . El eje rotacional simplemente esta formado por motores a paso que entrega el movimiento al carro pricipal para realizar el dibujo .

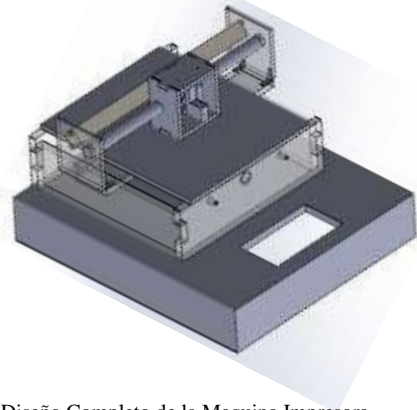


Fig. 8: Diseño Completo de la Maquina Impresora

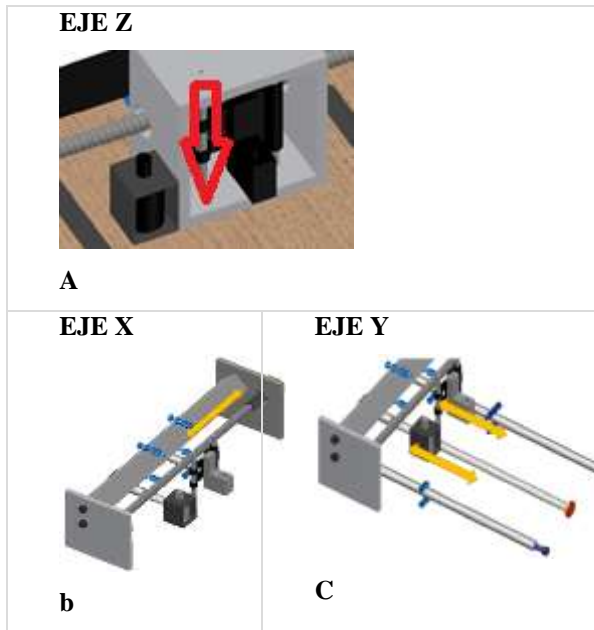


Fig. 7: Diseño de conjunto de Ejes y tornillo sin fin .

El eje X y Y tiene un movimiento independiente , ofreciendo precision y estabilidad al carro principal . Los tornillos helicoidales X ,Y tienen un paso de 1.75 mm y 12 mm de diametro , al igual que los motores con un avance rotacional de 1,8 grados por paso , con una velocidad de trabajo de 10pulg/min.

La herramienta de ruteo , es un marcador de tinta indeleble de facil adquisicion y muy bajo costo. Esta presenta un optimo desempeño de trazado sobre el cobre.

La ubicaicion de los ejes corresponde a la arquitectura de una maquina cartesiana (fig. 8) diseñada en AutoCAD 2010 .

Donde para la selección de material se tiene lo siguientes parametros :

El peso que soportará el tornillo sin fin es de 6,67N (carro Principal) y 3,92N (peso del mismo tornillo) De acuerdo a las condiciones físicas de diseño se selecciona tornillo sin fin de  $L = 450$  mm y 12mm de diámetro.

Donde se tiene el diagrama de fuerzas (fig. 8).

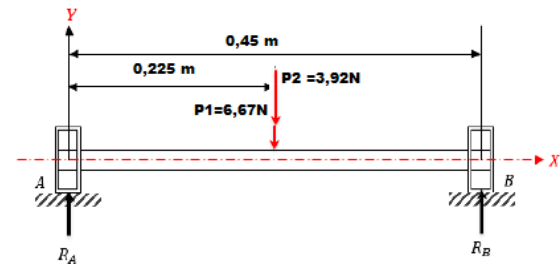


Fig. 8: Diagrama del Cuerpo libre del Tornillo Sin Fin .

Donde sus fuerzas:

$$F_1 = 5,29N$$

$$F_2 = 5,2932 N$$

Momento maximo del tornillo sin fin :

$$M_{max} = 0,871N.m$$

Con la ayuda del software (MDSolids 4.0) se realiza la comprobación de sus fuerzas: cortante y momento flector, y así mismo se procede a graficar sus diagramas respectivos, Observar (fig. 9).

