



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



T E S I S

AUTOMATIZACIÓN DE UNA
MICROMÁQUINA HERRAMIENTA DE
PRIMERA GENERACIÓN

Presenta:

Héctor Hugo Silva López

Para obtener el grado de

Ingeniero Eléctrico Electrónico
(Área Electrónica Analógica)

Dirigida por:

Dr. Alberto Caballero Ruiz
Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Ciudad Universitaria, Septiembre 2005.

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico en la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruiz y el Dr. Leopoldo Ruiz Huerta, con las aportaciones del Dr. Ernst Kussul. Apoyado por CONACYT 39395-U y CONACYT 33944-U.

Agradecimientos.

A mi tío y abuela por todo el apoyo y paciencia brindada durante todos estos años.

A mi padre y madre por su comprensión y entusiasmo en mi desarrollo profesional.

A mi hermanos Iván, Paty y Vero y mis cuñados Mauricio y Urso, por su ánimo y conocimientos proporcionados.

A Angélica por todo su amor, cariño, sabiduría, apoyo y comprensión en los momentos que mas lo necesitabagracias preciosa.

A mis tutores y amigos Alberto, Leopoldo, Gabriel y Graciela por sus consejos, amistad, conocimientos y paciencia durante mi estancia en el Lab.

Al Dr. Kussul y Dra. Baydyk por darme la oportunidad de pertenecer a tan formidable grupo de trabajo, así como por la confianza otorgada.

A mis amigos José, Eugenio, Memo, Paulo y Gengis por su amistad, asesoría y participación en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis demás compañeros y amigos del Lab. Oscar, Paul, Mauricio, Alfredo, Daniela, Bogar, Jaime, etc. por su apoyo, amistad y honestidad en sus opiniones.

A Don Mario por los consejos, ayuda y enseñaza proporcionada en la realización de este proyecto.

A mis sinodales por sus correcciones, comentarios y aportaciones.

ÍNDICE TEMÁTICO.

| | Págs. |
|--|-------|
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO 1. | |
| ANTECEDENTES | 3 |
| Micromecánica en México..... | 5 |
| Desarrollo en el mundo..... | 7 |
| Técnicas de automatización en MMH's..... | 10 |
| Caso de estudio..... | 14 |
| Prototipo Lineal..... | 15 |
| Sistema de control..... | 16 |
| Prototipo de paralelogramos..... | 18 |
| Actuadores..... | 19 |
| CAPITULO 2. | |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 23 |
| Objetivo..... | 25 |
| Alcances..... | 25 |
| CAPITULO 3. | |
| DESARROLLO | 27 |
| Diseño a detalle..... | 28 |
| Etapa de potencia..... | 28 |
| Etapa de protección..... | 33 |
| Control..... | 35 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| Tarjeta de control..... | 38 |
| Proceso de control..... | 39 |
| Rutina de inicialización..... | 39 |
| Atención a interrupción..... | 41 |
| Modalidad LA..... | 43 |
| Modalidad LC..... | 45 |
| Arranque..... | 45 |
| Variación de velocidad..... | 50 |
| Posición de origen..... | 53 |
| Interfaz de usuario..... | 54 |
| Vía de comunicación..... | 58 |
| CAPITULO 4. | |
| PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 62 |
| Señales del hardware electrónico..... | 63 |
| Pruebas a Lazo Abierto (LA)..... | 67 |
| Pruebas a Lazo Cerrado (LC)..... | 69 |
| Temperatura máxima..... | 71 |
| CONCLUSIONES..... | 72 |
| TRABAJO A FUTURO..... | 73 |
| REFERENCIAS..... | 74 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

| | Págs. |
|---|-------|
| <i>Figura 1.</i> La tecnología de los MEMS en microelectrónica..... | 4 |
| <i>Figura 2.</i> Duodenofibroscopio | 6 |
| <i>Figura 3.</i> Manipulación celular | 6 |
| <i>Figura 4.</i> Micropartes producidas en el LMM..... | 6 |
| <i>Figura 5.</i> Manipulador desarrollado en el LMM | 7 |
| <i>Figura 6.</i> Microtorno japonés | 8 |
| <i>Figura 7.</i> Microfábrica de mesa..... | 8 |
| <i>Figura 8.</i> Primer prototipo de microcentro de maquinado | 9 |
| <i>Figura 9.</i> MMH's desarrolladas en el LMM, CCADET | 9 |
| <i>Figura 10.</i> Variedad de encapsulados electrónicos | 10 |
| <i>Tabla 1.1.</i> Cuadro descriptivo de diferentes sistemas de control en Micromecánica..... | 11 |
| <i>Figura 11.</i> Microfábrica sobre mesa..... | 13 |
| <i>Figura 12.</i> . Prototipo lineal de microcentro de maquinado..... | 13 |
| <i>Figura 13.</i> Sistema automático de microperforación..... | 13 |
| <i>Figura 14.</i> Esquema de una microfábrica | 14 |
| <i>Tabla 1.2.</i> Descripción del microcentro de maquinado..... | 15 |
| <i>Figura 15.</i> Vista frontal del primer prototipo de MMH | 16 |
| <i>Figura 16.</i> Vista posterior del primer prototipo de MMH | 16 |
| <i>Figura 17.</i> Etapa de potencia | 17 |
| <i>Figura 18.</i> Sistema de control..... | 17 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 19.</i> Segundo prototipo de MMH..... | 18 |
| <i>Tabla 1.3.</i> Ventajas y desventajas de los actuadores..... | 20 |
| <i>Tabla 1.4.</i> Tipos de motores a pasos..... | 21 |
| <i>Figura 20.1.</i> MPAP de imán permanente bipolares | 22 |
| <i>Figura 20.2.</i> Motor de pasos construido en el LMM | 22 |
| <i>Figura 21.</i> Diseño conceptual del sistema de control propuesto..... | 28 |
| <i>Figura 22.</i> Sistema de potencia | 29 |
| <i>Tabla 3.1.</i> Señales requeridas y generadas por el L297..... | 30 |
| <i>Figura 23.</i> Técnica de tejido con alambre magneto | 30 |
| <i>Figura 24.</i> Secuencia de paso completo..... | 31 |
| <i>Figura 25.</i> Secuencia de half-step..... | 31 |
| <i>Ecuación 3.1.</i> Frecuencia de oscilación del chopper..... | 31 |
| <i>Figura 26.</i> Circuito chopper | 32 |
| <i>Figura 27.</i> Representación interna del L298N | 33 |
| <i>Figura 28.</i> Tarjeta de protección | 34 |
| <i>Figura 29.</i> Conexión interna del optoacoplador PC847..... | 34 |
| <i>Tabla 3.2.</i> Investigación de alternativas de control..... | 36 |
| <i>Tabla 3.3.</i> Opciones de microcontroladores PIC gama alta..... | 37 |
| <i>Tabla 3.4.</i> Características del microcontrolador PIC alternativo..... | 37 |
| <i>Figura 30.</i> PIC16F877(izquierda-PLCC), PIC18F8720(centro-SMD)..... | 38 |
| <i>Figura 31.</i> Tarjeta de control implementada | 39 |
| <i>Figura 32.</i> Trama de carácter | 40 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 33.</i> Rutina de inicialización | 40 |
| <i>Tabla 3.5.</i> Entradas y salidas de los puertos del PIC..... | 40 |
| <i>Tabla 3.6.</i> Parámetros asociados a la variable MSM..... | 41 |
| <i>Figura 34.</i> Tratamiento de interrupción..... | 42 |
| <i>Ecuación 3.2.</i> Expresión para calcular el tiempo en el TMR0..... | 43 |
| <i>Ecuación 3.3.</i> Expresión para calcular el valor del TMR0..... | 43 |
| <i>Figura 35.</i> Diagrama de flujo para LA | 44 |
| <i>Figura 36.</i> Tarjeta acoplada a la transmisión..... | 46 |
| <i>Figura 37.</i> Optosensores y disco ranurado (encoder)..... | 46 |
| <i>Figura 38.</i> Geometría del encoder | 47 |
| <i>Figura 39.</i> Circuito de sensado | 47 |
| <i>Figura 40.</i> Detector de flancos..... | 48 |
| <i>Figura 41.</i> Diagrama de flujo para LC | 49 |
| <i>Tabla 3.7.</i> Especificaciones técnicas del LM317HVK..... | 50 |
| <i>Figura 42.</i> Esquema de fuente variable con el LM317..... | 51 |
| <i>Tabla 3.8.</i> Valores de resistencias comerciales usadas..... | 51 |
| <i>Tabla 3.9.</i> Niveles de voltaje proporcionados por la fuente..... | 52 |
| <i>Figura 43.</i> Diagrama de flujo para posición de origen..... | 53 |
| <i>Figura 44.</i> Diagrama de flujo para posición de origen | 54 |
| <i>Figura 45.</i> Página de inicio | 55 |
| <i>Figura 46.</i> MMH a controlar | 55 |
| <i>Figura 47.</i> Modalidad de funcionamiento | 56 |
| <i>Figura 48.</i> Funcionamiento por joystick..... | 56 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 49.</i> Diagrama de flujo para la interfaz de usuario..... | 57 |
| <i>Figura 50.</i> Diagrama de flujo para la interfaz de usuario | 58 |
| <i>Figura 51.</i> Cable para comunicación serial | 59 |
| <i>Tabla 3.10.</i> Caracteres generados por la interfaz..... | 60 |
| <i>Figura 52.</i> Circuito MAX232 y conector DB9..... | 61 |
| <i>Figura 53.</i> Tren de pulsos generado por el microcontrolador PIC..... | 63 |
| <i>Figura 54.</i> Salidas del L297 y L298N..... | 64 |
| <i>Figura 55.</i> Salidas del L297 y el reloj del sistema..... | 64 |
| <i>Figura 56.</i> Salidas del L298N y el reloj del sistema..... | 65 |
| <i>Figura 57.</i> Salida de optosensores | 66 |
| <i>Figura 58.</i> Salidas de optosensores y detector de flancos..... | 66 |
| <i>Figura 59.</i> Reloj PIC, salidas de optosensores y detector de Flancos..... | 67 |
| <i>Figura 60.</i> Rango de velocidad a LA del husillo (prototipo lineal)..... | 68 |
| <i>Figura 61</i> Rango de velocidad a LA del eje Y (prototipo lineal)..... | 68 |
| <i>Figura 62.</i> Rango de velocidad a LA del eje X (prototipo de paralelogramos)..... | 69 |
| <i>Figura 63.</i> Sistema de pruebas para segundo prototipo de MMH..... | 70 |
| <i>Figura 64.</i> Rango de velocidad a LC del eje X (prototipo de paralelogramos)..... | 70 |

INTRODUCCIÓN.

La robótica, la mecatrónica, y la inteligencia artificial son palabras que se han vuelto muy populares en estos días, sin embargo sus definiciones siguen siendo dinámicas. La idea de que sistemas mecánicos automatizados puedan resolver un gran porcentaje de todas nuestras actividades y trabajar incesantemente sin protestas, fatigas, ni distracciones, ha sido explorada profundamente por diversos autores de ciencia ficción. En realidad, estos campos y muchos otros más, como es el caso de la micromecánica, han dejado de ser temas de fantasía para pasar a formar parte de nuestra vida diaria.

Lo anterior nos ha llevado a desarrollar sistemas cada vez más compactos de alta eficiencia, bajo consumo energético y de dimensiones reducidas. De tal forma, el desarrollo de microsistemas se ha convertido en uno de los principales objetivos de los institutos y centros de investigación a nivel mundial. Los resultados que se pueden obtener con estas investigaciones en un futuro, no muy lejano, representan un enorme paso en el desarrollo de la humanidad, así como el amplio rango de aplicaciones que se les pueda dar.

Así pues, el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM), dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ha desarrollado y probado algunos prototipos correspondientes a una nueva tecnología en la producción de micropartes, basada principalmente en micromáquinas herramienta (MMH's) y dispositivos de microensamble generacionales, donde cada siguiente generación es desarrollada con la ayuda de la generación anterior.

A continuación se presenta un trabajo que propone la implementación de una alternativa tecnológica para la automatización de dichos prototipos (MMH's), y con la cual se sienta la base para automatizar una microfábrica sobre mesa.

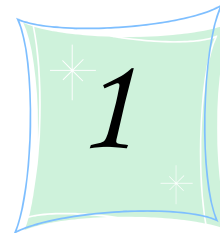
El contenido de este trabajo se desglosa en cuatro capítulos. El *capítulo 1* trata los antecedentes correspondientes al campo dentro del cual se genera el proyecto y el sistema de control actual, así como historia y técnicas de automatización que predominan en este campo.

Dentro del *capítulo 2* se plantean las necesidades a satisfacer, así como objetivos y alcances del trabajo propuesto. Mientras que en el *capítulo 3* se describe el desarrollo del sistema con la alternativa propuesta mediante un enfoque conceptual, evaluación y diseño a detalle.

En el *capítulo 4* se presentan las pruebas realizadas al sistema propuesto implementado en las MMH's, y se reportan los resultados obtenidos de éstas pruebas.

Por último se tiene una sección de conclusiones y trabajo a futuro en la cual se pretende calificar los logros alcanzados con este trabajo, y por supuesto, proponer mejoras al sistema desarrollado con base a la experiencia obtenida.

Capítulo



ANTECEDENTES.

La micromecánica se ha convertido en los últimos 25 años en un importante campo de estudio. Esto se debe en gran medida a la necesidad de generar sistemas compactos de alta eficiencia, bajo consumo de espacio y consumo energético aminorado[28].

Actualmente, en el mundo se desarrollan tecnologías para la miniaturización de sistemas, ejemplo de estas tecnologías son los *MicroElectroMechanical Systems* (MEMS), desarrollados principalmente en los Estados Unidos de Norteamérica; los *MicroSystem Technology* (MST), cuyo mayor auge está en los países europeos; y por último los *MicroMachine Technology* (MMT), en Japón. Estas tecnologías se basan substancialmente en técnicas empleadas para la construcción de circuitos integrados de tecnología serie o por lotes para crear microelectrónica[3].

La tecnología empleada en microelectrónica, permite crear dispositivos de bajas dimensiones con componentes mecánicos simples, sin embargo estos dispositivos poseen prácticamente dos dimensiones debido a su bajo espesor (*figura 1*). Los materiales principalmente usados en esta tecnología son: Silicio, óxido de Silicio, películas de metales (principalmente Aluminio), y materiales piezoeléctricos (como los cristales de Cuarzo)[3].

Durante la época de los 80's surgen varias propuestas para desarrollar sistemas productivos con la finalidad de generar dispositivos con dimensiones menores a un milímetro, dichos microdispositivos debían estar conformados tanto por partes microelectrónicas, como por partes micromecánicas[28].

En el caso de las partes microelectrónicas no existían inconvenientes para generarlas, puesto que desde aquel tiempo ya se tenían avances significativos en el desarrollo de circuitos integrados. Por otro lado, el desarrollo de partes micromecánicas representaba un desafío importante

para los investigadores de la época debido a que, en ese entonces, no existían tecnologías mecánicas para desarrollar piezas y mecanismos tan pequeños como los requeridos. Los desarrollos de componentes mecánicos de ese entonces se manufacturaban con máquinas herramienta de tamaño convencional, con tales dimensiones de equipo, su falta de preparación para absorber errores inherentes al nuevo tamaño de piezas deseadas; y la carencia de herramienta proporcional a las nuevas especificaciones, era complicado obtener nuevos productos. Por lo antes expuesto, fue necesario desarrollar tecnologías capaces de producir piezas con dimensiones de milímetro o menores[28].

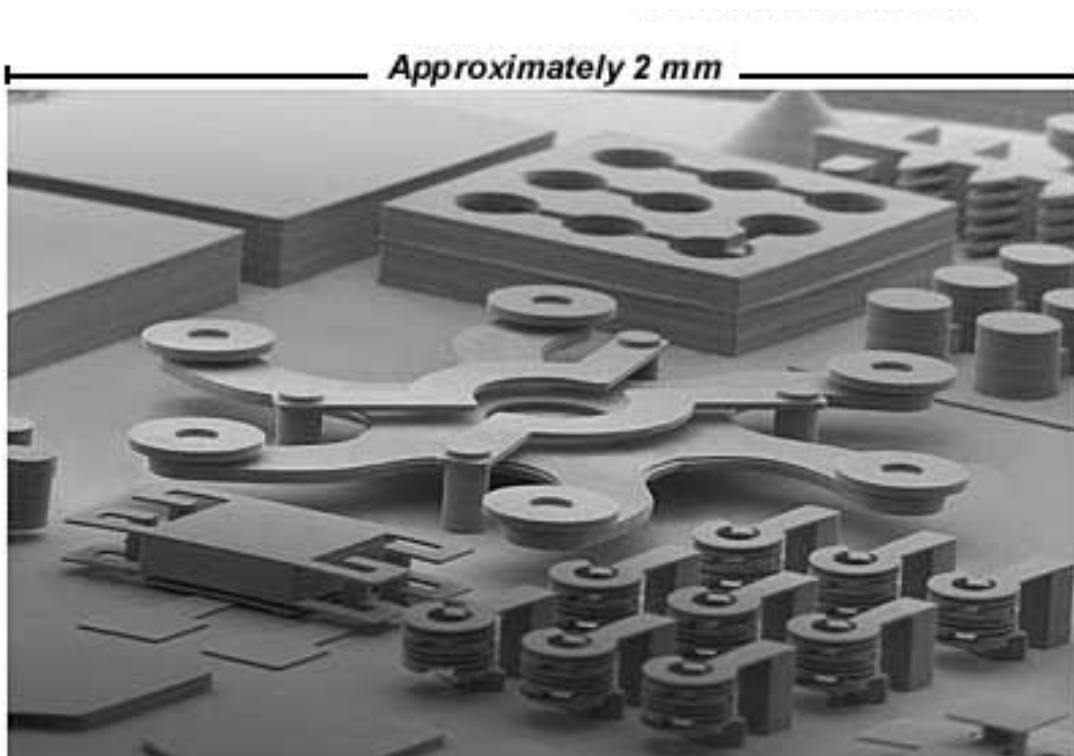


Figura 1. La tecnología de los MEMS en microelectrónica [21]

Por estas razones, los investigadores de muchos países buscan tecnologías alternativas para la producción de dispositivos micromecánicos[28]. En éstos últimos, cuando deseamos obtener las tolerancias requeridas, se tienen dos alternativas: la primera de ellas consiste en utilizar MMH's superprecisas[29], sin embargo el costo de esta opción es elevado. La segunda alternativa consiste en disminuir el tamaño de las MMH's y manipuladores involucrados en el proceso de producción de microdispositivos, con esta opción es posible lograr bajos costos en la producción de dispositivos comerciales[28].

