

Perforación automática de circuitos impresos

saber hacer

Carlos Blanco Salinas*
Fernando Ríos Gutiérrez*

En este trabajo describimos las características funcionales y operativas de un sistema controlado por una computadora personal con aplicación al perforado automático de circuitos impresos. Actualmente el proyecto se encuentra en la etapa de pruebas finales y de generación de documentación para el usuario, sin embargo, el prototipo construido se ha utilizado, dentro de la institución, por un lapso de seis meses para maquilado de circuitos impresos de propósito general. A futuro inmediato contempla modificar los programas para que puedan usarse en una computadora compatible con "PC" y construir una nueva versión, más grande, del sistema mecánico.

Introducción

Un circuito impreso es una tablilla compuesta de un material aislante (baquelita o fibra de vidrio), usualmente de 1/16 de pulgada de espesor, cubierta en una o ambas de sus caras por una delgada capa de material conductor (cobre). Mediante un proceso de fotolitografía, algunas zonas del material conductor son eliminadas para formar trayectorias eléctricas que interconectan a los dispositivos electrónicos de un circuito determinado. Existen dos formas de fijar los dispositivos electrónicos al circuito impreso, por montaje superficial y por

* Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla. Ciudad Universitaria 72570 Puebla, Pue.

inserción, en esta última, que es la más usual, las terminales de los dispositivos entran en perforaciones que son hechas al impreso y posteriormente se sueldan. La importancia de los circuitos impresos dentro del ámbito de la electrónica resulta obvia si se considera que cualquier sistema contiene, al menos, un circuito impreso.

Dentro del proceso de elaboración a nivel industrial de circuitos impresos, la etapa de perforación es la que emplea más tiempo y por ende una de las más costosas.

Actualmente, en nuestro país, el perforado de los circuitos impresos se hace de dos formas diferentes: con pantógrafo o con máquina de control numérico. El pantógrafo consiste en una cabeza de taladro y una aguja en un plano X-Y, la cabeza del taladro efectúa el mismo movimiento. Para realizar las perforaciones de acuerdo con un patrón determinado, se construye una plantilla metálica con las perforaciones deseadas la cual es posteriormente colocada debajo de la aguja; el usuario debe mover la aguja hasta que ésta coincida con una perforación de la plantilla y en ese momento accionar un interruptor para bajar la cabeza del taladro realizando así la perforación deseada en el impreso. Este proceso se debe repetir para cada perforación que se desee hacer.

Para agilizar el perforado, algunos pantógrafos cuentan con varias cabezas de taladro dispuestas de tal manera que cada una perfora un impreso a la vez. Pero de cualquier manera, el proceso requiere de 100% del tiempo del operador. Otro inconveniente de estos sistemas es la precisión, menor a 0.1 mm, que resulta insuficiente para la fabricación de los circuitos impresos actuales en donde la densidad de componentes, y por lo tanto de perforaciones, es cada vez mayor.

Las máquinas de control numé-

rico cuentan con un sistema electrónico que controla el movimiento del taladro, tanto en el plano X-Y, como en la subida y bajada del mismo. Para realizar las perforaciones se almacena, previamente, en algún tipo de memoria, las coordenadas de todos los puntos y después, conforme se va leyendo cada coordenada de memoria se va realizando cada perforación. Con estos sistemas se obtiene una precisión del orden de 0.01 mm y la ventaja principal de que el tiempo de operador requerido es menor a 10% del tiempo total de perforado.

Aunque el costo de adquisición de una máquina de control numérico es mayor que el de un pantógrafo, si se considera que los requerimientos de precisión en la fabricación de circuitos impresos son cada vez más estrictos, y que los costos de mano de obra son cada vez más altos, entonces, es conveniente iniciar un proceso de desarrollo tecnológico propio alrededor de estos sistemas.

En el mercado existe una gran diversidad de sistemas de control numérico para realizar el perfora-

do de circuitos impresos; desde aquéllos que utilizan como elemento de memoria cinta de papel y accionamiento en el plano X-Y por acoplo directo a motores, hasta sistemas en donde el elemento de memoria es disco y el movimiento en X-Y se realiza sobre un colchón de aire para disminuir la fricción y así lograr mayor velocidad de desplazamiento.

Por razones de estrategia técnica y considerando que el mercado potencial de estas máquinas de control numérico apunta a industrias medianas y pequeñas, las principales características del sistema que ha sido desarrollado como objetivo de este proyecto son: bajo costo, el empleo de una computadora de propósito general como elemento de control, y accionamiento en el plano X-Y por acoplo directo a motores.