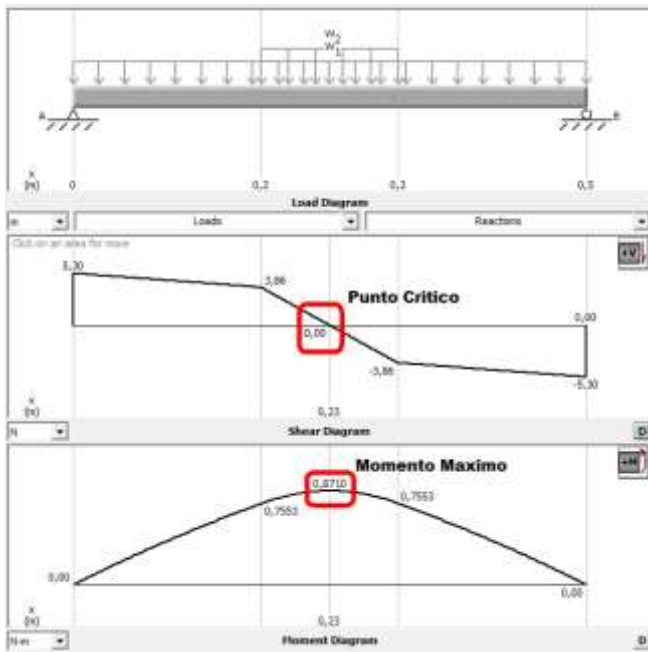


Fig. 9 : Carga, Esfuerzo Cortante y Momento Flector del Diagrama Fuerza Cortante y momento Flector en el Tornillo sin Fin.

A continuación se halla el esfuerzo de trabajo :

$$\sigma_t = \frac{M_{max}}{S}$$

$$\sigma_t = 640KPa$$

Comparando y teniendo en cuenta que para un buen diseño el esfuerzo de trabajo o diseño no sobrepasar el esfuerzo admisible, que el valor máximo que puede estar sometido el material.

$$\sigma_t \leq \sigma_{adm}$$

$$640KPa \leq 125 MPa$$

Seguidamente se caculo la deflexion maxima del eje :

$$y_{max} = - \frac{Fx L_x^3}{192EI_x}$$

$$y_{max} = - 1,30 \times 10^{-4} m$$

$$y_{max} = - 0,130mm$$

Sabiendo que la deflexión hacia arriba son positivas (+) y hacia abajo negativas (-), en este caso la deflexión es hacia abajo puesto que todo el peso del carro principal es hacia abajo.

Esta deflexión encontrada es aceptable para el diseño requerido de los ejes y sus funciones, su comprobación se lo hizo con el software SolidWords se obtiene que el eje se flexiona 0,1370 mm (fig.10) al igual que al valor calculado.

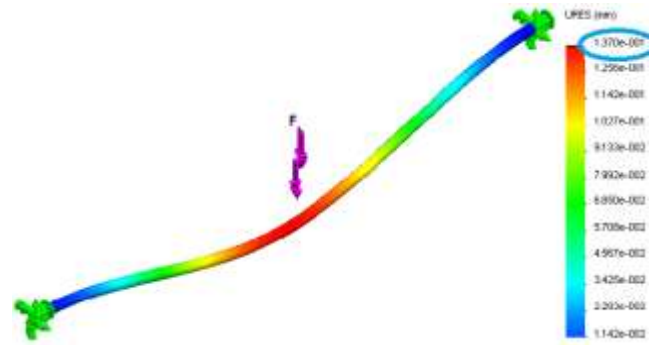


Fig 10 : Análisis de Deformación del eje X, Y.

Tabla I : Deformación del Eje.

LONGITUD DEL EJE (mm)	DIAMETRO (mm)	FUERZA EJERCIDA (N.m)	DEFORMACION MAX. (mm)
450	12	10,59	1,370e-001

### III. RESULTADOS

Inicialmente se realizaron pruebas en cada coordenada de la maquina impresora para observar: la velocidad de trabajo de cada eje respectivamente.