MICROMECHANICA EN MÉXICO.

Debido a la necesidad por desarrollar microequipo a nivel mundial, en México, el LMM se ha esforzado por llevar a cabo una nueva tecnología en la producción de micropartes (*figura 4*), basada principalmente en MMH's y dispositivos de microensamble, de los cuales se comprobó que la precisión del equipo producido se incrementó en forma proporcional con la disminución de dimensiones, por lo que se propone fabricar microequipo a través de una serie de generaciones de MMH's las cuales vayan decreciendo gradualmente en sus dimensiones[31][32].

De tal forma, el LMM se apega a las siguientes definiciones: una MMH es un sistemas extremadamente pequeño (pocos milímetros o menos), con elementos altamente sofisticados y funcionales que le permiten realizar tareas complicadas y delicadas [Dr. J. Lee, 1996]. Cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales extremadamente pequeñas en un rango de tamaño de 1 a 5mm es llamado MMH [Iwao Fijimasa, 1997]. Esta claro que las definiciones anteriores no solo están basadas en el tamaño de la máquina, sino también en el tamaño de sus componentes y, ampliando la definición, en el tamaño de las piezas fabricadas por ésta[3].

Bajo este contexto, la idea de microfábricas aparece de manera natural (conformadas de 13 a 16 grados de libertad), las que por definición cuentan con unidades de proceso, ensamble, control de calidad, transporte, mantenimiento, entre otras. De tal forma, el desarrollo de microfábricas resulta un buen camino para la producción de pequeños dispositivos reduciendo el consumo de recursos, tales como energía, materiales y espacio de trabajo[28].

Un ejemplo claro de la necesidad de microequipo, se encuentra en el campo médico, con aplicaciones en microscopía, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco agresivas, tratamientos[5], etc. La importancia de realizar micromecánica, aunado con el desarrollo de otros campos de la ingeniería, recae en la reducción de dimensiones en ciertos dispositivos con los cuales podemos inspeccionar las partes internas del cuerpo humano (*figura 2 y 3*), eludiendo posibles daños que se podrían generar a éste, elevando la precisión y la eficiencia en diagnósticos[4].

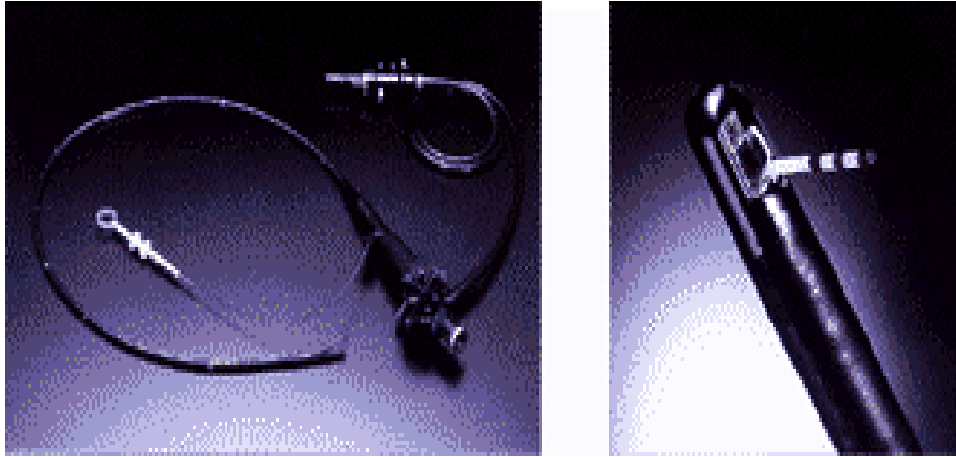


Figura 2. DuodenofibroscoPIO comercializado por Olympus.

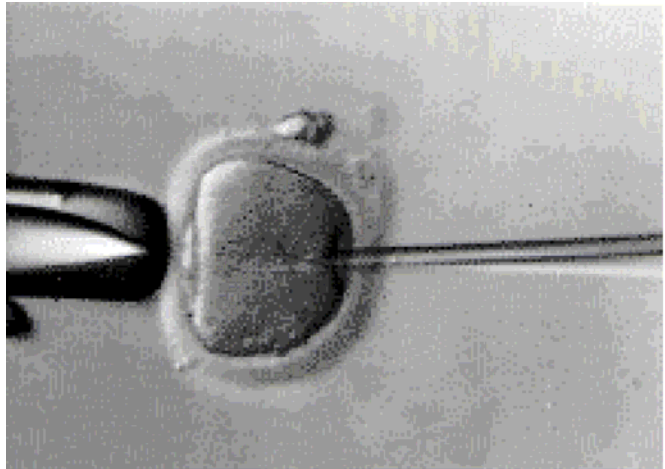


Figura 3. Manipulación celular [22].



Figura 4. Micropartes producidas en el LMM.

Así pues, las MMH's y micromanipuladores (*figura 5*) de la primera generación tienen medidas entre 120 y 300 mm y pueden ser producidas con equipo mecánico convencional (tornos, fresadoras, taladros etc.); mientras tanto, las MMH's y micromanipuladores de segunda generación pueden tener medidas entre 50 y 80 mm y deben ser producidas con el microequipo de la primera generación. De tal forma, se deduce que las generaciones siguientes deben estar conformadas por equipo más pequeño que el equipo de la generación anterior, y todos los microdispositivos deben ser controlados automáticamente por medio de una computadora, hasta llegar al punto de crear una microfábrica sobre mesa, que contenga una gran cantidad de microsistemas [20].

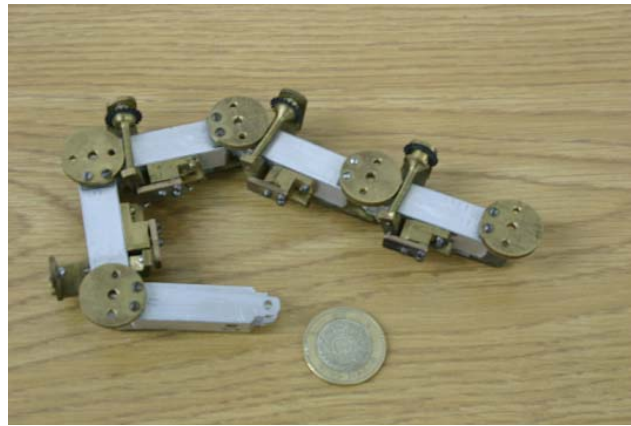


Figura 5. Manipulador desarrollado en el LMM.

DESARROLLO EN EL MUNDO.

Existen antecedentes importantes en el ámbito de las MMH's, tal es el caso del microtorno japonés (*figura 6*) que fue desarrollado en 1996 en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica (MEL), y que representa una de las piezas fundamentales en la integración de una microfábrica sobre mesa. El concepto de microfábrica aparece en Japón alrededor de 1990, y la definición básica se refiere a un sistema de producción cuyos componentes son de dimensiones reducidas (mm) y convenientemente destinados a la fabricación de micropartes[6].

De tal forma, la investigación para el desarrollo de una microfábrica como un sistema total de producción comienza en Japón en 1993, declarándose como proyecto nacional, y en Octubre de 1999 anuncian el primer prototipo correspondiente a un sistema que incorpora los procesos de maquinado, transportación, y ensamble (*figura 7*). Este prototipo consiste en MMH's con funciones de torno, fresado, prensado y máquinas de ensamble tales como un brazo transportador y una mano de dos dedos para la manipulación de piezas.



Figura 6. Microtorno japonés[22].

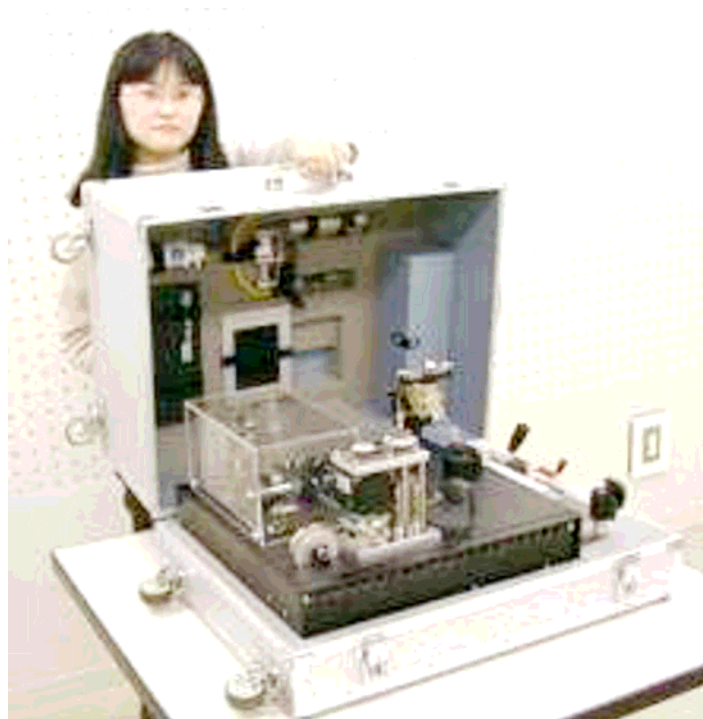


Figura 7. Microfábrica de mesa[22].

Otros países como Ucrania, interesados en el tema, desarrollaron en 1997 el primer prototipo de microcentro de maquinado en el Internacional Research and Training Center of Information Technology Systems. Este presentaba movimientos aproximados de 2.54cm, por eje, y una resolución de $1\mu\text{m}$; sin embargo este prototipo reportó fallas de rigidez [33] (*figura 8*).

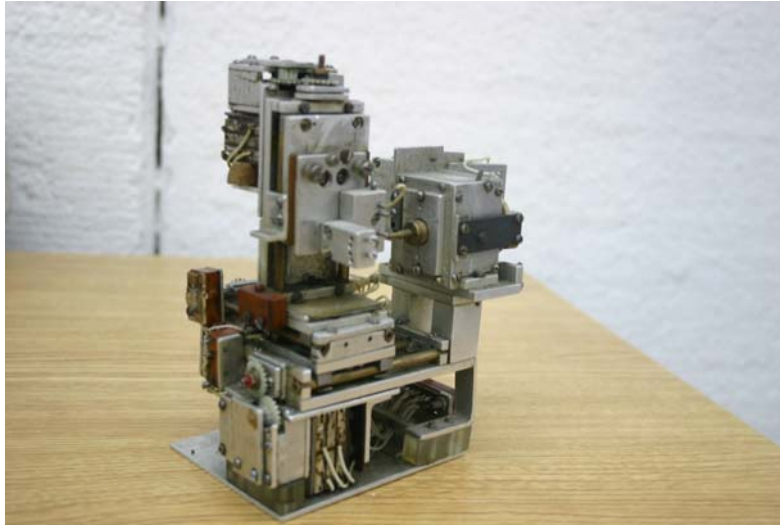


Figura 8. Primer prototipo de microcentro de maquinado desarrollado en Ucrania[31].

Debido al enorme interés acerca del tema, en el LMM se diseñaron y manufacturaron dos prototipos de MMH's (*figura 9a y 9b*), junto con manipuladores y sistemas de visión para poder observar, localizar, reconocer e identificar micropiezas para su manipulación.

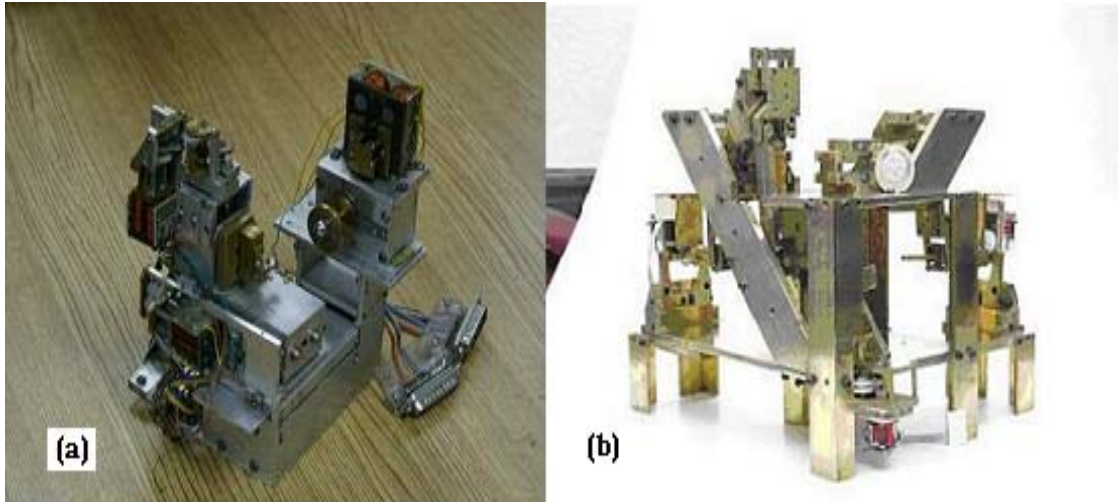


Figura 9. MMH's desarrolladas en el LMM dentro del CCADET.

a) Prototipo lineal b) Prototipo de paralelogramos.

Antes de profundizar más en las características de los dos prototipos desarrollados en el LMM, analizaremos las técnicas de automatización más empleadas en el control de microequipo mecánico.

TÉCNICAS DE AUTOMATIZACIÓN EN MMH's.

Los sistemas mecánicos existentes en el campo de la micromecánica, tienen como prioridad la exactitud y precisión en sus movimientos, más allá de realizar tareas repetitivas. Es por eso que el proceso de automatización deberá consistir, principalmente, en diseñar sistemas capaces de ejecutar tareas repetitivas hechas por los hombres, y capaces de controlar algunas situaciones sin la ayuda de un operador humano. El término automatización también se utiliza para describir a los sistemas programables que pueden operar independientemente del control humano[8].

Así pues, la automatización juega un papel muy importante en el proceso de microfabricación, y tomando en cuenta el tremendo desarrollo que han sufrido las técnicas de control con el advenimiento de la microelectrónica, tecnología basada en los chips de silicio (*figura 10*), actualmente es posible generar sistemas de control, cada vez más pequeños, eficientes, sencillos y económicos a largo plazo.

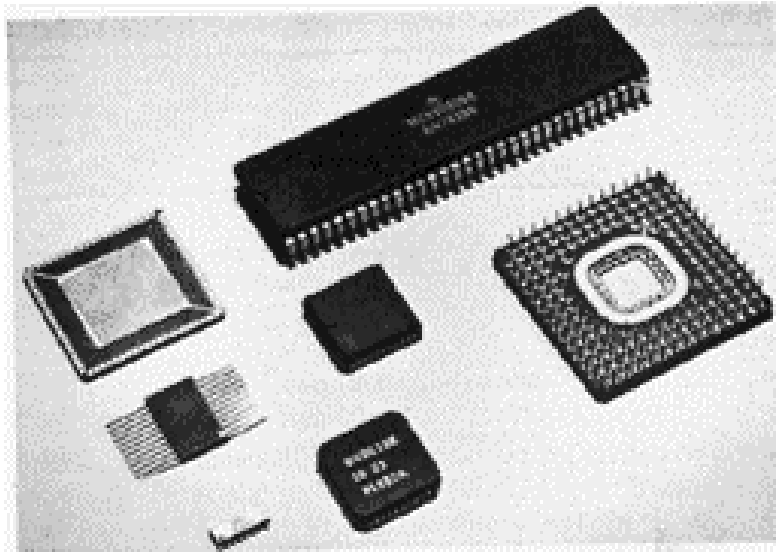


Figura 10. Variedad de encapsulados electrónicos [21].