Descripción general del sistema

El propósito principal del sistema es el de perforar, de manera automática, tablillas de circuito impreso



siguiendo una secuencia de perforado óptima, establecida por el programa de control de acuerdo a un conjunto de coordenadas proporcionadas por el usuario.

La operación del sistema está centrada en una computadora de ocho bits (Cromemco, System One) y la interacción con el usuario se hace a través de su terminal por medio de comandos, coordenadas y datos en general necesarios para realizar las diferentes funcio-

El sistema de perforado consta de tres partes principales:

- Un sistema de control y procesamiento.
- Un sistema mecánico de posicionado y perforado.
- Un sistema electrónico de interfaz y comunicación.

En términos generales, el sistema de control envía señales al sistema eléctrico para que éste a su vez accione los motores del sistema mecánico con el objeto de realizar

sacar listados de las coordenadas de los puntos que forman los patrones.

Como elemento de interacción con el sistema eléctrico la computadora cuenta con una tablilla de puertos paralelos (TU-ART). De esta tablilla, para cada uno de los tres motores de pasos del sistema mecánico se utilizan 4 bits de salida, para el control de encendido del taladro y 2 en el control de velocidad, y para un módulo de detección de broca rota otros 2 bits.

En relación a los programas que gobiernan el uso del sistema existen tres módulos: Módulo Principal, Módulo Editor y Módulo Perforador. El Módulo Principal controla básicamente el acceso al sistema y el llamado a los demás módulos. Dentro de sus características funcionales destaca el control de acceso de usuarios por medio de claves y prioridades; existe un usuario con máxima prioridad el cual, como responsable administrativo, asigna las claves de acceso a cada usuario y determina cuales de las funciones con que cuenta el sistema podrán ser empleadas por cada uno. Otras de las funciones que realiza este módulo son: borrado, impresión, desplegado en pantalla y cambio de nombres de los patrones. Para facilitar el uso del sistema, el acceso a las diferentes funciones se hace por medio de menús.

El Módulo Editor permite crear y modificar patrones de perforado. Existen dos modos de edición; por tabla y por cursor. En el primero, el usuario debe dar cada una de las coordenadas, en formato X-Y, de los puntos a perforar. En la edición por cursor, el usuario debe posicionar la cabeza del taladro en el punto a perforar y almacenar sus coordenadas; para este propósito se emplean ocho teclas que indican el sentido al que deberá moverse el taladro (norte, noreste, este, etc.): cada vez que se oprime una tecla el taladro se desplaza a una distancia muy pequeña en la dirección indi-



nes, entre las cuales destacan las siguientes:

- Control de acceso al sistema por claves (sólo el personal autorizado puede usar el mismo).
- Edición de patrones de perforado.
- Optimización de trayectorias de perforado.
- Administración de patrones (borrado, renombrado, copiado, etc.).
- Perforado de circuitos impresos de acuerdo a los patrones.
- Impresión de patrones.
- Detección de fallas (automática).

los desplazamientos requeridos durante los diferentes procesos.

A continuación se describe el funcionamiento y organización de cada uno de estos componentes.

Sistema de control y procesamiento

La terminal y la computadora pertenecen a este módulo así como un paquete de programa para el control del sistema. Para el almacenamiento de los patrones y los programas, la computadora cuenta con dos unidades de disco flexible de 5 1/4 pulgadas. Opcionalmente se puede usar una impresora para



cada. Adicionalmente existe otra tecla que almacena la posición del taladro.

Dado que es común que en los circuitos impresos existan grupos de perforaciones que se repiten cada cierta distancia (como es el caso de las perforaciones requeridas para los circuitos integrados), el editor de coordenadas cuenta con un macro-procesador que permite generar durante la edición todas las coordenadas de cualesquiera de estos grupos empleando una sola instrucción. De esta forma, en el supuesto caso de que sea necesario editar un grupo de coordenadas asociadas a, digamos, un circuito integrado de 16 patas, sólo será necesario dar la coordenada de la primera de las 16 patas y coordenadas. El sistema cuenta con una biblioteca de macros que contiene los patrones de los circuitos integrados más usados. Si el usuario lo desea, puede editar de la misma forma que cualquier otro patrón, los macros que no estén originalmente incluidos en la biblioteca e incorporarlos a ella.