En el eje horizontal se presentaron inconvenientes al momento de calibrar la velocidad de desplazamiento en el software Kcam4, además existía un desalineamiento en el eje X en cuanto de precisión de movimiento, para lo cual se procedió a realizar las pruebas necesarias que se detallan en la siguiente (Tabla II).

Tabla II

ELEMENTO	PROBLEMA	SOLUCION	PRUEBAS
Kcam4	Velocidad de rotación del tornillo sin fin.	Calibrar la velocidad de rotación del motor X en la pantalla CNC Controls.	7
Movimiento del eje X	Desalineación	Lubricación de los rodamientos Ajuste de montaje Ajuste de los pernos de sujeción Ajuste del tornillo guía del carro.	5 6 7 8
Carro principal	No grafica	Alinear el carro	5
Total			38

La solución de estos inconvenientes fueron realizados después de haber realizado 38 pruebas.

En el desplazamiento del eje Y se presentaron inconvenientes con la velocidad de giro del motor la misma que giraba más rápido que el eje X, además existía un desalineamiento en el movimiento y por último el eje se atascaba y no seguía a cumplir con su función, de esta manera para poder solucionar estos inconvenientes se empezó a realizar los siguientes pasos que se detallan en la siguiente (Tabla III).

Tabla III

ELEMENTO	PROBLEMA	SOLUCION	PRUEBAS
Kcam4	Velocidad de rotación del tornillo sin fin.	Calibrar la velocidad de rotación del motor Y en la pantalla CNC Controls.	8
Movimiento del eje Y	Desalineación	Lubricación de los rodamientos	6
		Ajuste de montaje	7
		Ajuste las tuercas de sujeción	8
		Ajuste del tornillo guía del eje Y.	9
Total			38

La solución de estos inconvenientes se solucionó después de haber realizado 38 pruebas.

En el sentido Z se presentaron inconvenientes con el electroimán que se calentaba mucho, al igual que los cables de alimentación a la misma, como también el material de grilon donde va sujeto el marcador indeleble, no se deslizaba correctamente, para lo cual se procedió a realizar las pruebas necesarias que se muestran en la siguiente (Tabla IV).

Tabla IV

ELEMENTO	PROBLEMA	SOLUCION	PRUEBAS
Pieza de Grilon	Deslizamiento o no adecuado	Calibrar utilizando un resorte.	8
		Lubricación de los ejes.	3
		Ajuste de montaje	4
Electroimán	Calentamiento más de lo debido.	Electroimán 38 v	3
Cable de conducción	Se calienta	Cable #18 a 2,66 A	2
Total			20

La solución a estos inconvenientes se la halló después de realizar 20 pruebas, después de las cuales se puede afirmar que funciona correctamente.

Inmediatamente luego de armar sus respectivos componentes se calibro la velocidad de trabajo en el software Kcam4 (Tabla V).

Tabla V

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
VELOCIDAD DE TRABAJO DEL TORNILLO SIN FIN X - Y DESDE KCAM4 (Pulg/min)	7	8	10	12
PRECISION DE POSICIONAMIENTO	0,6pulg/10pulg	0,7pulg/10pulg	0,985pulg/10pulg	0,8pulg/10pulg
EXACTITUD DE DISEÑO (%)	60	70	98,5	80

En la ( fig.11) se puede observar el resultado obtenido con la calibración de velocidad de trabajo de cada uno de los ejes.

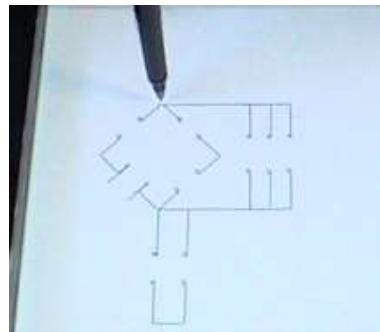


Fig. 11: Prueba de Diseño del Circuito

Basándose en las pruebas realizadas (Tabla V) se llegó a reajustar los parámetros en el software Kcam4, estableciendo la velocidad de trabajo a 10pulg /min del tornillo sin fin. Con la cual se tiene un proceso de graficado del circuito con una exactitud del 98,5%, como se muestra en la ( fig.11 ) un ejemplo de una PCB elaborado por la maquina impresora.