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación comparativa, la cual se resume en *tabla 1.1*. En ésta se mencionan las características de mayor importancia de algunos sistemas de control, los más sobresalientes en el campo de las MMH's, dispositivos de microensamble y medición de microcomponentes. Así mismo, se mencionan las ventajas y desventajas de los componentes utilizados por estos microsistemas.

| Equipo | Características | Ventajas | Desventajas |
|--|---|--|--|
| <p>Microfábrica japonesa Figura 11.</p> <p>(Makoto Tanaka. Laboratorio de Ingeniería Mecánica, Agencia Industrial de Ciencia y Tecnología. Japón) [6]</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas de maquinado y ensamble. • Conformado por varias MMH's. • Ejecuta tareas de fresado, prensado, taladrado y de transporte. • Utiliza sistema de sin-fin con actuadores piezoeléctricos. • Movimiento detectado por encoders lineales. • Utiliza control a Lazo Cerrado. • Se opera con 2 joysticks y un interruptor. | <ul style="list-style-type: none"> • Se logran cambios de posición finos (nm). • Alta linealidad y amplia estabilidad de posición. • Con el Lazo Cerrado se obtiene precisión y grandes aceleraciones para cargas variables. • Diseño compacto y ligero reduciendo el consumo de energía. | <ul style="list-style-type: none"> • Cambios térmicos causan desviaciones nm. • Sistemas a Lazo Cerrado son complejos, costosos y propensos a descomposturas. • Componentes mecánicos y electrónicos construidos por otra empresa. • En caso de Descompostura, los componentes no son comerciales. |
| <p>Sistema de Microtorneado para microfábricas. Figura 6.</p> <p>(Sumio Ito, Daisuke Iijima, Akira Hayashi, Hisayuki Aoyama y Masashi Yamanaka) [9]</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Base de dos ejes (X y Z). • Sistema de rodillo transversal para el deslizamiento. • Motores con una resolución en el encoder de 1024 pulsos por revolución. • Se utiliza Lazo Cerrado para retroalimentar la señal del encoder. • Sistema de control formado por un driver, controlador, sensores amplificadores, una fuente de DC, una PC y un programa de NC. | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de deslizamiento con alta rigidez, y no requiere extrema potencia como otros (aire y aceite). • Se trabajan materiales como latón, aluminio, acero y acero inoxidable. • La tracción del husillo produce menos vibraciones. • La conjunción de encoders y sensores ópticos provee una generación fácil de pulsos eléctricos, y después de movimiento y dirección. | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de control basado enteramente en una PC con CNC. • Los encoders incrementales requieren un ajuste de origen al iniciar su operación, debido a la pérdida de energía que no permite guardar la última posición. • Costo elevado de cada uno de los componentes tanto mecánicos como ópticos (motores, sistemas de deslizamiento, encoders, etc.). |
| <p>Sistema de medición para formas 3D y micro-componentes.</p> <p>(Kimiyuki Mitsui, Tosía Shiramatsu y Masayoshi Kawada. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Keio, Japón) [10]</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Estructura de tres plataformas de precisión (X, Y y Z) y una rotacional (θ). • Las plataformas tienen encoders lineales y uno angular. • El control de las plataformas es por PC a través de una interfase GP-IB. • La plataforma Z está compuesta de bisagras flexibles con actuadores piezoeléctricos para | <ul style="list-style-type: none"> • Mínimo ruido (15nm) producido por el desplazamiento del piezoeléctrico usado. • Los actuadores ofrecen grandes fuerzas, expansión rápida (μs), ningún efecto magnético, bajo consumo y libre de desgastes. • La aguja hace Mediciones en nm debido al control que proporcionan los actuadores | <ul style="list-style-type: none"> • Los encoders lineales, necesitan un ajuste de origen al iniciar su operación. • La resolución del encoder está en función del material del disco (el metal no es apropiado para altas resoluciones). • Los discos de plástico sirven para altas resoluciones, pero son costosos por el tratamiento químico que reciben. • El costo de los |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | <p>detectar las piezas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los desplazamientos de las bisagras son medidos por transductores de gran precisión. | <p>piezoeléctricos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los encoders absolutos (rotativos) proporcionan una combinación única de señales para cada posición física. • Se logra prescindir del contador. | <p>encoders absolutos es elevado y tiene conexiones eléctricas complicadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los actuadores piezoeléctricos en Lazo Abierto producen histéresis y efecto creep. |
| <p>1er. Prototipo de Micro-centro de maquinado. Figura 12.</p> <p>(Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico-UNAM) [3]</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Los actuadores empleados son motores de pasos. • Sistema de control basado en una PC y una interfaz computacional (Borland C++). • Sistema de potencia basado en un amplificador de DC de 16 canales y 4 acondicionadores de señal para los sensores de contacto. El control es a Lazo Abierto (LA). | <ul style="list-style-type: none"> • El microprocesador de la computadora reduce la circuitería externa, al CPU. • Los sistemas de Lazo Abierto son sencillos, de bajo costo, y su confiabilidad es buena. • El costo es mínimo debido a que los componentes fueron diseñados y contruidos en el LMM. • Los elementos del centro del maquinado son comerciales. | <ul style="list-style-type: none"> • Dependencia total de la PC, saturando los recursos de la computadora e impidiendo realizar otra tarea en ella. • Con este tipo de control no se pueden alcanzar grandes aceleraciones. • El acoplamiento de todas las piezas es manual, produciendo errores en el proceso del maquinado. • Efectos térmicos debido a que no existe homogeneidad en los materiales empleados. • Uso de dos puertos LPT, originando dificultades para controlar más de un centro de maquinado. |
| <p>Sistema automático de microperforación operado por múltiples micro-robots. Figura 13.</p> <p>(Tokuji Kuronita y Shigeru Tadokoro, Hisayuki Aoyama. Universidad de Electro-Comunicaciones. Tokio, Japón. Noviembre 2001) [11]</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema compuesto por 3 micro-robots. • Robots conformados por engranes dentados, piezo-elementos, electromagnetos, reflectores ópticos en los ejes, un motor de DC y un micro-taladro de 500 a 50μm de diámetro, así como engranes de reducción. • Sistema de control con cámaras CCD incorporadas y varias PC's para el monitoreo de diversas tareas. | <ul style="list-style-type: none"> • Los motores de DC son buenos para los procesos de rotación. • La utilización de engranes reduce el problema de estabilización. • Los motores de DC son comercialmente viables. • Fácil detección de los problemas debido al monitoreo de las diferentes PC's. | <ul style="list-style-type: none"> • Los motores de DC son difíciles de posicionar de manera precisa. • Estabilización lenta debido a las curvas de desaceleración y aceleración. • Los motores de DC no generan buenos torques a bajas velocidades. • El sistema de control compuesto por varias PC's más la circuitería electrónica, lo hace bastante extenso y muy complejo por todos los campos abarcados. |

Tabla 1.1. Cuadro descriptivo de diferentes sistemas de control en micromecánica.

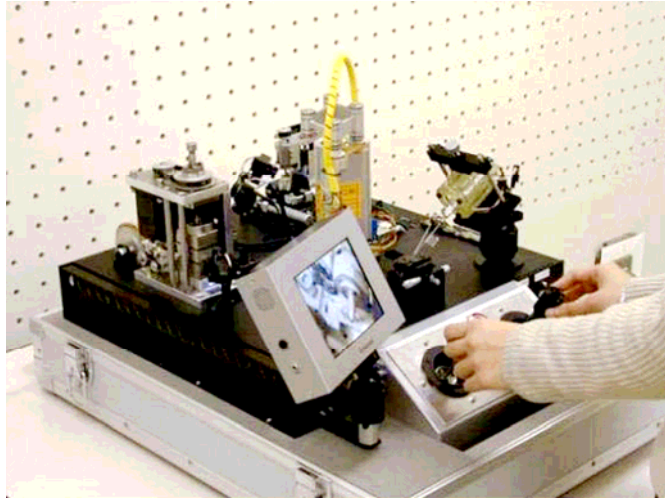


Figura 11. Microfábrica sobre mesa [23].

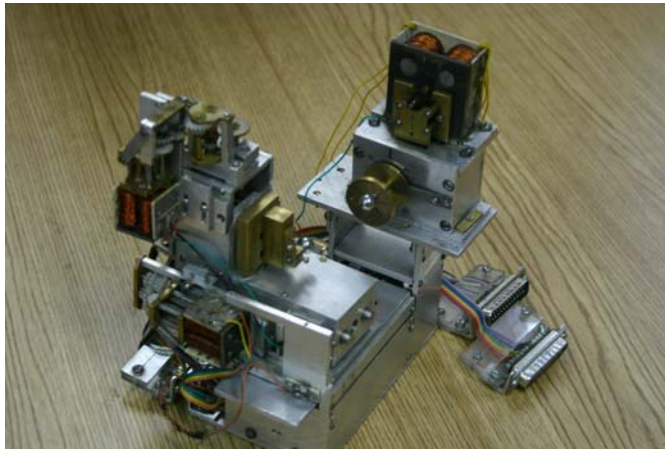
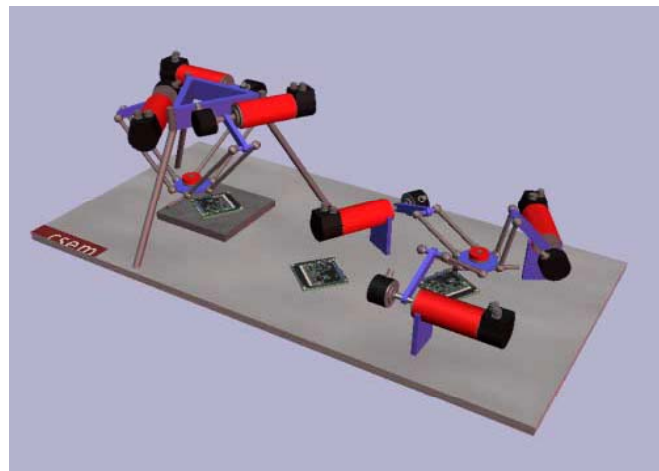


Figura 12. Prototipo lineal de microcentro de maquinado[24][31].



*Figura 13. Sistema automático de microperforación
Operado por múltiples micro-robots.*

Como se pudo ver en el cuadro anterior, el prototipo fabricado en el LMM tiene la gran ventaja, respecto a los demás, de que el costo de sus componentes es mínimo, el costo en materiales fue de aproximadamente \$100usd, mientras que el tiempo efectivo de trabajo invertido por tres académicos fue de aproximadamente 1000 horas[28]. Además, los componentes pueden ser fácilmente reparados o reemplazados comercialmente, esto es gracias a que el primer y segundo prototipo fueron manufacturados en el LMM, reduciendo en gran medida los costos de producción.

CASO DE ESTUDIO.

Adentrándonos un poco más en nuestro caso de estudio, veremos las características generales de los prototipos a controlar (*figura 9a y 9b*). Estos primeros prototipos, que forman parte de una de las líneas de investigación dentro del LMM, tienen como finalidad conformar una microfábrica sobre mesa (*figura 14*), que junto con micromanipuladores, permitan la generación de tecnología de punta para la fabricación de micropiezas (dimensiones inferiores al milímetro), e instrumentación de bajo costo y alta eficiencia[3].



Figura 14. Esquema de una microfábrica[25].

Prototipo lineal.

El prototipo lineal de MMH, correspondiente a la primera generación, cuenta con las siguientes características:

- Operación como torno, fresadora y taladro. El tipo de trabajo depende de la herramienta empleada y de la configuración en la que trabaje el equipo.
- Tiene dimensiones aproximadas de 130x160x85 (mm³).
- Cuenta con cuatro grados de libertad (tres de traslación y uno rotacional).
- Resolución de 1.87(μm) por eje.
- Capacidad para producir piezas dentro del rango de 100(μm) a 5(mm).
- Sistema de movimiento basado en guías instaladas en un carro previo.
- Los actuadores empleados para proporcionar el movimiento lineal, tanto en los carros como en el sistema de sujeción son MPAP auxiliados mediante cajas de engranes con una relación de 84.7:1[3].

Los principales componentes se enuncian en la *tabla 1.2*, y se observan en las *figuras 15 y 16*. El diseño detallado de este prototipo es mostrado en la tesis “Diseño y construcción de un microcentro de bajo costo” [Ruiz, 2000].

| Número(s) | Descripción |
|-----------|--|
| 1 | Bastidor sobre el que están montadas tres guías. |
| 2, 4 y 6 | Guías que soportan tres carros. |
| 3, 5 y 7 | Esquema secuencial de carros. |
| 10 | Sistema de sujeción de piezas. |
| 11 | Caja de reducción de engranes. |
| 8 y 9 | Motores de pasos (2 de 4). |
| 12 | Portaherramientas. |
| 13 | Puerto DB25. |
| 14 | Sensores de contacto (push boton) |

Tabla 1.2. Descripción estructural del microcentro de maquinado.

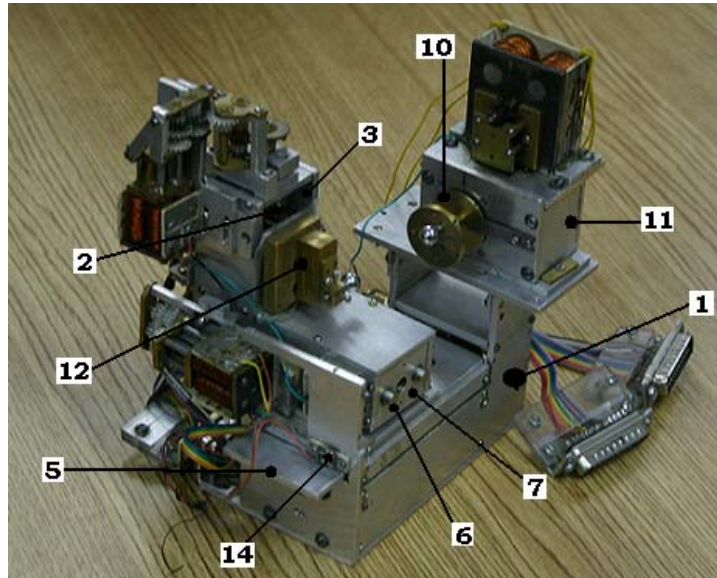


Figura 15. Vista frontal del primer prototipo de MMH.

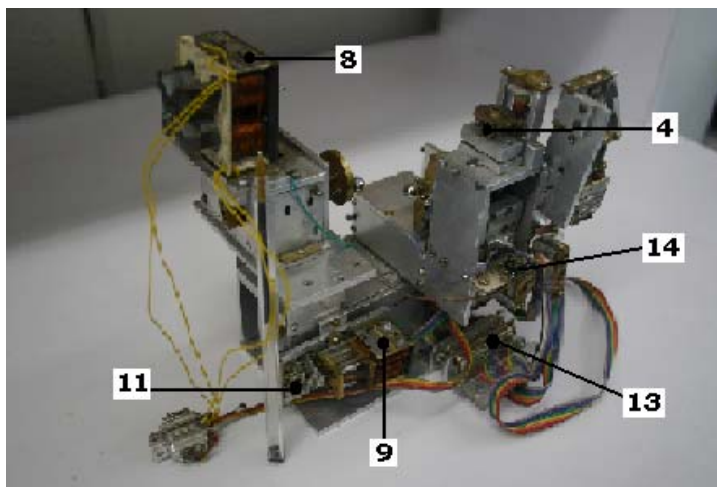


Figura 16. Vista posterior del primer prototipo de MMH.

Sistema de control.

En cuanto al sistema de control actual de este prototipo, se caracteriza por tener la posibilidad de emplear una computadora personal (PC) para su control, y eliminar en la medida de lo posible el hardware de control externo, para esto cuenta con un software capaz de operar en un sistema Pentium con 32Mb en memoria RAM[3].

El único hardware de control externo esta integrado por un amplificador de DC de 16 canales (*figura 17*), y cuatro acondicionadores de señal para los sensores utilizados (de contacto) al inicio de cada uno de los ejes, los cuales determinan la posición de origen (*HOME*) de la MMH en cuestión[3].

Además, este microcentro de maquinado cuenta con un conector, de naturaleza DB25, que contiene las conexiones a los motores de pasos y a sensores de contacto y la alimentación de la MMH es con 12V. Las señales provenientes del sistema son registradas por la PC a través de sus dos puertos paralelos, que se encuentran divididos en tres secciones (*figura 18*).

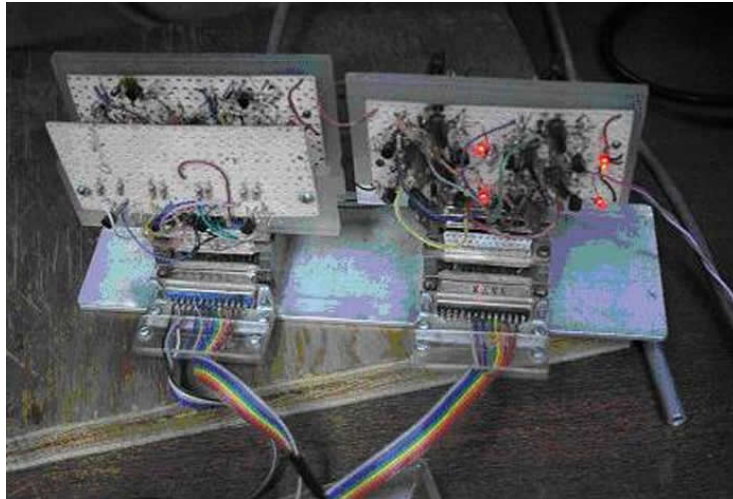


Figura 17. Etapa de potencia del 1er. Prototipo de MMH del LMM.

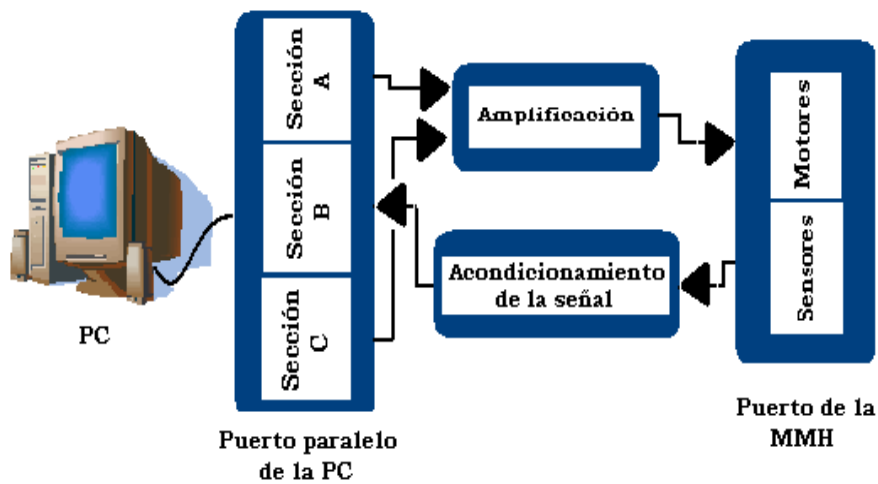


Figura 18. Sistema de control de microcentro de maquinado de bajo costo.

El estado de cada uno de los motores es determinado por los datos que se encuentran en la sección A y C de uno de dos puertos paralelos de la PC que se están utilizando. Para simplificar el sistema de control de los motores de pasos, estos trabajan únicamente en modo de lazo abierto.

En la sección B se registran las señales arrojadas por los sensores de contacto; tres de estos sensores se emplean para determinar la posición inicial de los carros y uno de ellos es empleado para detectar el momento de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, con el fin de determinar posiciones relativas de diferentes instrumentos empleados en los procesos de manufactura. Todo el control es llevado a cabo por el procesador de la PC, y se hace por medio de una interfaz generada con el lenguaje de programación C++.

Es importante mencionar que con este prototipo ya se han fabricado algunas piezas de forma automática, y también se ha propuesto un proceso para caracterizar al prototipo y establecer así, los parámetros de rendimiento de éste con el fin de emplearlo en la parte de control y compensación de errores.

Prototipo de paralelogramos.

En el prototipo de paralelogramos (*figura 19*) se trató de usar la experiencia que se obtuvo durante el diseño y construcción de su antecesor, teniendo como consecuencia un nuevo diseño con el cual se pretende un funcionamiento bimodal, es decir, que el microcentro de maquinado pueda operar en Lazo Abierto (LA) y Lazo Cerrado (LC), además de reducir los problemas de alineamiento y backlash[1].