Al entrar al Módulo de Perforado, el usuario deberá declarar el material de que está hecho el impreso para que así se determine una de las dos posibles velocidades angulares a la que trabajará el tala-

Principales características funcionales del sistema desarrollado

- Manejo del sistema con base en menús.
- Perforación de circuitos impresos con base en patrones almacenados en disco.
- Impresión, borrado, renombrado de patrones.
- Creación/modificación de patrones por editor de coordenadas.
- Edición por tabla o cursor.
- Incorporación de macros para facilitar la edición.
- Perforación simultánea de 1 a 4 impresos.
- Optimización (opcional) de trayectoria de perforado.
- Aviso al usuario para cambio de broca.
- Tamaño máximo de impreso de 7x7 pulgadas (actual).
- Velocidades controladas del taladro de 17 000 RPM y 19 000 RPM (modificables con potenciómetros).
- Resolución: 15 micras.
- Precisión: 0.008 pulgadas.

dro. También debe seleccionarse el número de impresos a perforarse simultáneamente, de uno a cuatro. Al iniciar el perforado de los puntos asociados a cada broca, el sistema solicitará al operador que coloque la broca requerida. Si durante el perforado se llega a romper la broca, el sistema lo indicará y el operador tendrá la opción de colocar otra broca del mismo diámetro o abortar el proceso. Desde luego que si se desea perforar un impreso cuyo patrón está asociado a un proceso abortado, el usuario tendrá la opción de realizar el perforado desde el inicio o desde el punto en donde fue previamente abortado. Una vez que se terminó de perforar un impreso, se podrán colocar nuevos impresos y continuar perforándolos de acuerdo al mismo patrón.

Con el objeto de facilitar su migración a otros sistemas, estos programas han sido escritos en lenguaje Pascal. Dado que sobrepasan la capacidad de memoria de la computadora, se ha empleado la técnica de *overlays* (traslape de progra-

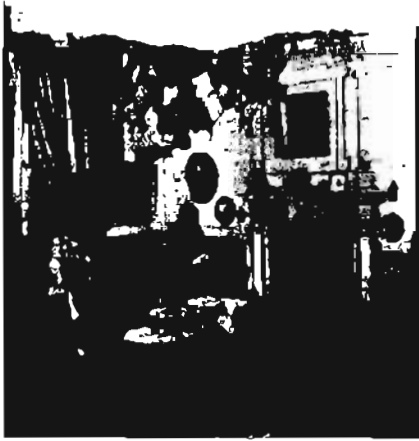
mas en memoria) para que puedan correrse de manera continua.

Sistema mecánico

Este sistema consta básicamente de una mesa con movimiento X-Y y de un taladro con movimiento en Z. El control de posicionado X-Y-Z es hecho directamente por la computadora.

La mesa está hecha de un material rígido (acero) para evitar errores debidos a vibraciones o combamientos. En la actualidad, las dimensiones máximas de la tablilla de circuito impreso están limitadas por el tamaño de la mesa (12 x 12 cm), sin embargo, esta limitación será solucionada en una segunda versión.

En X-Y se tiene una resolución de posicionado de 15 micras y una velocidad que siempre es la máxima posible, de acuerdo a la densidad de perforaciones, separación entre éstas y número de tablillas que sean apiladas para perforarse simultáneamente. En Z, la velocidad de bajada es función del ma-



terial del que está hecha la tablilla a perforar y del diámetro de la broca que se utilice, mientras que la velocidad de giro es función de la dureza del material.

El movimiento X-Y es realizado utilizando tornillos "sin-fin" con un avance de 3 mm acoplados a motores de pasos de 200 pasos/vuelta, lo que da la resolución de 15 micras por paso.

En el eje Z se usa un tornillo de avance de 8.73 mm lo que da una resolución de 0.043 mm, suavizando así la penetración de la broca en la tablilla.

Para el taladro se tienen velocidades de 17 000 revoluciones por minuto (RPM) y 19 000 RPM las cuales se controlan por medio de un circuito de control de fase.

Una fotografía del sistema mecánico se muestra en la figura.

Sistema eléctrico

La función principal de este sistema es la de servir como enlace entre el Sistema de Control y el Sistema Mecánico y consta básicamente de las siguientes partes:

- Fuente de alimentación.
- Circuitos de potencia para los motores de pasos.
- Control de velocidad del taladro.
- Circuitos de detección de broca rota.