Las dimensiones de la estructura son 510 x 520 mm con un area de trabajo de formato A4 y con desplazamiento en el eje Z de 5mm.

Despues de varias pruebas se procede a realizar un reajuste de los paramentros del software, así como tambien en la tarjeta control . El proceso de graficado se puede observar en la ( fig.12 ),la cual tarda un tiempo de 16 min aproximadamente en elaborar un circuitio amplicador de 10w en archivo DXF. En la ( fig.12 ) se muestra un diagrama de una Pcb elaborado por la maquina impresora.

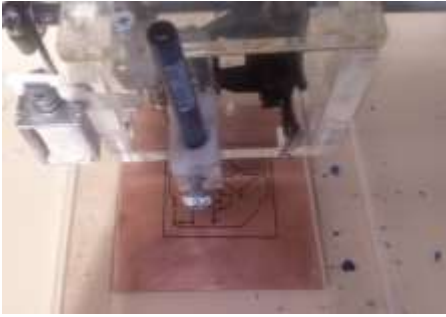


Fig. 12: Proceso de Graficado del Circuito A.

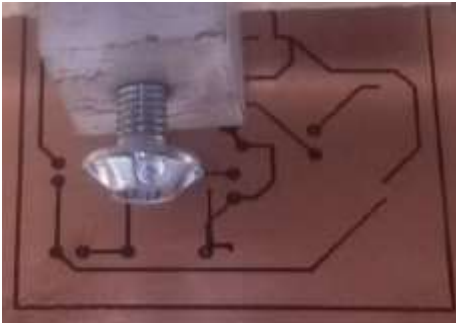


Fig. 13: Resultado del Proceso de Diseño del Circuito.

Con el fin de comparar los resultados, y diferenciar el tiempo de elaboración de una Pcb se usó el mismo circuito empleando el método de fabricación manual, el cual presentó algunos desperfectos en el diseño como se puede (fig.14), estas se deben al estampado de realizar con la plancha.

Obteniendo los resultados y comparando los presentados por la máquina impresora es posible afirmar que esta realiza una PCB con ningún desperfecto como es la discontinuidad de pistas, unión entre ellas lo que casi siempre presenta una Pcb elaborada en forma manual (fig.14), además el tiempo de elaboración, desde la importación de su diseño al programa Kcam4, se redujo aproximadamente una tercera parte del tiempo utilizado en el proceso manual.



Fig. 14: Resultado Impreso en Forma Manual.

#### IV. CONCLUSIONES

Se logró satisfactoriamente el objetivo principal planteado en este proyecto de tesis que fue el de construir una máquina impresora que imprima sobre baquelitas (placa de cobre)

circuitos de electricidad y electrónica básica, con la finalidad de estar acorde a los avances tecnológicos que la industria del control numérico computarizado CNC nos brinda.

El control de la Máquina Impresora se basa en 2 tarjetas principales; tarjeta de procesamiento y la tarjeta de control de motores; se lo hizo de esta forma modular para separar la etapa de potencia de la de procesamiento y evitar sus consecuentes interferencias.

La mejor opción dentro de una variedad de software fue Kcam4 de código abierto por su fácil configuración, manejo, control y capacidad de generar archivos DXF y HPGL.

El diseño del sistema mecánico se lo hizo utilizando AutoCAD, MDSolids y Solidworks, logrando realizar análisis de esfuerzos estáticos, detección de fallas para su respectiva corrección y de esta forma se cumplió con las necesidades y parámetros planteados.

Es importante tener en cuenta la potencia requerida del circuito al momento de seleccionar los elementos electrónicos por su corriente necesaria y potencia requerida al control de motores a pasos.

De acuerdo a las pruebas de funcionamiento realizadas con la máquina impresora se estableció que la velocidad de trabajo generada por medio de la configuración en el software KCAM4 a los motores paso a paso es de 10 pulg/min para que el carro principal donde va ubicado el marcador de tinta indeleble no provoque fallas en el diseño de la pista; al incrementar provoca que las pistas electrónicas se corten y pierdan continuidad, al disminuir el proceso se vuelve muy lento.