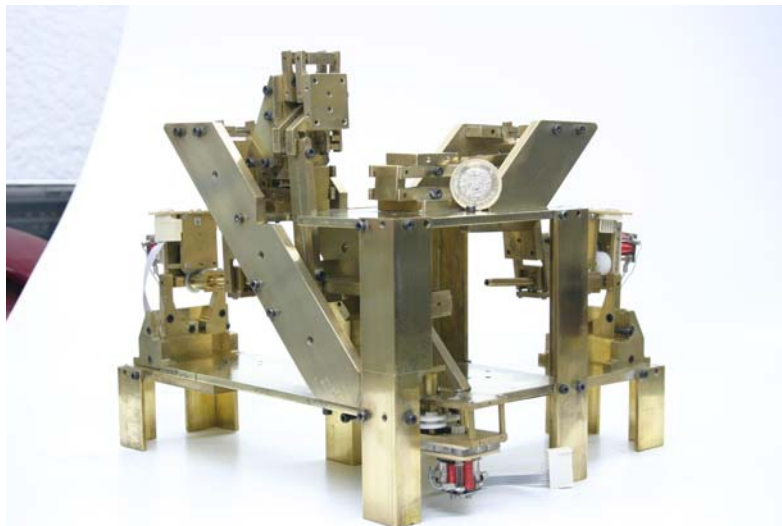


Figura 19. Segundo prototipo de MMH generada en el LMM[12][34][35].

Este segundo prototipo, cuenta con las siguientes especificaciones:

- Dimensiones aproximadas de 180X210x135(mm).
- Cuatro grados de libertad, tres de traslación con 5mm de desplazamiento y un eje rotacional,
- Tipo de actuadores empleados, 4 MPAP.
- Se le implementarán sensores de contacto, en el inicio y fin de carrera de cada eje.
- Resolución teórica 596nm por paso del motor.
- A diferencia del tipo de movimientos desarrollados (lineales), en el prototipo lineal, en éste segundo se integró un mecanismo en paralelogramo de tres barras para operar el movimiento de los ejes (movimientos en arcos).
- El costo en materiales de éste microcentro de maquinado es de \$110usd.

Dentro del diseño de esta MMH, se propuso incluir elementos tales que produzcan desplazamientos suaves (esferas y barras); incrementando la viabilidad de usar las mismas partes en diferentes zonas de la micromáquina [12]. Otra cuestión de tomarse en cuenta, es el usar el mismo material en todas las partes del prototipo, logrando así reducir los problemas asociados con la expansión térmica.

Como ya se mencionó anteriormente, tanto el prototipo lineal como el de paralelogramos utilizan el mismo tipo de actuadores (MPAP) y sensores, es por eso que a continuación se plantea un breve panorama de los diferentes tipos de actuadores en el mercado.

Actuadores.

La selección de los actuadores se hizo con base a los tipos de sistemas motrices básicos para controlar movimiento, velocidad y posición, entre los cuales destacan:

- Motores neumáticos.
- Motores hidráulicos.
- Motores Clutch/Freno.
- MPAP.
- Motores de inducción AC.
- Servomotores.

| ACTUADOR | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--------------------------------|--|--|
| <i>Motores de aire</i> | Bajo costo. Componentes disponibles. Fácil de aplicar. Fácil mantenimiento. Fuente de poder centralizada. | Ruido del compresor. Difícil de regular la velocidad. Susceptible a contaminación. Ineficiencia energética. |
| <i>Motores hidráulicos</i> | Fácil de aplicar. Alto par disponible. Fuente de poder centralizada. | Ruido considerable. Difícil de controlar la velocidad. Posicionamiento lento. Susceptibles a fugas. Ineficiencia energética. Riesgo de fuego. Se requiere mucho mantenimiento. |
| <i>Motores Clutch/Freno</i> | Fácil de aplicar. Bajo costo. Bueno para inicio/paro con cargas ligeras. Provee una manera sencilla de unificar velocidad. | Aceleración sin control. Inexactos. Susceptibles al desgaste. Desempeño con baja repetitibilidad. |
| <i>MPAP</i> | Control simple. Costo moderado. Bueno para cargas constantes. Buena precisión de posicionamiento. | Susceptible a perder pasos. Malo para cargas variables. Ineficiencia energética. Problemas de resonancia. |
| <i>Motores de inducción AC</i> | Bajo costo. Control de encendido/apagado directo. Cableado sencillo. Control de velocidad burdo. Disponibles comercialmente. | Control de posicionamiento limitado. Tamaño relativamente grande. |
| <i>Servomotores</i> | Alto desempeño. Tamaño reducido. Gran variedad de componentes. Se logran altas velocidades con controles especializados. | Mayor costo. El desempeño está limitado por los controles. El par a alta velocidad, está limitado por el circuito conmutador. |

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas de los actuadores[26].

De acuerdo a las ventajas y desventajas mostradas en la *tabla 1.3*, así como la necesidad de tener un control sobre la posición de los motores, de las alternativas existentes, se seleccionaron los MPAP. Además, la característica que tienen de quedar enclavados en una posición o bien, totalmente libres, los hace ideal para este tipo de aplicaciones.

Esto lo logran cuando una o más de sus bobinas están energizadas, así pues, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario, quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas. Dentro de este tipo de motores (MPAP), existe otra clasificación que se pone de manifiesto en la *tabla 1.4*.

| TIPO | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| <i>De Reluctancia Variable.</i> | En este tipo de motor el rotor es de acero dulce y consta de varios engranes, los embobinados del estator cuentan con un cable de alimentación común conectado en uno de los extremos de cada bobina. Generalmente se componen de tres fases con seis dientes en el estator y su manufactura es bastante compleja; es empleado en aplicaciones que no requieren de un gran par. |
| <i>De Imán Permanente (unipolares y bipolares).</i> | En este tipo de motor el rotor es de imán permanente de forma cilíndrica. Tiene la ventaja de alcanzar un par relativamente alto, y su costo es muy bajo, siendo este ideal en sistemas de varios motores en equipos de producción en serie; por el contrario, tiene la desventaja de trabajar solo a bajas velocidades. |
| <i>Híbrido.</i> | Estos conjuntan las características de los dos anteriores, cuentan con un imán permanente inserto en tapones de hierro dentados. Tiene alto par estático y dinámico alcanzando altas velocidades, por lo que son empleados en una gran variedad de aplicaciones industriales en donde se requiere un posicionamiento de alta precisión. |
| <i>Hidráulicos.</i> | En estos, el potencial de compactación es mejor que en los electromagnéticos, debido a que las partes de estos motores son proporcionales al tamaño completo del motor. De manera adicional se conoce que los motores hidráulicos poseen un par aproximadamente de dos órdenes de magnitud mayor a un motor electromagnético. |

Tabla 1.4. Tipos de MPAP.

Con base en esta última clasificación (*tabla 1.4*), son los MPAP de imán permanente bipolares (*figura 20 y 21*) los que se usan en los prototipos de MMH's descritos en éste capítulo. Para que éste tipo de actuador funcione, la corriente que circula por las bobinas debe cambiar de sentido en función del voltaje que se le aplique, por lo que un mismo embobinado puede tener en uno de sus extremos distinta polaridad (bipolar). En este tipo de motor las bobinas del estator se conectan en serie formando solamente dos grupos, que se montan sobre dos estatores. De este motor salen cuatro hilos que se conectan al circuito de control que genera la secuencia de trenes adecuada para que el actuador comience a girar.

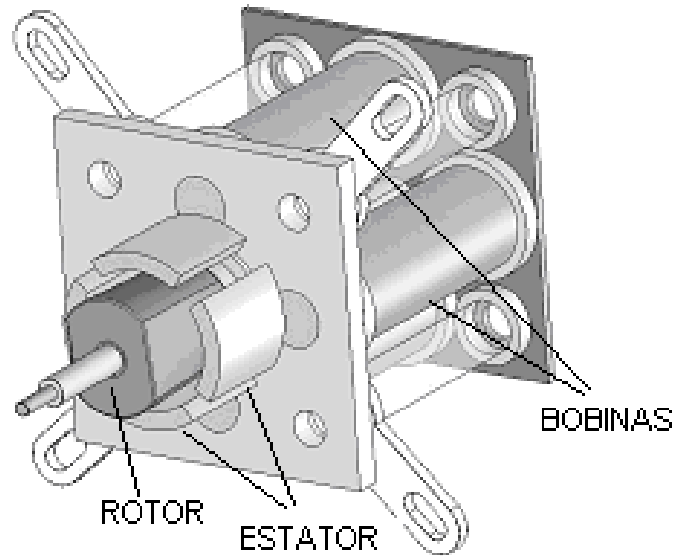


Figura 20.1. MPAP de imán permanente bipolares [20].

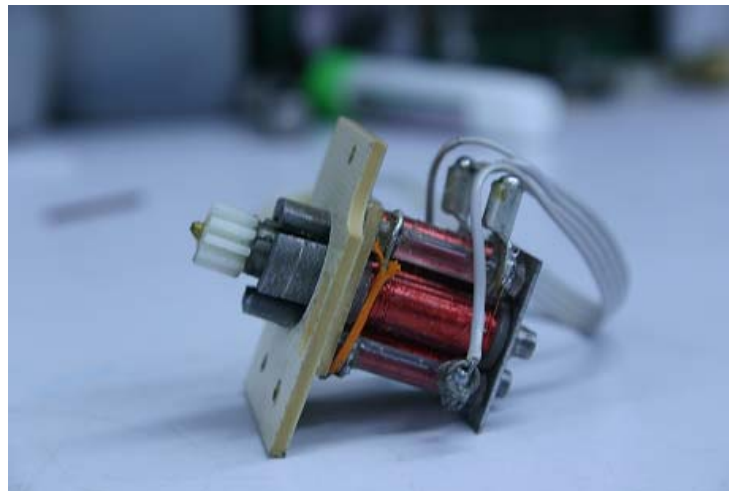


Figura 20.2. Motor de pasos construido en el LMM.

Una vez que se ha planteado un panorama general del sistema mecánico así como el sistema de control que lo opera, en el siguiente capítulo se enunciarán las inconveniencias de dicho sistema de control, las necesidades que se tienen que resolver para después establecer los objetivos y alcances de este trabajo.

Capítulo



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El sistema de control que actualmente está manejando al prototipo lineal, tiene ciertos inconvenientes, los cuales se enuncian a continuación:

- ✓ Dependencia total de la PC, saturando los recursos de la computadora e impidiendo realizar otra tarea en ella.
- ✓ Durante una larga operación en los ejes se dan efectos térmicos, debido a que no existe homogeneidad en los materiales empleados.
- ✓ El control en estos prototipos depende mucho del acoplamiento de todas las piezas, el cual es manual, produciendo errores en el proceso de maquinado.
- ✓ Con este tipo de control (LA) no se pueden alcanzar grandes velocidades.
- ✓ El uso de dos puertos LPT, originaría una expansión del sistema si se quisiera controlar más de un centro de maquinado; necesitando un número de PC's igual al número de MMH's a controlar.
- ✓ La falta de elementos que generen la información digital necesaria para cerrar el lazo (retroalimentación).

Detectando las siguientes necesidades:

- ✓ La proposición de un dispositivo programable que le quite peso a la PC, destinando ésta última sólo para tareas de envío y adquisición de datos.
- ✓ La doble funcionalidad (bimodalidad) en la operación del sistema de control, LA y LC, con el fin de alcanzar grandes velocidades.
- ✓ Controlar más de cuatro grados de libertad, con una sola PC.
- ✓ La implementación de un módulo dentro del sistema, que permita el sensado y retroalimentación de la información generada durante el funcionamiento de los actuadores de las MMH's.

En consecuencia, se necesita un sistema de control cuyo cerebro (dispositivo programable), además de ayudar a satisfacer las necesidades anteriores, cuente con los módulos y puertos bidireccionales que requiere el sistema actual. Estos requerimientos se plantean a continuación:

- ✓ 16 salidas para las señales que energizarán las bobinas de cada uno de los MPAP, estas salidas se pueden reducir a 4 si se hace uso de un driver que genere las secuencias adecuadas, como se tiene pensado.
- ✓ 4 entradas para los sensores de contacto que estarán ubicados al inicio de la carrera de cada uno de los ejes de las MMH's, aunque en un futuro se pretende colocarlos también al fin de cada carrera, lo cual incrementaría a 8 entradas por cada cuatro grados de libertad controlados.
- ✓ 4 entradas para el sistema de retroalimentación usado, que permitirá cerrar el lazo durante la operación del sistema.
- ✓ Aproximadamente 15 salidas destinadas para diferentes parámetros que controlen el modo de operación de los MPAP: reloj, sentido de giro, paso completo, habilitación del sistema, sensado de corriente, un reset, etc.
- ✓ Módulo de comunicación asíncrono (*full-duplex*) en el que se requerirán básicamente 3 líneas: una para la transmisión (TX) de datos, otra para la recepción (RX) y un común (GND).
- ✓ 5 salidas que nos permitan controlar digitalmente un sistema de voltaje variable, con el fin de que la alimentación del sistema también sea controlada por el cerebro de control.

Por lo tanto, se tiene la necesidad de que el dispositivo seleccionado nos brinde 33 pines de propósito general para llevar a cabo el control del sistema mecánico, además se requiere que éste dispositivo sea programado fácilmente y su precio sea mínimo, respecto a las demás opciones. En cuanto al prototipo de paralelogramos, está en proceso de terminarse el cuarto grado de libertad (husillo), por lo tanto, se seleccionó uno de sus ejes, en representación de éste prototipo, para demostrar la bimodalidad en la operación del sistema de control.

Es importante hacer notar que en la mayoría de las máquinas herramienta convencionales con CNC (Control Numérico asistido por Computadora), hacen uso de varios microcontroladores para llevar a cabo el proceso de control en la fabricación automática de piezas. Sin embargo, debe tenerse en consideración, que la automatización no implica forzosamente producción masiva; la automatización debe observarse como la manufactura de piezas que cumplen con especificaciones rigurosas, y en las que para su fabricación, intervino poco la mano del hombre[44].

OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema de control para una MMH de primera generación, basado en un microcontrolador PIC (Interfaz Controladora de Periféricos), que a su vez deje sentada la base para controlar una microfábrica sobre mesa.

ALCANCES.

- ✓ Realizar una investigación comparativa de los sistemas de control más sobresalientes en el campo de las MMH's.
- ✓ Elegir un dispositivo programable con base a cuatro alternativas que se vienen manejando en el LMM, atendiendo a las necesidades planteadas anteriormente.
- ✓ Definir un diseño conceptual para controlar equipo micromecánico (MMH's), lo cual conlleva al desarrollo de los siguientes puntos:
 - Aumentar el número de grados de libertad a controlar, utilizando una sola PC.
 - Establecer el hardware de control externo necesario que brinde al sistema una etapa de potencia, una etapa de protección y una de control que genere los diferentes parámetros de funcionamiento.
 - Elegir el dispositivo que adecue las señales entre la etapa de control y el canal de comunicaciones seleccionado.
 - Seleccionar los elementos de retroalimentación que permitan alcanzar altas velocidades.
- ✓ Elegir el canal de comunicación más simple y adecuado para el desarrollo de nuestra tarea.
- ✓ Elaborar un diseño a detalle del sistema propuesto.
- ✓ Elaborar una interfaz computacional para que el usuario interactúe con el equipo micromecánico.
- ✓ Programar las rutinas adecuadas para el funcionamiento bimodal (LA y LC) del equipo micromecánico controlado, si es que este lo permite.

- ✓ Implementar el sistema de control en la MMH.
- ✓ Realizar pruebas para calificar el desempeño del sistema de control propuesto, así como para caracterizar los actuadores empleados en el sistema micromecánico.
- ✓ Definir mejoras y trabajo a futuro.

Capítulo



DESARROLLO.

Una vez analizado el sistema de control actual, se realizó un diagrama a bloques en donde se define conceptualmente como estará estructurada la propuesta de control (*figura 21*). Del diagrama se pueden apreciar tres bloques fundamentales:

- ✓ Grados de libertad del microequipo (MMH).
- ✓ Hardware externo de control.
- ✓ Interfaz de usuario.

En cuanto al primer punto, nos referimos al número de actuadores a controlar, que aunque en este trabajo se controla una MMH, también existe la posibilidad de controlar otro microequipo que tenga menos grados de libertad que la MMH en cuestión.

El hardware de control externo está constituido por la electrónica necesaria para llevar a cabo el proceso de control del microequipo, es decir, una etapa de protección que separe la etapa de control de la etapa de alta corriente, una etapa de potencia que proporcione la corriente suficiente para la operación de los actuadores, y una etapa controladora donde se alojará el dispositivo programable seleccionado para la tarea de control.

Como tercer bloque figura una interfaz de usuario, con la cual se podrá operar el microequipo deseado, atendiendo a ciertos parámetros de interés que le permitan al operador estar enterado del estado de los actuadores. También, se dejan ver en el diagrama unos bloques correspondientes a la retroalimentación del sistema, lo cual significa que el tipo de control propuesto permitirá la operación a LC en el microequipo que así lo permita.

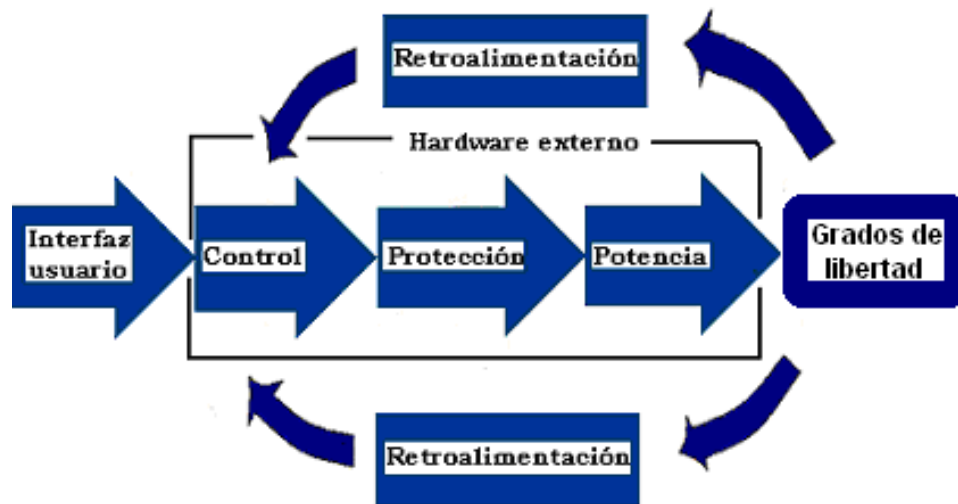


Figura 21. Diseño conceptual del sistema de control propuesto

DISEÑO A DETALLE.