La fuente de alimentación es la que suministra energía a todos los demás circuitos de este sistema. Los voltajes que proporciona son +5, +15 y -15 voltios a 5, 1 y 1 Amperios, respectivamente.

Los circuitos de potencia para los motores, reciben los pulsos de control dados por la computadora desde la tablilla de puertos y los convierten a pulsos de corriente, los cuales alimentan cada una de las fases que controlan los motores de pasos.

El control de velocidad del taladro opera con base en un tacómetro, el cual mide la velocidad del taladro por medio de dos dispositivos opto-electrónicos (uno emite luz infrarroja y el otro la detecta): cada vez que la cabeza del taladro da una vuelta emiten un pulso eléctrico que es a su vez alimentado a

un contador de frecuencia, por lo que se tiene una medición exacta de la velocidad de giro del taladro. Esta velocidad es comparada con una de las dos posibles velocidades de referencia con que cuenta el sistema, por lo que si la velocidad real del taladro es diferente a la de referencia, el circuito de control compensará esta diferencia modificando la fase del voltaje de alimentación proporcionada al taladro.

El circuito de detección de broca rota, como su nombre lo indica, se encarga de detectar la ocurrencia de una broca rota cuando se está perforando una tablilla. En ese caso, se genera una señal a la computadora que suspende la ejecución del perforado y pone un mensaje en la pantalla avisando al usuario que debe cambiar la broca.

El proyecto

En febrero de 1985 y a raíz de varias pláticas sostenidas entre los organizadores del proyecto, se elaboró el documento "Sistema para perforación automática de circuitos impresos. Definición de proyecto" en donde se estableció una justificación del mismo, las principales características funcionales con que debía contar el sistema a desarrollarse y un plan de trabajo que se ocupó de tres grupos de actividades que podían llevarse a cabo en forma paralela, dada la índole multidisciplinaria del proyecto: mecánica, de programación y electrónica. El plan de trabajo previó también la participación de un responsable para cada parte, y adicionalmente, un mecánico y un auxiliar para la mecánica, tres auxiliares para la electrónica y nueve progra-



¹ Blanco S. Carlos, "Sistema para perforación automática de circuitos impresos. Definición de Proyecto", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, febrero de 1985.



madores para la de programación. En total, el proyecto contemplaba la participación de 16 personas de tiempo completo. Con estos recursos, el calendario de actividades para obtener un prototipo funcional abarcaba diez meses de trabajo ininterrumpido, equivalente a 160 meses hombre. En cuanto a recursos materiales se presupuestó una erogación de dos millones de pesos, para la compra de una computadora y piezas mecánicas, principalmente.

Al ponerse en marcha el proyecto y como resultado de varios imprevistos, los recursos humanos disponibles se redujeron a medio tiempo de un coordinador para las partes mecánica y eléctrica, a medio tiempo de un mecánico. Como Auxiliar de la parte eléctrica se contaría con la colaboración de un alumno del octavo semestre de la licenciatura en computación, con una carga de tres horas por semana. En relación a la parte de programación, se contaría con dos coordinadores de medio tiempo y ocho alumnos también de octavo semestre de la misma licenciatura y con cargas de trabajo iguales al anterior. En total, se tenía el equi-

valente a 2.7 personas de tiempo completo en vez de las 16 requeridas.

El apoyo económico de la SEP permitiría cubrir satisfactoriamente los gastos planeados.

De febrero a mayo de 1985 se establecieron las especificaciones funcionales de los módulos correspondientes a la parte de programación² en donde quedaban defini-

² Blanco S. Carlos, Fuentes G. Rosa, Jacobo F. José, "Especificación funcional para generador de trayectoria de enlace mínimo entre puntos distribuidos en un plano", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, abril de 1985. Blanco S. Carlos, Fernández C. Guadalupe, Torres C. Sergio, "Especificación funcional para controlador de sistema de perforación automática en base a patrones", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, marzo de 1985. Blanco S. Carlos, Escobedo C. Miguel, Martínez C. Ricardo, "Especificación funcional para posicionador automático de coordenadas X-Y-Z", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, marzo de 1985.

das, en detalle, las características operativas de cada uno de ellos.