De acuerdo a las pruebas de funcionamiento de la máquina impresora realizada se determinó que es necesario ubicar un resorte en el eje Z, junto al marcador para que este le tenga alado durante el diseño de la pista electrónica.

De acuerdo a las pruebas de funcionamiento realizadas se determinó que la máquina impresora (automática) de circuitos impresos tiene un 98,5 % de exactitud, 100% de precisión, y se redujo el tiempo de diseño de pistas electrónicas en un 39 % con respecto al proceso manual.

El debido uso del manual de operario es de mucha ayuda para el buen funcionamiento de la máquina impresora.

Se pudo controlar el proceso de diseño de la pista electrónica, por un medio de transmisión denominado pórtico paralelo.

## V. RECOMENDACIONES

Incentivar que próximos egresados de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, sigan investigando sobre el Control Numérico Computarizado con el propósito de que se extienda el conocimiento de este prototipo y se ponga en marcha la práctica.

Para lograr mayor exactitud en el maquinado del acrílico se recomienda usar máquinas de corte a láser y de esa forma lograr un correcto acabado de la estructura y base de la máquina impresora.

Se recomienda utilizar motores no más 1.8 grados de ángulo de giro para mayor precisión de la herramienta de ruteo (marcador indeleble) y en caso de querer manipular otro tipo de herramienta que tenga un peso desmedido es recomendable utilizar motores a paso de mayor torque.

En la parte del diseño electrónico, se recomienda tomar muy en cuenta las protecciones para evitar daños y cortocircuitos.

Operar la máquina impresora siempre y cuando los ejes estén debidamente lubricados y se conozca su modo de funcionamiento, o se haya leído el manual de instrucciones que se encuentra en este mismo documento.

Antes de poner en funcionamiento la Máquina Impresora se recomienda ubicar la herramienta de trabajo correctamente (marcador de tinta indeleble) ya que si está muy pegada al tablero esta puede crear una resistencia al movimiento y forzaría a los motores paso a paso o su vez, si esta demasiado separada del plano no realizaría el diagrama electrónico sobre la baquelita, ocasionando así espacios en blanco que afectaría al diseño de los circuitos electrónicos básicos.

Para realizar diseños en modo manual, se recomienda utilizar la opción de desplazamiento paso a paso para trazos muy pequeños, ya que la opción de desplazamiento corrido no permite hacer paradas exactas, tomando en cuenta que esta opción permite solo trazo de figuras geométricas.

Se recomienda seleccionar de manera debida los marcadores de impresión, ya que estas tienen que ser de tinta indeleble, para impedir cualquier falla en la calidad de impresión de la pista electrónica.

Para un manejo recomendable de la Máquina Impresora se recomienda antes de ponerlo en funcionamiento revisar el manual de usuario.

## VI. REFERENCIAS

[1] Cultura S.A., "Manual de Máquinas y Control Numérico." Cultural S.A., España, 2005. Rihs, D., Polizzi, I., & Victorian University of Technology. (2002). Prosthetic Foot Design. Australia.

[2] Dormer Tools, Ruteo, 2009, [http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Internet/Spanish/s004464.nsf/Alldocs/Product\\*2DMachiningSolutions\\*2DPDF\\*2ATH\\*2DPDFes/\\$file/8Ruteado.pdf](http://www.dormertools.com/sandvik/2531/Internet/Spanish/s004464.nsf/Alldocs/Product*2DMachiningSolutions*2DPDF*2ATH*2DPDFes/$file/8Ruteado.pdf).

[3] National Instrument, Stepper Motor, 2012, <http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/203936>.

[4] Electrónica, Funcionamiento del Diodo, 2005, <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Funcionamiento-del-diodo.php>

[5] Shigley, J. E. (2008). Diseño en Ingeniería mecánica. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

[6] Robot, Motor a Pasos, 2009, <http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>.

[7] E. Soto, Motor Paso a Paso. Universidad Tecnica Santa Marta, 2007.