Partiendo del diseño conceptual y del sistema micromecánico descrito en el *capítulo 1*, se pretende controlar grados de libertad en los cuales los actuadores empleados (MPAP), tienen la característica de operar a 12V con un consumo de 0.5A. Para ello, se necesita un tren de pulsos con la secuencia adecuada que permita hacer girar al MPAP, por lo tanto se elaboró un sistema que genera dicha secuencia y además, proporciona a ésta la corriente necesaria para llegar a las terminales de los MPAP.

Etapa de Potencia.

Así pues, se implementó un sistema de potencia basado en dos C.I's (*figura 22*), uno es un *driver* para el control de MPAP, el "L297", y el otro es un puente H completo, el L298N, ambos de *SGS-Thomson*. La implementación de este sistema de potencia fue hecha con una técnica denominada "*Tecnología de prototipos rápidos por tejido de alambre magneto*"[18] (*figura 23*). La elección de éste par de integrados fue por las siguientes razones:

- ✓ Se trata de C.I's de gran versatilidad, fácil manejo y que requieren de muy pocos componentes externos.
- ✓ El fabricante deja solucionado el problema de buscar una circuitería para la etapa de potencia, a la salida del *driver*, con el C.I L298N.
- ✓ Ambos integrados fueron desarrollados especialmente para trabajar juntos[19].

- ✓ El L297 integra toda la circuitería necesaria para controlar un MPAP bipolar ó unipolar.
- ✓ El *driver* solo necesita un tren de pulsos, para generar las cuatro fases que alimentarán al circuito puente H.
- ✓ Manejo sencillo de los parámetros de control del MPAP: sentido, control de corriente, tipo de paso, etc.

El *driver* tiene un funcionamiento muy simple, puesto que requiere una entrada de reloj que utiliza para dar cada paso de la secuencia del motor en cada flanco de bajada de la señal (*figura 24*). De esta forma, queda determinado que la velocidad del motor será directamente proporcional a la frecuencia de la señal de reloj de entrada. Por lo tanto, el driver internamente genera la secuencia requerida y va saltando de un estado al siguiente, a la frecuencia que indica el reloj (CLK). Además, cuenta con ciertas entradas mediante las cuales se selecciona entre los distintos modos de funcionamiento en los que se hará trabajar al motor. Estos modos de funcionamiento se muestran en la *tabla 3.1*.

En el modo de medio paso, se consigue tener el doble de pasos por vuelta, aumentando así la resolución, pero disminuyendo por el contrario su velocidad a la mitad y reduciendo también el par del motor (*figura 25*).

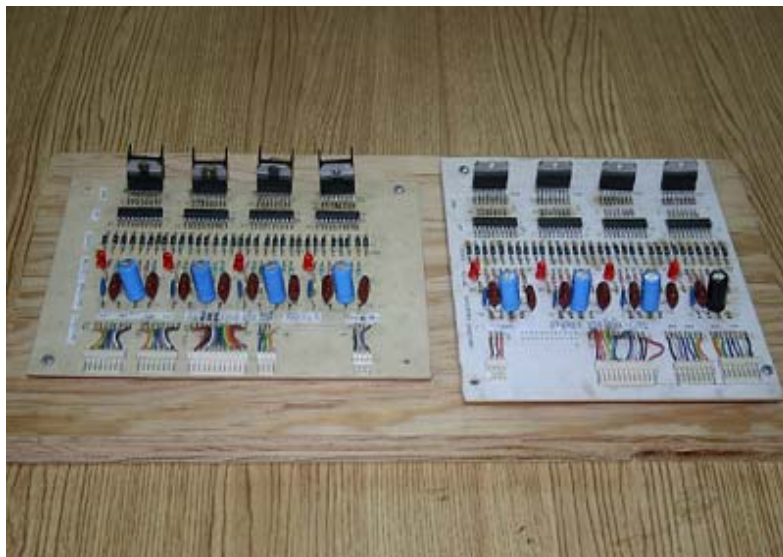


Figura 22. Sistema de potencia.

| PIN | NOMBRE | DESCRIPCION |
|-----|------------------|--|
| 4 | A | Salida a la fase A del motor directo al L298N. |
| 6 | B | Salida a la fase B del motor directo al L298N. |
| 7 | C | Salida a la fase C del motor directo al L298N. |
| 9 | D | Salida a la fase D del motor directo al L298N. |
| 10 | ENABLE (EN) | Entrada habilitadora del C.I. |
| 11 | CONTROL (CTL) | Entrada que define por donde llevará a cabo, el control de corriente, el circuito chopper. |
| 15 | V _{REF} | Entrada de voltaje de referencia para el circuito chopper que determina el pico de corriente en la carga. |
| 16 | OSC | Entrada conectada a una red RC que determinará el rango de chopeado. |
| 17 | CW/CCW | Entrada para definir el sentido de giro en el que trabajará el MPAP. |
| 18 | CLOCK (CLK) | Entrada de la señal que determina el avance del MPAP. |
| 19 | HALF/FULL | Entrada para la elección del modo de funcionamiento, por pasos completos (FULL) ó por medios pasos (HALF). |
| 20 | RESET (RST) | Entrada que obliga a reestablecer el traductor obligando a ir a la posición inicial (ABCD = 0101). |

Tabla 3.1. Señales requeridas y generadas por el L297.

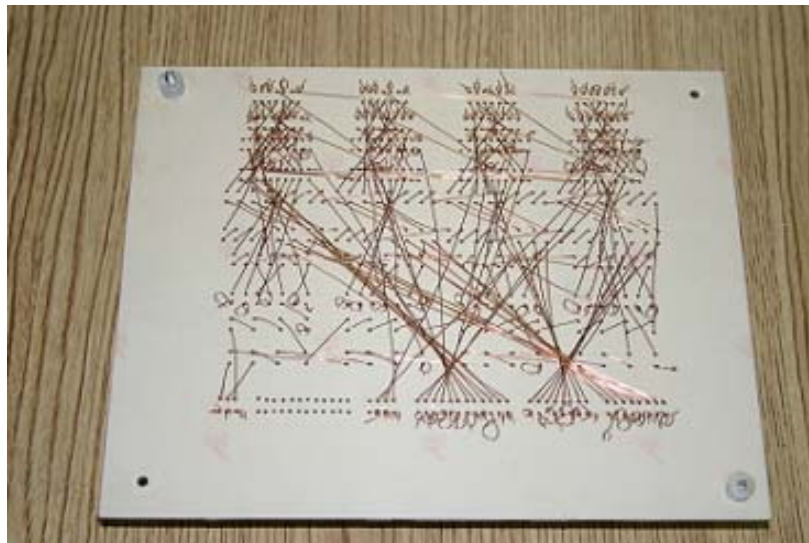


Figura 23. Técnica de tejido con alambre magneto.

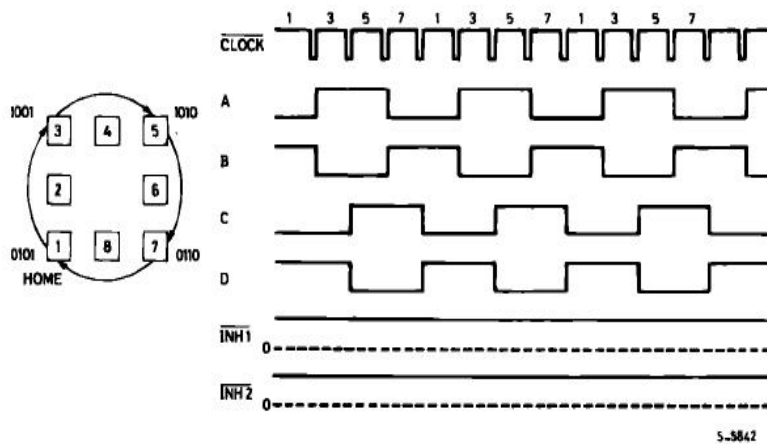


Figura 24. Secuencia de paso completo[30].

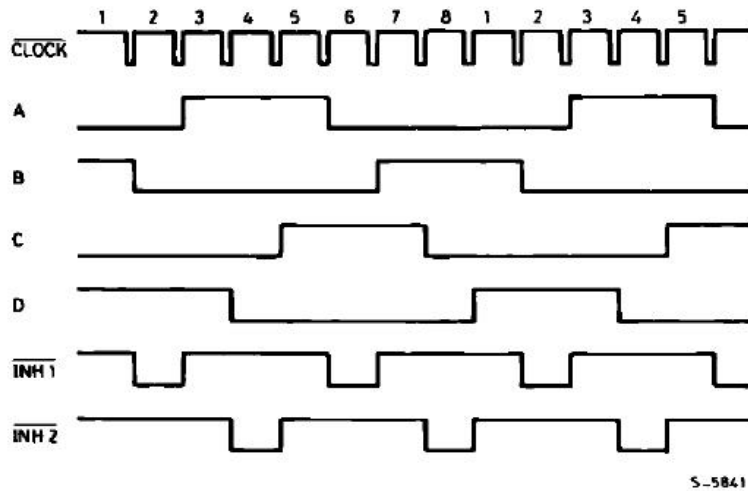


Figura 25. Secuencia de half-step[30].

Por otra parte, el *driver* cuenta con un circuito *chopper* dual de PWM que regula la corriente que circula por cada fase del motor bipolar (figura 26). Cada *chopper* consta de un comparador, un flip-flop y un sensor resistivo externo; un oscilador común suministra pulsos a ambos *choppers* para tener un determinado rango de *chopeado*. La frecuencia del oscilador del *chopper* está determinada por la red RC del pin 16 (OSC), esta frecuencia es rigurosamente:

$$f_{osc} = 1/(0.7RC); \text{ donde la resistencia } R > 10k\Omega$$

Ec. 3.1. Frecuencia de oscilación del *chopper*.

El *chopper* puede actuar en cualquier línea de fase o en las líneas del pin INHIBIT , una entrada llamada CONTROL decide en cual. El chopeado por líneas INHIBIT es usado para motores unipolares, mientras que se puede seleccionar entre el chopeado por líneas de fase o por las líneas INHIBIT para motores bipolares.

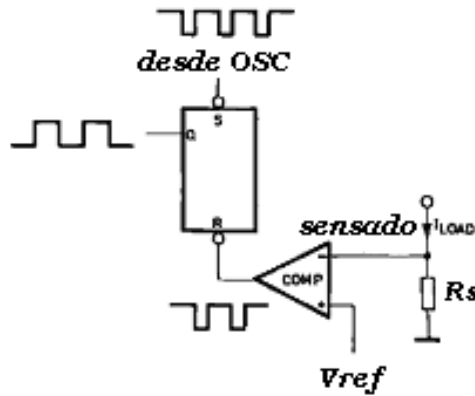


Figura 26. Circuito chopper[30].

En cuanto a la salida de potencia, el L298N es un C.I de 15 pines en un encapsulado tipo *Multiwatt* (preparado para acoplarle un disipador), de gran tensión y gran corriente con entradas compatibles con los niveles lógicos TTL y capaz de trabajar bajo cargas inductivas tales como relees, solenoides, motores de corriente continua y motores de paso.

La circuitería interna del integrado se simplifica en el diagrama de la *figura 27*, donde se presentan las entradas TTL, la conexión interna, las salidas de potencia y los escasos componentes externos requeridos para su funcionamiento.

El funcionamiento se reduce a un puente-H controlado para cada fase del motor, es decir, se consigue polarizar una fase del motor logrando “disparar” o no cada transistor del puente [19]. De esta forma, se puede polarizar positivamente poniendo los dos transistores adecuados en *On*, y dejando los otros dos apagados, o bien haciendo justo lo contrario, los otros dos transistores conduciendo mientras que los inicialmente encendidos estén en corte.

No hay que olvidar que este puente va a soportar una carga inductiva, lo que implica habilitar un camino de recirculación para la corriente que proteja los transistores en los instantes que cambie la polaridad de la tensión aplicada sobre los devanados, ya que debido a la inductancia de éstos, la corriente por los devanados no puede sufrir cambios bruscos.

Por tanto, para que el transistor del puente sea capaz de asimilar una carga inductiva, es necesario colocarle en paralelo un diodo invertido *Schottky* o de recuperación rápida que tienen tiempos de respuesta muy pequeños, ya que el sistema debe comportarse bien en un rango de frecuencias, que cuanto más amplio es mejor.

Las entradas TTL definirán el signo de la polaridad sobre la fase del motor, mientras que ENABLE es una señal que habilita o deshabilita el puente independientemente del valor lógico de las entradas de control.

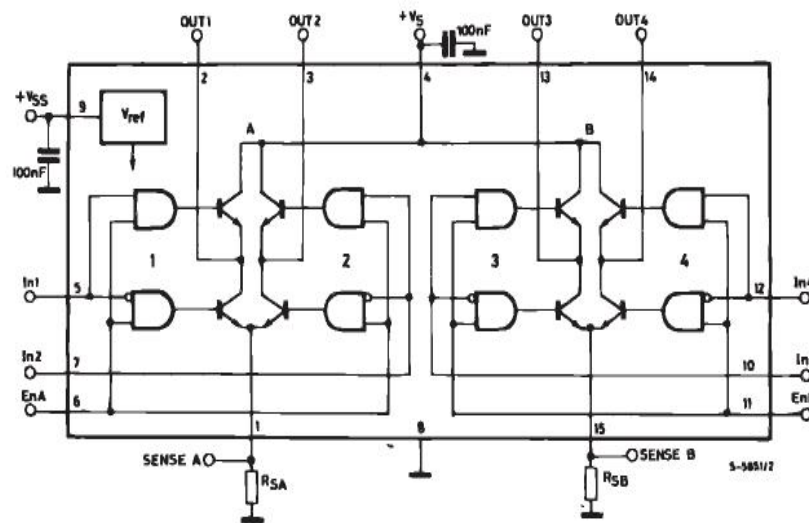


Figura 27. Representación interna del L298N[30].

Debido a que éste puente H puede ser capaz de manejar rangos de corriente de hasta 2A, es necesario establecer un aislamiento que proteja al dispositivo de control de posibles retornos de corriente. Es por eso que se implementó una tarjeta de protección basada en optoacopladores (figura 28).

Etapas de Protección.

El acoplamiento mediante optoacopladores es necesario cuando un dispositivo periférico funciona con un voltaje o corriente distintos del resto de las etapas del sistema, o bien cuando sus referencias de tierra son diferentes.

La protección está basada en el optoacoplador PC847 (figura 29), C.I. de 16 pines de SHARP, el encapsulado está provisto de cuatro fotodiodos para las entradas y sus respectivos fototransistores para las salidas, la comunicación entre estos dos dispositivos es por medio de emisión y recepción de luz, lo cual permite tener aislado nuestro dispositivo de control de la etapa de potencia[13].

Para hacer funcional este circuito, fue necesario agregarle una resistencia (R_{diodo}) de aproximadamente $330[\Omega]$ a la entrada del fotodiodo y, otra (R_L) de $1[k\Omega]$ a la salida del colector. En esta misma tarjeta se implementó el circuito transistor (acondicionador de señal) para recibir las señales de los sensores de contacto, que no es más que un transistor conmutando en la región de corte y saturación, con una resistencia en la base de $1[M\Omega]$ y en el colector de $1[k\Omega]$. Así pues, mientras unos conectores reciben las señales del dispositivo de control, otros conectores las entregan al sistema de potencia.

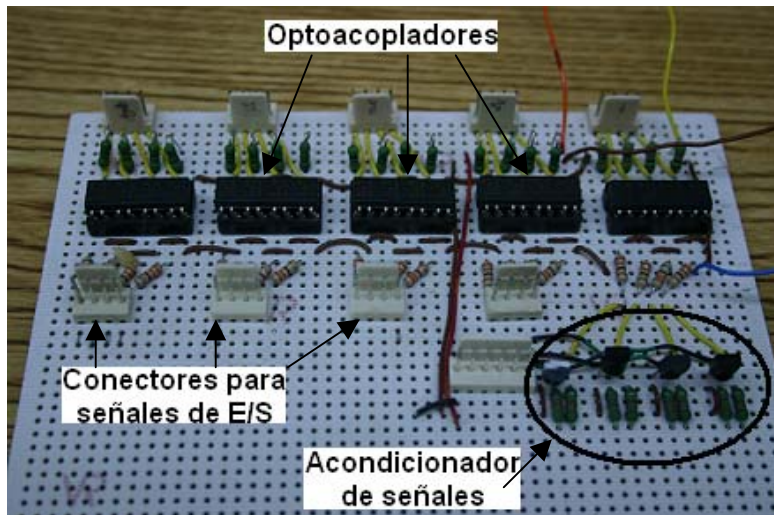


Figura 28. Tarjeta de protección.

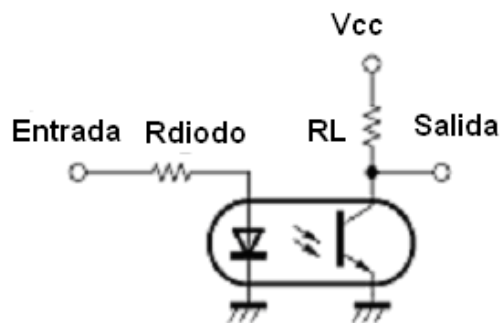


Figura 29. Conexión interna del optoacoplador PC847

CONTROL.

En la elección del dispositivo de control influyeron factores como requerimientos de los periféricos de la aplicación, el tipo de encapsulado, la flexibilidad en el diseño, el software y el hardware para su implementación; sin embargo, dos de los factores de mayor interés para nuestra aplicación, el número de pines bidireccionales y el precio, están relacionados de manera proporcional.