De junio a octubre de 1985 se hizo el diseño de los programas y para mayo del siguiente año se terminó su codificación iniciándose entonces las pruebas de cada módulo. A raíz de estas pruebas, se originaron cambios importantes que en algunos casos afectaron hasta el diseño de los mismos. Los programas ya corregidos se tuvieron en octubre, mismas fechas en que se terminó la documentación técnica correspondiente de cada módulo. Las nuevas pruebas se vieron interrumpidas en enero de 1987 debido a desperfectos funcionales en el sistema de cómputo y se reanudaron en marzo. A la fecha, algunos módulos ya no requieren cambios y se tiene su documentación completa.³ Al módulo de posicionado se le incluirá una rutina que permita aumentar la velocidad de giro de los motores de pasos para desplazamientos en X-Y. Con esto se espera conseguir un incremento de 50% a 80% en la cantidad de perforaciones por minuto que realiza el sistema.

Después de terminar las pruebas de los módulos se iniciará la etapa de integración y pruebas finales, posteriormente se elaborará el re-

³ Blanco S. Carlos, Cervantes M. Ana, Ríos G. Fernando, "Generador de trayectoria de enlace mínima entre puntos distribuidos en un plano. Reporte de Proyecto", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, diciembre de 1986. Blanco S. Carlos, Jacobo F. José, Ríos G. Fernando, "Generador de trayectoria de enlace mínima entre puntos distribuidos en un plano. Documentación del Proyecto", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, octubre de 1986. Arenas G. José, *et al.*, "Editor de coordenadas del sistema de perforado de impresos. Reporte de Diseño", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, octubre de 1986.

porte final y la documentación para el usuario. La fecha de terminación estimada para estas actividades es agosto de 1987.

De la parte eléctrica, constituida principalmente por los módulos (control de velocidad del taladro, circuitos de potencia para motores de pasos, fuente de alimentación y detector de broca rota), primero se construyeron los circuitos de potencia para los motores, ya que se tenía un prototipo similar al requerido. En junio de 1985 se realizaron las pruebas a estos circuitos y dado que resultaron satisfactorias se procedió a iniciar el desarrollo de la fuente, el cual por ser muy simple, se terminó en abril de 1986. El desarrollo del control de velocidad del taladro se inició con su especificación funcional⁴ la cual fue concluida en mayo de 1985. De junio a abril de 1986 se llevó a cabo su diseño, construcción y pruebas. Y de mayo a septiembre del mismo año se elaboró el circuito impreso con lo cual se concluyó el desarrollo de este control.

Dado que no se tenía una experiencia adecuada ni el personal originalmente propuesto para desarrollar un sistema mecánico como el especificado en la definición del proyecto, se optó por construir un prototipo pequeño el cual fue terminado en mayo de 1986. Este prototipo, aunque funcional, no inclu-

ye algunos accesorios que permitan un desempeño adecuado del sistema en un medio de trabajo continuo. Principalmente se requiere de la incorporación de un aspirador integrado para recolección de la basura que resulta de cada perforación, y un capelo que cubre la zona de perforado para evitar accidentes. Se planea que estas actividades sean cubiertas hacia julio de 1987.

Una actividad secundaria al proyecto pero que ha tenido un marcado impacto en el mismo ha sido la creación de algunos programas de prueba para perforar patrones de circuito impreso de propósito ge-

tentes. Las nuevas características que se proponen son las siguientes:

- Que el sistema pueda ser conectado a una computadora compatible con la IBM PC.
- Tener la opción de posicionado y edición de patrones por "cursor" usando una cámara y un monitor de video.
- Poder perforar tablas de circuito impreso más grandes, de hasta 14 x 20 pulgadas.

El propósito de poder conectar el sistema a una computadora compatible con la IBM PC es el de ampliar el rango de posibles usuarios, además de hacer más accesible la programación del mismo, ya que



neral como son el de "proto board" y otro para computadora personal "PC" ya que esto ha hecho posible que se maquile, dentro de la institución, una gran cantidad de circuitos impresos que están siendo vendidos a diferentes usuarios.