De tal manera, las dos primeras opciones de la *tabla 3.2* se descartaron por el momento debido a su alto costo. Por otra parte, con tecnologías de semiconductores comparables e igual frecuencia de reloj, un procesador RISC típico tiene una capacidad de procesamiento de dos a cuatro veces mayor que la de un CISC, además el reducido repertorio de instrucciones RISC es una ventaja ya que se van a consumir menos ciclos de instrucción para ejecutarse, pero se consumirá más memoria para realizar funciones complejas. En cuanto al software utilizado, dado que un RISC no utiliza el mismo software que un CISC, estos últimos por lo general tienen un software más asequible.

La cuestión es que el estudio de prestaciones de ambas tecnologías nos ha llevado a concluir que hoy en día los procesadores RISC ofrecen más prestaciones, es decir, son más potentes y rápidos que los CISC, sin embargo, el mercado se ha decantado por la tecnología CISC en cuanto a volumen de ventas.

Así pues, la opción seleccionada debido a lo anterior, el tipo de aplicación y su precio, fue un microcontrolador PIC (*tecnología RISC*). Debido a las diferentes gamas existentes, se realizó una investigación comparativa acerca de la opción más viable, sin embargo, la necesidad de varias entradas y salidas disponibles nos enfocó en la gama alta de los microcontroladores PIC18FXXX (*tabla 3.3*).

De la *tabla 3.3*, se seleccionó el PIC18F8720 (*figura 30 centro*) para que fuese el cerebro del sistema de control, sin embargo, debido a ciertos problemas en la entrega por parte del distribuidor, se empleó el PIC16F877 (*figura 30 izquierda*) de gama media, para el desarrollo de este proyecto. Las características de este último microcontrolador se resumen en la *tabla 3.4*.

| Dispositivo | Características | Costo |
|--|---|--|
| <p>DSP (Procesador Digital de Señales)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo de alta rapidez de procesamiento que captura y procesa información a la vez que ocurre (tiempo real). • Maneja aritmética flexible (punto fijo o flotante) y ejecuta operación en paralelo, facilitando accesos a memoria y cálculos; además contiene varios buses para incrementar la tasa de transferencia . • El costo ha sido la principal desventaja, sin embargo, debido al incremento en su uso éste ha disminuido para algunas aplicaciones. | <p>Sistema de evaluación</p> <p>DSP56F835 7</p> <p>\$500usd</p> |
| <p>FPGA (Arreglo de Compuertas Programables de Campo)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo de simplicidad extrema haciendo uso de lógica programable discreta. Los diseños en VHDL pueden ser utilizados como modelos de simulación y la implantación física se consigue rápidamente y sin grandes costos económicos. • El lenguaje de alto nivel permite disminuir el tiempo de desarrollo de un producto. • Es de alto costo debido a que la simulación, comprobación y compilación de circuitos es utilizando herramientas CAD, además el costo de tarjetas de desarrollo para aplicaciones con mayor número de e/s es elevado. | <p>Tarjetas de desarrollo</p> <p>Oscilan entre los \$2000usd y \$5000usd</p> |
| <p>Microcontrolador CISC (Computador de Set Complejo de Instrucciones)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • En estos dispositivos existen diferentes formas de realizar un programa debido al poderío de sus instrucciones, por lo cual funciones complejas son ejecutadas con una sola instrucción. El repertorio de instrucciones puede ser bastante largo. • Dado que las instrucciones están microcodificadas, es decir, que una instrucción será decodificada por la CPU en varias instrucciones básicas, es fácil deducir que esto hará la ejecución del programa un poco más lenta ya que se van a ejecutar varias instrucciones pero tiene la ventaja de que ahorramos memoria ya que para dividir sólo usamos una instrucción. • El ancho de banda se ve reducido considerablemente debido a que una instrucción va a consumir varios ciclos de instrucción para ejecutarse. • Este tipo de dispositivos resulta ser demasiado sofisticados para ciertos sistemas que se pueden arreglar con otro tipo de MCU. El software es fácil de conseguir. | <p>Sistema de desarrollo</p> <p>\$250usd y \$500usd</p> |
| <p>Microcontrolador RISC (Computador de Set Reducido de Instrucciones)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Este dispositivo es de rápido procesamiento ya que utiliza breves instrucciones de software, de la misma longitud, por lo tanto el método de procesamiento RISC es más eficiente y más escalable. • Facilita el multiprocesamiento, donde varios CPU's simétricamente dividen, ejecutan y ensamblan una cadena de instrucción. el uso intensivo de registros, disminuye los accesos a memoria. • Menor número de instrucciones es una ventaja, ya que existen pocas rutas para la programación de determinadas tareas, sin embargo los programas son más largos. • La ejecución es rápida, pero requiere de compiladores. • Necesidad de más instrucciones para emular funciones complejas. • El código objeto generado ocupa más memoria que en un CISC y emplea más tiempo en ser procesado. | <p>Sistema de evaluación</p> <p>DM183020</p> <p>\$60usd.</p> |

Tabla 3.2. Investigación de alternativas de control.

| PIC18F | 8520 | 8620 | 8720 |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Pines | 80 | 80 | 80 |
| Encapsulado | TQFP | TQFP | TQFP |
| Memoria de programa | 32768 Flash | 65536 Flash | 131072 Flash |
| Memoria EEPROM | 1024 | 1024 | 1024 |
| Memoria RAM | 2048 | 3840 | 3840 |
| No. entradas/salidas | 68 | 68 | 68 |
| ADC (10bits) | 16 | 16 | 16 |
| PWM's (10 bits) | 5 | 5 | 5 |
| Temporizadores/WDT | 3(16bits) 2(8bits) / 1 | 3(16bits) 2(8bits) / 1 | 3(16bits) 2(8bits) / 1 |
| Comunicación | 2USART, SPI, MI ² C | 2USART, SPI, MI ² C | 2USART, SPI, MI ² C |

Tabla 3.3. Opciones de Microcontroladores PIC gama alta.

| Características | PIC16F877 |
|--|----------------------|
| <i>Frecuencia de operación</i> | DC – 20MHz |
| <i>Memoria de programa (bytes)</i> | 8K |
| <i>Memoria de datos (bytes)</i> | 368 |
| <i>Memoria de datos EEPROM (bytes)</i> | 256 |
| <i>Fuentes de interrupción</i> | 14 |
| <i>Pines bidireccionales (I/O)</i> | 33 |
| <i>Timers</i> | 3 |
| <i>Módulos CCP</i> | 2 |
| <i>Módulos de comunicación serial</i> | MSSP y USART |
| <i>Comunicación paralela</i> | PSP |
| <i>Módulos CAD (10 bits)</i> | 8 canales de entrada |
| <i>Restes</i> | 4 |
| <i>Set de instrucciones</i> | 35 |
| <i>Rango de voltaje de operación</i> | 4.5 a 5.5[V] |
| <i>Rango de temperatura industrial</i> | 0°C a 70°C |
| <i>Encapsulado</i> | PLCC de 40-pines |

Tabla 3.4. Características del microcontrolador PIC alternativo[27].



Figura 30. PIC16F877(izquierda-PLCC), PIC18F8720(centro-SMD)

Dadas las características del dispositivo seleccionado, se realizó la implementación de la tarjeta de control que permitirá interactuar con el sistema micromecánico a controlar.

Tarjeta De Control.

Siempre que se diseña con circuitos integrados programables se precisan herramientas, hardware y software, para el desarrollo de cualquier aplicación.

Con referencia al software, además de los compiladores o intérpretes de los lenguajes usados, es muy importante disponer de un simulador (MPLAB IDE) el cual permita conocer el comportamiento aproximado en la ejecución de las instrucciones en el programa, y el estado de las líneas de E/S[17]. Respecto al hardware, figuran elementos como *el grabador* (PICSTART PLUS), una *interfaz RS-232* (C.I MAX232) que permita la comunicación del microcontrolador con otros dispositivos inteligentes, un *circuito oscilador* externo para establecer la frecuencia de funcionamiento del PIC, y un dispositivo de *reinicialización o reset* que permita al microcontrolador PIC reinicializar su estado[17]. Por lo tanto, los componentes de la tarjeta de control implementada (*figura 31*) se enuncian a continuación:

1. PIC16F877-PLCC de 40 pines.
2. Cables para alimentación de la lógica.
3. C.I. MAX232 de 16 pines, convertidor de voltajes TTL al estándar RS-232 y viceversa.
4. Un conector para cable telefónico de 4 hilos, para la comunicación serial.
5. Un push button de RESET.
6. Un cristal de 20MHz.
7. 5 conectores para señales de entrada/salida.

Esta tarjeta será la etapa central de nuestro sistema, y será donde se coloque el cerebro de control, PIC16F877, además en éste último se realizarán las rutinas de todo el proceso de control.

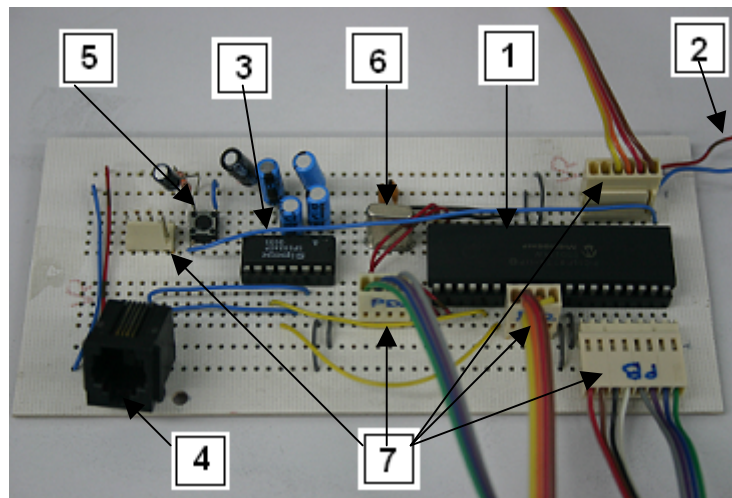


Figura 31. Tarjeta de control implementada.

PROCESO DE CONTROL.

El proceso de control, programado dentro del microcontrolador PIC, se basa en la recepción de caracteres de 8 bits (*figura 32*) generados por una interfaz de usuario. Todo esto con el fin de activar las rutinas correspondientes a la tarea que el usuario desea realizar. Este proceso está estructurado en 5 partes:

- ✓ Rutina de inicialización.
- ✓ Atención a interrupción.
- ✓ Modalidad Joystick LA.
- ✓ Modalidad Joystick LC.
- ✓ Posición de origen.

Rutina de inicialización.

En la *rutina de inicialización* del programa de control se configuran los puertos (entrada o salida) que se muestran en la *tabla 3.5*, registros de funciones especiales (SFR's), interrupciones y se hace la declaración de variables (*figura 33*), para después esperar la llegada del primer carácter.

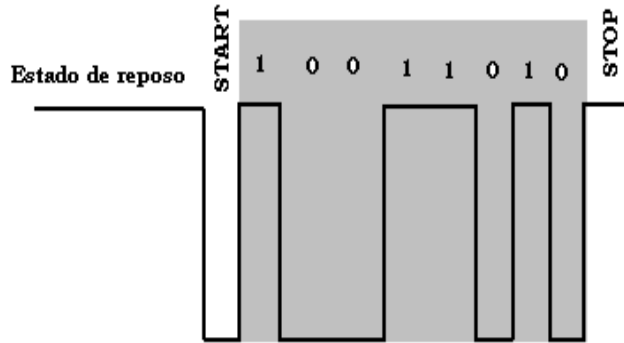


Figura 32. Trama de carácter.

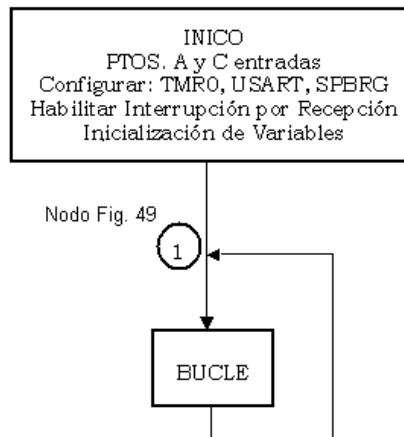


Figura 33. Rutina de inicialización.

| | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 7 PUERTO D 0 | | | | | | | |
| Tipo de paso | control | reset | enable motor X | sentido motor X | enable motor Y | sentido motor Y | enable motor Z |
| PUERTO B | | | | | | | |
| clock motor HUS | clock motor Z | clock motor Y | clock motor X | XXX | sentido motor HUS | enable motor HUS | sentido motor Z |
| PUERTO A | | | | | | | |
| XX | XX | bit 1 fuente | On/off fente | sensa H | sensa Z | sensa Y | sensa X |
| PUERTO E | | | | | | | |
| XXX | XXX | XXX | XXX | XXX | bit 4 fuente | bit 3 fuente | bit 2 fuente |
| PUERTO C | | | | | | | |
| Recep RX | Trans TX | XXX | Detector flancos | realim H | realim Z | realim Y | realim X |

Tabla 3.5. Entradas (en negritas), y salidas.

Atención a interrupción.

Para la recepción de los caracteres, se utilizó el módulo USART (*Módulo Transmisor Receptor Asíncrono Síncrono Direccionable*) del microcontrolador PIC, el cual básicamente es conformado por cuatro bloques:

- ✓ Circuito de muestreo.
- ✓ Generador de baudios.
- ✓ Transmisor asíncrono.
- ✓ Receptor asíncrono.

El *Circuito de muestreo* actúa sobre las líneas RX ó DT (recepción de bit de información), y muestrea tres veces su valor; mientras que el *generador de baudios*, produce la frecuencia en Baudios (bits por segundos) a la que se realiza la tasa de transferencia (9600 baudios).

En el modo de *transmisión asíncrona*, el dato que transmitimos se deposita en el registro de transmisión (TXREG) y luego se traspassa al registro de corrimiento de transmisión (TSR), éste último saca los bits secuencialmente a la frecuencia previamente establecida; mientras que en el modo de *receptor asíncrono*, se reciben los bits en el registro de corrimiento de recepción (RSR), uno a uno, eliminando los de control, START y STOP, después se trasladan al registro de recepción (RCREG) donde se procesan[17].

Ahora bien, una vez recibido el primer carácter, se genera la *interrupción por recepción*, por lo cual el programa atiende inmediatamente este evento, vaciando el registro de recepción (RCREG) y colocando su contenido en una determinada variable (DATO). Enseguida, el dato recolectado entra en una rutina de identificación en donde se definirá el modo de operación de la MMH seleccionada. El siguiente carácter definirá el actuador, sentido y velocidad a ejecutar, estos parámetros se almacenaran en una variable, *MSM*, que se muestra en la *tabla 3.6 (figura 34)*.

| 7 | | <i>Parámetros asociados a la variable MSM</i> | | | | 0 | |
|-----|---------------|---|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| XXX | Modo Joyst LC | Modo Joyst LA | Sentido de giro | Motor Husillo | Motor Eje Z | Motor Eje Y | Motor Eje X |

Tabla 3.6. Variable MSM (modo-sentido-motor).

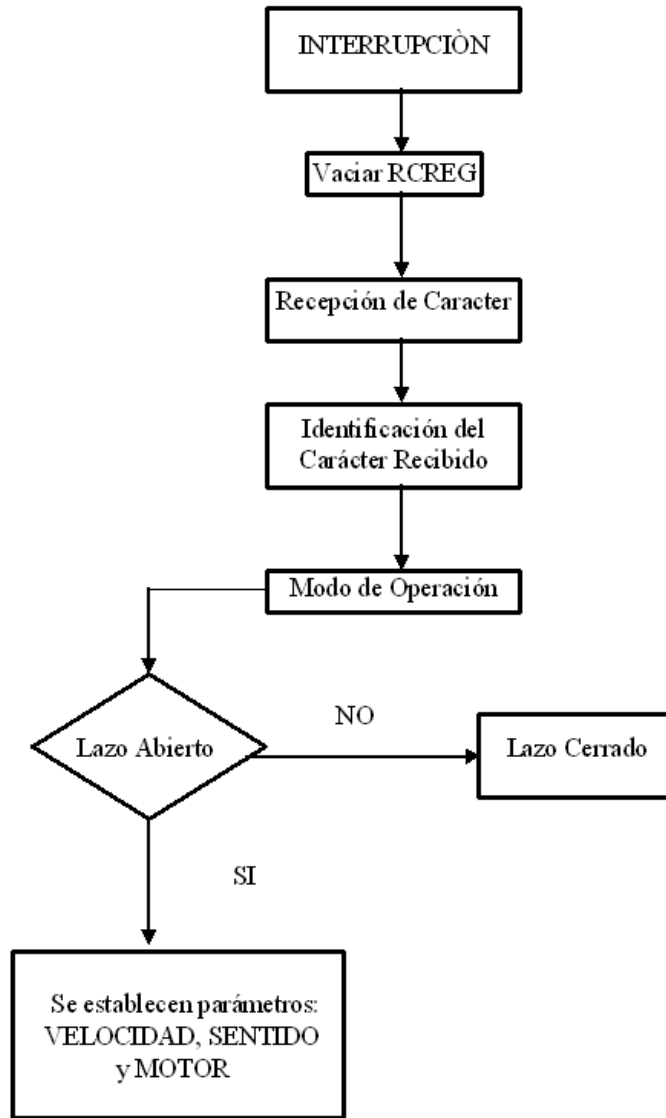


Figura 34. Tratamiento de interrupción y Modalidades de funcionamiento.

En este sistema existen dos tipos básicos de control, atendiendo a la existencia ó no, del factor denominado retroalimentación:

- ✓ Sistemas de control a Lazo Abierto (SCLA).
- ✓ Sistemas de control a Lazo Cerrado (SCLC).

La idea es plantear un sistema de control que opere a LA en las situaciones de maquinado; mientras que el modo de LC proporcionará altas velocidades en los desplazamientos de un punto a otro dentro del espacio de trabajo, reduciendo así los tiempos de manufactura y producción.

Modalidad LA.