Nuevo sistema

En los párrafos anteriores se ha hecho una descripción general del sistema de perforado que ha sido desarrollado hasta la fecha; sin embargo, de este sistema se propone hacer una segunda versión, a la cual se incluirán nuevas características o se le mejorarán las ya exis-



⁴ Blanco S. Carlos, Ruiz R. Miguel, "Especificación funcional para control por computadora de velocidad de taladro", Departamento de Semiconductores, ICUAP, Universidad Autónoma de Puebla, mayo de 1985. Blanco S. Carlos, *et al.*, "Sistema para perforación automática de circuitos impresos", Memoria del IV Coloquio de Control Automático, vol. II, pág. 200, CIEA, IPN, septiembre de 1985, México, DF. Blanco S. Carlos, García V. Abdon, Ríos G. Fernando, "Perforadora automática para circuitos impresos", Memoria ELECTRO'85, Sec. VII, pág. 30, Instituto Tecnológico de Chihuahua, noviembre de 1985, Chihuahua, Méx.

en la actualidad este tipo de computadoras son las más utilizadas para todo tipo de aplicaciones, debido a su costo relativamente bajo y su gran versatilidad.

Por lo que respecta a la edición de patrones, en la actualidad se realiza mediante coordenadas, las cuales proporciona el usuario por medio del teclado de la terminal; sin embargo, para tratar de hacer más versátil la creación de los mismos, se propone tener una opción de edición por "cursor" incorporando una cámara y un monitor de video. De esta manera con la ayuda de las teclas de la terminal se posicionará la cámara en el plano X,Y de tal forma que coincidan el centro de la pantalla del monitor, con el centro de cada perforación del patrón; cuando esto se logre, apretando una tecla, se almacenará la coordenada correspondiente a la perforación en forma automática. Para hacer más fácil el centrado del patrón, la imagen del mismo aparecerá ampliada alrededor de treinta veces en el monitor; y para evitar que un punto que ya haya sido insertado se repita, la computadora enviará una señal de inversión de video al monitor cada vez que las coordenadas de una perforación que se quiera insertar, coincidan con las de otra que ya haya sido insertada anteriormente.

Actualmente, el tamaño máximo de tablilla que se puede perforar está limitado a 7x7 pulgadas, lo cual es una desventaja para que pueda ser usado a nivel industrial, por lo tanto se propone que en la nueva versión se tenga la capacidad de perforar tablillas de mayor tamaño, por lo menos de 14x20 pulgadas.

Otras aplicaciones

La ventaja que se tiene al haber construido el sistema de posicionado X,Y,Z, es que se puede utilizar, con ligeras modificaciones en el sis-

tema mecánico, en otro tipo de aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones ya están siendo desarrolladas en el mismo departamento y son las siguientes:

- Fotorrepetidora.
- Probador de dispositivos microelectrónicos en oblea.
- Rayadora de obleas.
- Microsoldadora de circuitos.

Los cuatro sistemas anteriores se utilizan en la fabricación y prueba de dispositivos semiconductores y circuitos integrados (tales como diodos, transistores, etc.).

según sea el caso. En el eje Z se tiene una punta con tinta, la cual se usa para marcar los dispositivos defectuosos. Después que todos los dispositivos de la oblea han sido probados y marcados, se procede a la separación de los mismos, rayando la oblea en la dirección X, después en Y, para así obtener pequeños dados (*chips*), a los cuales posteriormente se le sueldan delgadísimos alambres (de oro o aluminio) por medio de la microsoldadura, para que el dispositivo pueda conectarse a un circuito eléctrico.



La fotorrepetidora se utiliza para repetir, sobre una placa fotográfica, la geometría de los dispositivos a realizar. De tal manera que a partir de un solo patrón o geometría se puedan obtener miles de dispositivos idénticos. Para realizar esta operación se necesita ir moviendo la placa fotográfica en el plano X-Y, mientras que en el eje Z se tiene un sistema óptico, que proporciona la imagen del patrón a repetir.

Para el probador de dispositivos, se tiene que colocar la oblea de silicio (donde están fabricados los dispositivos) en una posición inicial, probar el dispositivo que se encuentra en dicha posición; si está defectuoso se le pone una marca y se mueve la oblea al siguiente dispositivo, en la dirección X o Y

Agradecimientos

En el desarrollo del presente proyecto han colaborado otras personas, además de los autores del presente artículo. En la parte mecánica, los ingenieros Abdón García V. y Eduardo Jasso, y Tizoc Muñoz como auxiliar; en la parte de programación participaron los estudiantes Ricardo Calderón C., Rogelio Castillo A.; en la parte del editor, José Luis Arenas G.; Alberto Luna G., y Salvador Cabrera B., Guadalupe Fernández C. y Sergio Torres C., en la parte del controlador; Rosa Eva Fuentes, José L. Jacobo, Ricardo Martínez y Patricia Cervantes, en la parte del perforado y la optimización; Miguel C. Ruiz, en la parte electrónica.