El *SCLA* es el más común dado que es ideal para sistemas que operan a bajas velocidades y cargas estáticas. En ésta modalidad se proporcionan las señales de control necesarias por medio de una fuente externa, y se espera que el sistema sea capaz de seguirlas, ya que no existe retroalimentación por eso que a este tipo de operación se le conoce como LA. En consecuencia, esta modalidad es usada en aplicaciones para el control de velocidad y posición.

Por lo tanto, una vez determinados los parámetros de funcionamiento, se programó las rutinas correspondientes bajo las cuales operará el microequipo, *LA* y *LC*. En *LA* (figura 35), de acuerdo al prototipo, motor y sentido elegido, se determinan las señales requeridas por la etapa de potencia, mediante 1's y 0's en los bits de los puertos de la tabla 3.5.

Enseguida, se establece la velocidad de operación utilizando el módulo *TIMERO* (*TMRO*); éste módulo es configurado para trabajar como temporizador, dividiendo su frecuencia de funcionamiento y atendiendo a su desbordamiento mediante la configuración de los registros de control *INTCON* y *OPTION_REG* (ver [27]).

Para generar periodos de tiempo por medio del *TMRO*, se necesita cargar en el registro *TMR0* el valor adecuado para la temporización requerida (ec. 3.2 y 3.3). A continuación, dicho valor se incrementará dentro del *TMR0* al ritmo de los impulsos de reloj internos (definidos por el cristal), hasta que se desborde y llegue a 0, momento en el que se produce un aviso por medio de la activación de una bandera (*TMROIF*).

$$\text{Temporización} = 4 \cdot T_{osc} \cdot (\text{Valor cargado en TMR0}) \cdot (\text{Rango del Divisor})$$

Ec. 3.2. Expresión para calcular el tiempo.

$$\text{Valor a cargar en TMR0} = (\text{temporización} / 4 \cdot T_{osc}) \cdot (\text{Rango del Divisor})$$

Ec. 3.3. Expresión para calcular el valor a cargar en el TMRO.

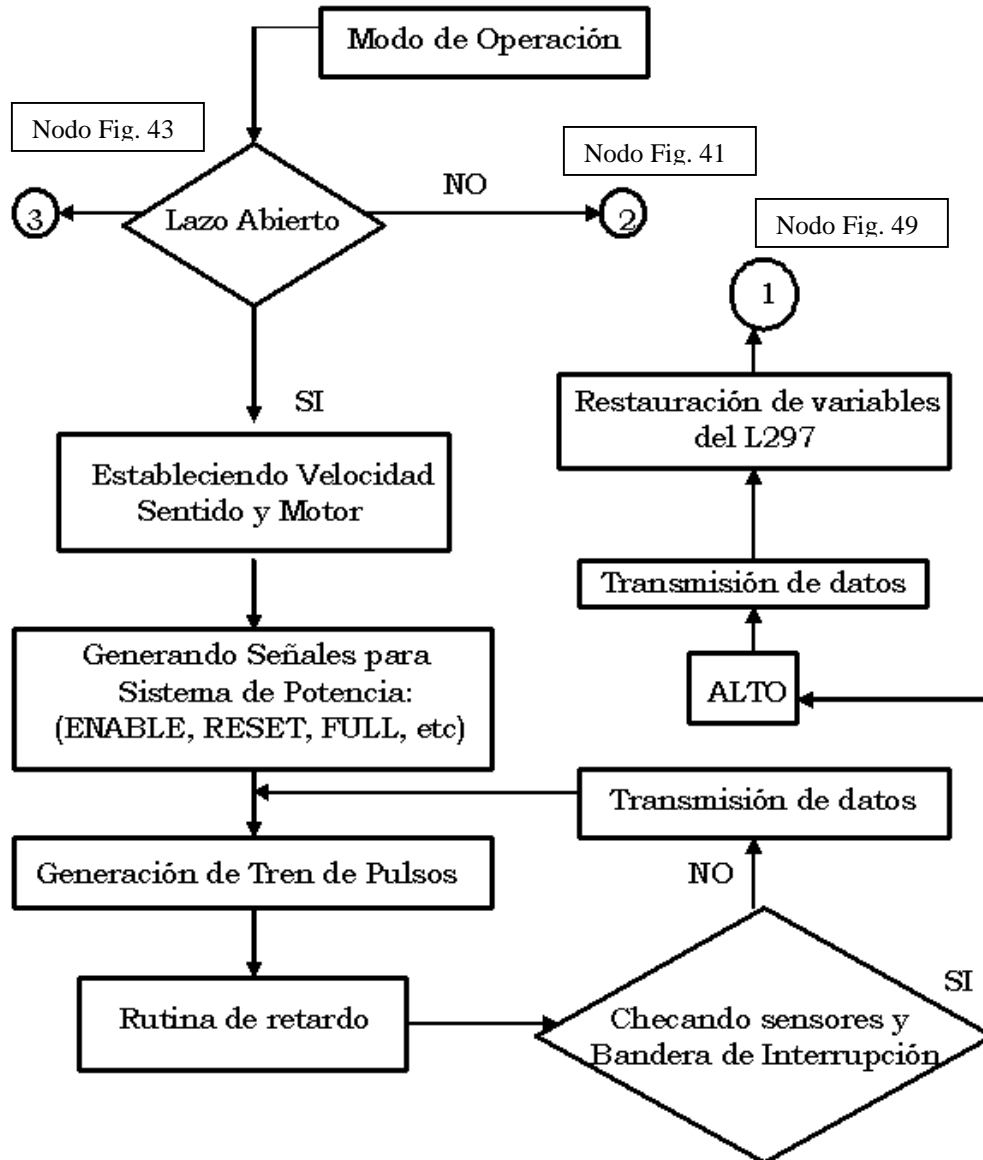


Figura 35. Diagrama de flujo para LA.

Una vez generado el tren de pulsos a la frecuencia requerida, que va directamente al *driver* de la etapa de potencia (pin 18), se verifica constantemente el estado de los bits correspondientes a los sensores de contacto (*HOME*). En el caso de que se active uno de los bits, se manda a llamar a la rutina de ALTO, que cesa la señal de reloj y deshabilita los integrados del sistema de potencia, además, reinicializa todas las señales de control correspondientes al driver L297 a través de la pin 20 (RESET).

Así pues, en esta modalidad el número de señales de E/S empleadas en el proceso de control son 20 (PTOD 0-7; PTOB 0-2,4-7; PTOA 0-3; PTOC 0). Además, es importante mencionar que el rotor de los actuadores empleados modifica su posición por cada pulso que genera el microcontrolador PIC, de lo cual se deduce que en LA el motor presentará una funcionalidad normal, de pasos, y por lo tanto, para variar su velocidad se tendrá que modificar la frecuencia del tren de pulsos generado por el microcontrolador PIC.

Modalidad LC.

El *SCLC* es un método muy efectivo, libre de inestabilidades y capaz de proporcionar altas velocidades a cargas variables[15]. Este sistema de control se caracteriza por un factor denominado retroalimentación. El término *retroalimentación*, señala el hecho de que las señales provenientes de la salida del sistema se retroalimentan para modificar la entrada; la retroalimentación es esencial en cualquier mecanismo de control automático, ya que ayuda a controlar los factores externos que le afecten a éste[13]. Por lo tanto, para llevar a cabo esta modalidad se presentan tres puntos a resolver:

- ✓ El arranque.
- ✓ Sistema de retroalimentación.
- ✓ Variación de velocidad.

Arranque.

Para iniciar este modo se necesita un impulso para lograr activar el movimiento del rotor, ya que su *arranque* no es automático y simple como lo es en el modo de LA. Por lo tanto, se propuso hacer girar el rotor primeramente en LA, y enseguida, mediante un circuito lógico switchear (cambiar) el modo de operación del sistema. Sin embargo, para llevar a cabo este switcheo es necesario generar un tren de pulsos alternativo, que sustituya la señal generada en el modo de LA por el microcontrolador PIC.

Sistema de retroalimentación.

Para ello, se anexó un arreglo generador de pulsos, en las carcazas de los actuadores del segundo prototipo y que además, permite conocer el avance y posición de cada actuador en el espacio de trabajo por medio del módulo TIMER1 del PIC. Este arreglo consta de los siguientes elementos:

- ✓ Una tarjeta impresa (40 x 30mm) con dos conectores de 6 pines.
- ✓ Dos optosensores (H22A1), soldados a la tarjeta impresa.
- ✓ Disco ranurado (encoder), acoplado al eje del rotor.

Estos elementos se pueden ver con claridad en la *figura 36 y 37*, junto con el actuador empleado. Es importante mencionar la forma en que deben acoplarse el disco rodante con el rotor; en este acoplamiento deben existir 45 grados mecánicos de separación entre el par de optosensores, para que así, el ángulo entre las señales emitidas por los optosensores sean de 90°[7]. La fabricación del encoder es otro aspecto muy importante, el disco giratorio debe ser de tal forma, que éste tenga dos sectores que permitan pasar la luz y dos que impidan su paso de manera alternada, a 90° (*figura 38*).

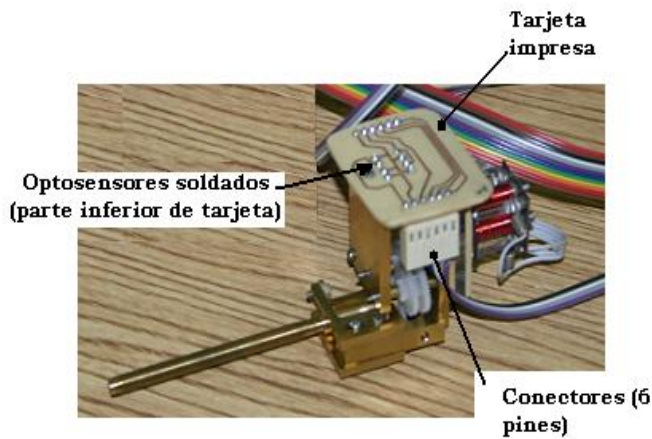


Figura 36. Tarjeta acoplada a la transmisión

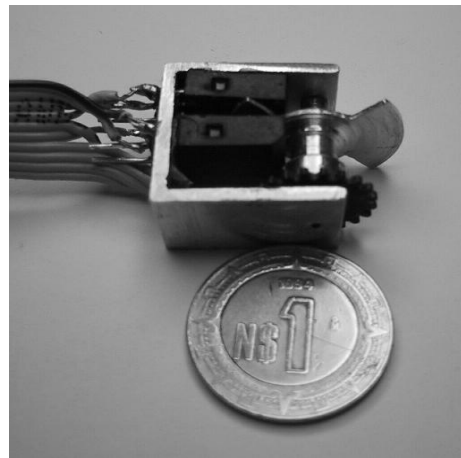


Figura 37. Optosensores y disco ranurado (encoder)[7].

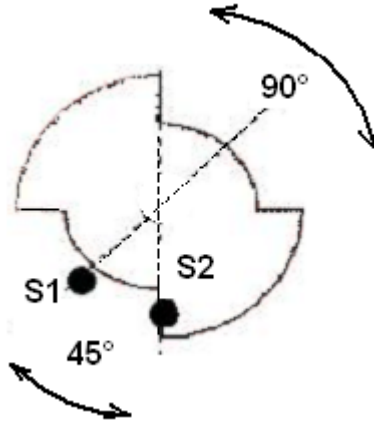


Figura 38. Geometría del encoder[7].

En consecuencia, el funcionamiento del arreglo es como sigue; uno de los conectores recibe las cuatro señales provenientes de la etapa de potencia (fases del motor), así como la alimentación de los fotodiodos y la tierra; mientras el motor gira con el disco ranurado acoplado, éste último periódicamente bloquea la luz monitoreada por el par de optosensores, los cuales están conformados por un fotodiodo y un fototransistor.

Al girar el disco se lleva a cabo el encendido y apagado de los sensores, dos veces por cada revolución, por ello, para que la secuencia de pulsos emitidos tengan el desfase de 90° , se tiene que reducir dos veces el giro del rotor con respecto al del disco, para lo cual se utilizo un juego de engranes de relación 2:1, así pues, se obtiene una información digital que sale por los pines 1 y 2 del conector 2 (figura 39).

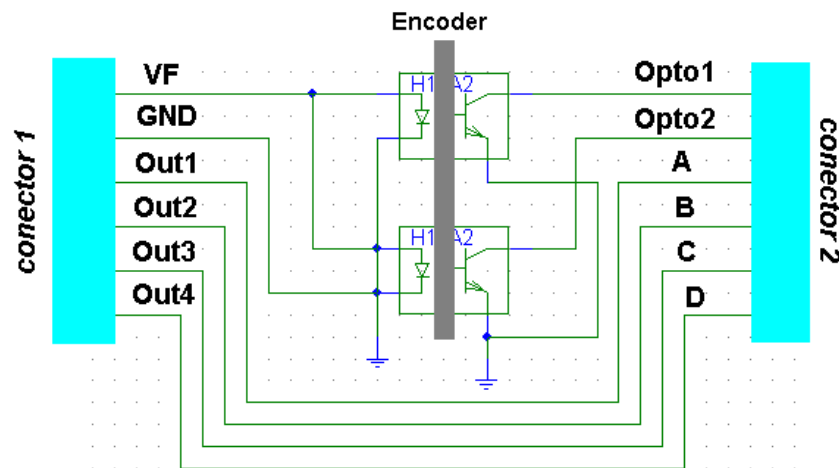


Figura 39. Circuito de sensado.

Esta información digital es transmitida al circuito lógico que encadenará el modo de operación de LA a LC. El circuito se muestra en la *figura 40* y es denominado *detector de flancos*, la finalidad de este *sistema de retroalimentación* es encadenar los trenes de pulsos generados tanto por el microcontrolador PIC como el generado por el detector de flancos, de tal forma que este último reemplace al primero, para que una vez terminada la operación a LA en la fase de *arranque*, sea ahora el tren de pulsos generado por el detector de flancos el que se proporcione al sistema de potencia (driver L297).

El detector de flancos es un arreglo de compuertas inversoras (SN74LS04), AND's (SN74LS32), OR's (SN74LS8) y capacitores, el cual tiene como entradas los dos trenes de pulsos generados por los optosensores, y cuya finalidad como su nombre lo dice, será detectar los flancos tanto de subida como de bajada de las entradas proporcionadas, esto genera un nuevo tren de pulsos, cuyo ciclo de trabajo está determinado por el retardo provocado por los capacitores.

Por último, mediante una compuerta OR se encadenarán (*switcheo*) los trenes de pulsos generados (PIC y detector de flancos) logrando así poder pasar de un tipo de control a otro, LA a LC [20].

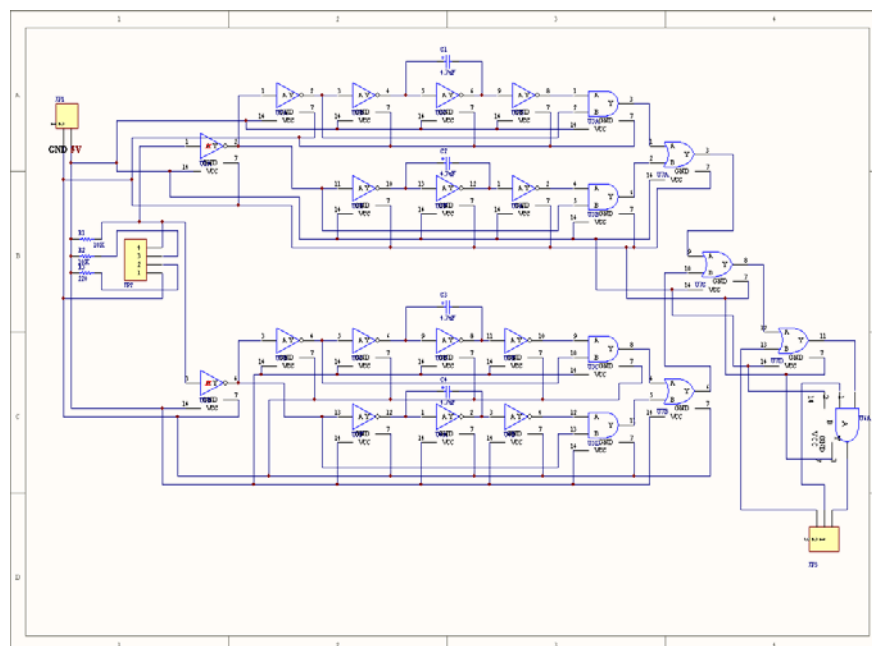


Figura 40. Detector de flancos.

En consecuencia a lo anteriormente mencionado, para iniciar la modalidad de **LC** se programó una rutina que ejecuta 50 pasos en el modo de LA (figura 41), esta acción pone a funcionar el actuador que provoca el movimiento del encoder, originando así que los optosensores generen la información digital para que la reciba el detector de flancos, después de esto, el motor permanecerá girando gracias al encadenamiento producido, y el programa de control dentro del PIC esperará a que se origine otra interrupción debido a la llegada de un nuevo carácter.

Durante el modo de **LC** es importante mantener el chequeo de los sensores de contacto, lo cual podría detener el proceso, y en el caso de que simplemente se deseará parar este modo, se manda a llamar a la rutina de ALTO que deshabilita los integrados del sistema de potencia.

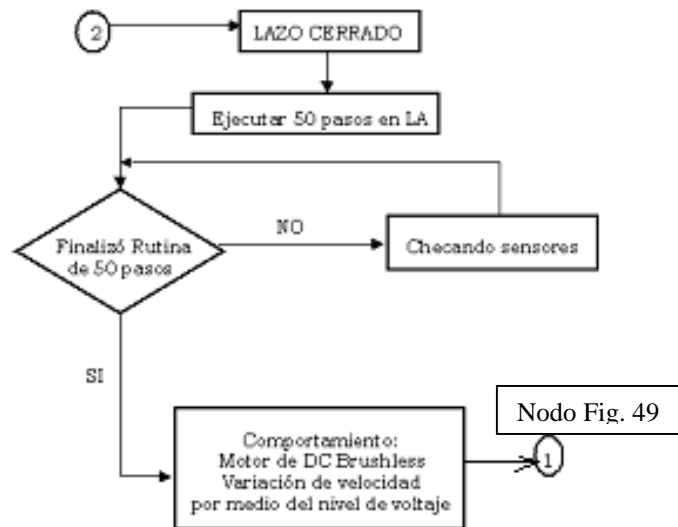


Figura 41. Diagrama de flujo para LC.

Es importante hacer notar que en todo momento estarán funcionando los elementos de retroalimentación (encoder, optosensores, detector de flancos, etc.), es decir, es como si el sistema siempre estuviera funcionando a LC. Para evitar el traslape de información digital (trenes de pulsos) a la salida del detector de flancos se agregó una compuerta AND en la cual una de sus entradas sería ocupada por la salida del detector de flancos, mientras que en la otra se registrará el estado del bit 4-PTOC (puerto C). De tal forma, que cuando éste sea un nivel lógico “0”, el sistema de control estará operando en LA, mientras que cuando el bit sea un “1” lógico estará en LC.

Variación de velocidad.

Debido a la retroalimentación implementada, se da una diferencia notoria entre el modo de operación a LA y LC, relacionada con la forma en la se *varía la velocidad* del sistema, mientras que en LA éste parámetro depende de la frecuencia del tren de pulsos generado internamente en el microcontrolador PIC, ahora en LC, la variación de la velocidad se hace por medio de una fuente de voltaje variable controlada digitalmente por el PIC, ya que en esta modalidad el actuador se comportará como un motor de corriente directa tipo *brushless*.

Así pues, se implementó una fuente variable (*figura 42*) que pudiese ser controlada por el PIC, basada en el C.I LM317HVK, Las especificaciones técnicas de este dispositivo son mostradas en la *tabla 3.7*. Éste C.I entrega un voltaje regulado de acuerdo al ajuste que recibe por el pin ADJ.

A esta etapa se le añadió una electrónica extra, con la cual se pudieran establecer incrementos predeterminados en el nivel de voltaje. Entonces, se procedió a configurar un control digital para dicha variación de voltaje, es decir, aplicar niveles lógicos ("1's" ó "0's"), a las bases de transistores, para que éstos conmutaran quedando la resistencia en paralelo. Para tener el control de encendido y apagado de la fuente se agregó un transistor más al pin ADJ.

Para calcular el valor de las resistencias en paralelo que determinarían el nivel de voltaje, se uso la *ec.3.4*, obtenida de hoja de especificaciones del dispositivo en cuestión. De tal forma esta fuente variable controlada digitalmente, nos proporcionará niveles de voltaje de los 12 a 25[V], con un posible consumo de hasta 2[A].

| Parámetro | LM317T | Unidades |
|---|--------|----------|
| Vout | 1,2-37 | [V] |
| Vin Máx | 40 | [V] |
| Iout | 1,5 | [A] |
| Pot | 15 | [W] |
| Voltaje de salida ajustable entre 1.2 _{MIN} y 37 [V] | | |
| Protección contra sobrecargas | | |
| Protección Térmica | | |

Tabla 3.7. Especificaciones Técnicas del LM317HVK

$$V_{OUT} = 1.25 \{ 1 + (R_2/R_1) \} [V]$$

Ec. 3.4. Voltaje de salida en función de R1 y R2.

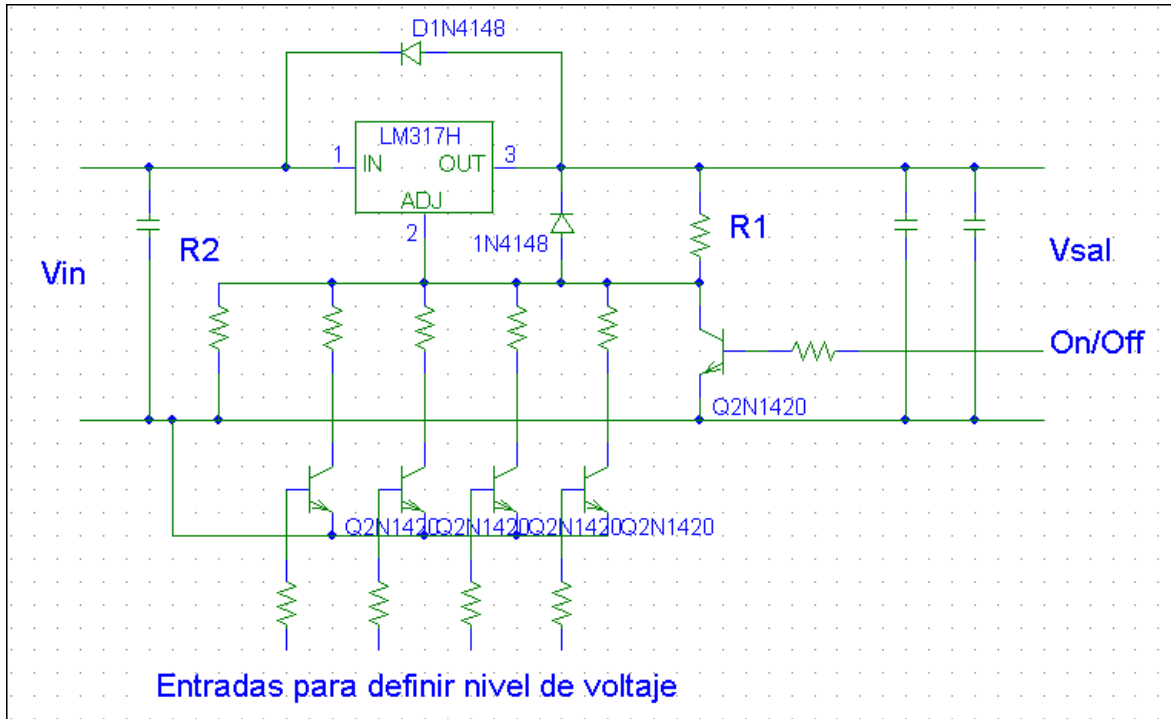


Figura 42. Esquema electrónico de fuente variable con el LM317.

En la *tabla 3.8* se muestran los valores de las resistencias que, de acuerdo a ciertas combinaciones, suministrarán los voltajes requeridos para la operación de los actuadores. Por otro lado, en la *tabla 3.9* se muestran los incrementos de los niveles de voltaje que es posible conseguir de esta fuente variable controlada por medio del microcontrolador PIC.

| Resistencia | Valor |
|-------------|-------------------|
| R1 | 240 [Ω] |
| R21 | 6.7 [k Ω] |
| R22 | 15. [k Ω] |
| R23 | 33 [k Ω] |
| R24 | 56 [k Ω] |
| R2 | 4.7 [k Ω] |

Tabla 3.8. Valores de resistencias comerciales.

| Entradas | | | | Voltajes [V] |
|----------|---|---|---|--------------|
| A | B | C | D | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 25.72 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 23.83 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 22.67 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 21.21 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 19.88 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 18.76 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 18.06 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 17.14 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 15.63 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 14.96 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 14.53 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 13.94 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 13.39 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 12.91 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 12.59 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 12.17 |

Tabla 3.9. Niveles de voltaje proporcionados por la fuente.

Para las entradas de la *tabla 3.9* se dispuso de los bits del PTO. A (4-5) y del PTO. E (0-3), de tal forma que cuando el sistema esté operando en LC, se mande la combinación adecuada de “1’s” y “0’s” para que inicie este modo en un nivel de voltaje de 12[V], y atendiendo a la *tabla 3.9*, ir incrementando dicho nivel para desarrollar más velocidad en el desempeño del actuador.

En consecuencia, en esta modalidad el número de señales de E/S empleadas en el proceso de control son 29 (PTOD 0-7; PTOB 0-2,4-7; PTOA 0-5; PTOE 0-2; PTOC 0-4). Por lo tanto, el SCLC nos interesa para alcanzar altas velocidades y hacer más eficiente los traslados de un punto a otro dentro el área de trabajo, y no consumir mucho tiempo en estas acciones, es decir, se pretende que el tiempo de producción de una pieza esté determinado por el tiempo que la MMH tarde en construir dicha pieza (estos procesos se realizarán en modo de LA ya que es suficiente la precisión que nos da el MPAP); y los tiempos empleados en acciones como moverse de un punto a otro, regreso a posición de origen, etc., sean optimizados con altas velocidades, haciendo uso de la operación a LC.

Posición de origen.

El retorno a *posición de origen* esta en una rutina que sigue un orden predeterminado por razones de seguridad. En primera instancia, retrocede en el eje Y hasta detectar la señal proveniente del sensor de contacto, una vez registrada ésta, ejecuta una rutina de 50 pasos en el mismo sentido, para después avanzar en sentido contrario hasta dejar de sensar. En seguida, se repite la misma secuencia para el eje X y finalmente para el eje Z (figura 43 y 44).

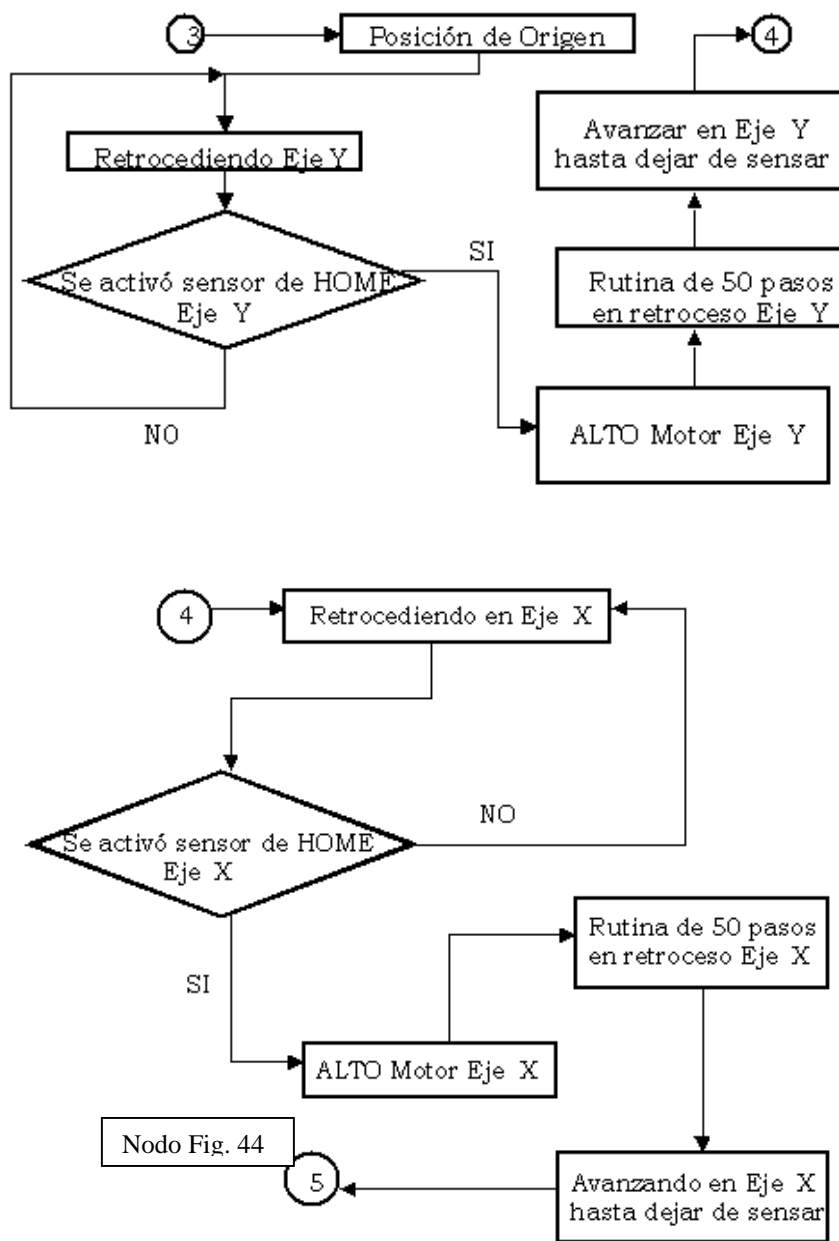


Figura 43. Diagrama de flujo para posición de origen.

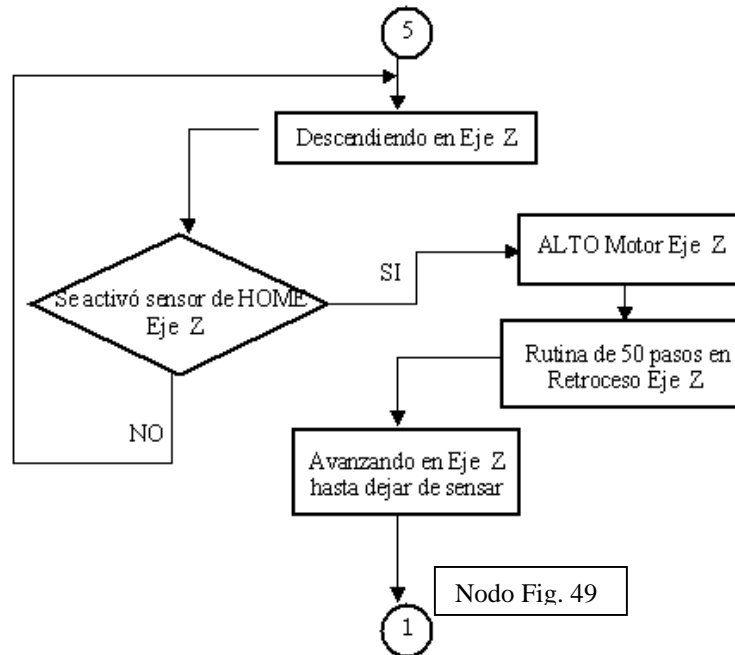


Figura 44. Diagrama de flujo para posición de origen.

INTERFAZ DE USUARIO.

En todo proyecto de control existe una interfaz que permite al operador tomar ciertas decisiones, que influyan de una manera o de otra en el proceso de control, es por eso que en este trabajo se programó una interfaz de usuario con el fin de operar los grados de libertad del microequipo mecánico controlado.

El software empleado fue Microsoft Visual Basic 6.0. Éste es un lenguaje de programación visual, orientado a eventos, con el cual se desarrollan aplicaciones complejas en periodos de tiempo cortos[2] y sin duda alguna, para la tarea a desarrollar es de gran utilidad. Con esto y toda la electrónica anteriormente implementada y descrita, los recursos de la PC se limitan a tareas de monitoreo y envío de señales de activación, durante todo el proceso de control. Por lo tanto, la interfaz de usuario cuenta con:

- ✓ Una página de inicio, (figura 45).
- ✓ Un formulario para elegir que MMH desea controlar (figura 46);
- ✓ Un formulario para la elección de la modalidad de funcionamiento (figura 47).
- ✓ Un joystick (figura 48), para LA ó LC, con el cual el usuario podrá operar los grados de libertad de la MMH.

Obteniendo además, ciertos parámetros como la cantidad de pasos recorrida por cada uno de los actuadores dentro del espacio de trabajo y además, se cuenta con un botón para enviar a todos los ejes a la posición de origen.



Figura 45. Página de inicio.



Figura 46. MMH a controlar.

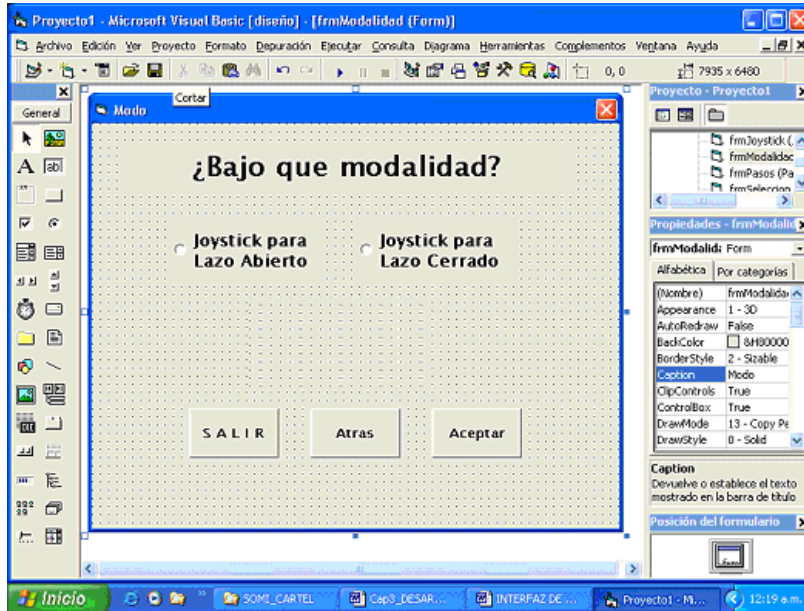


Figura 47. Modalidad de funcionamiento.

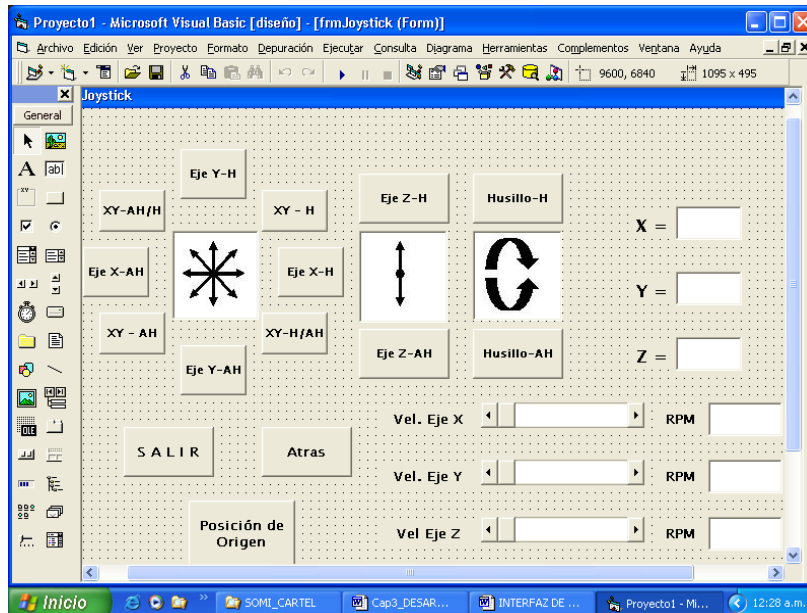


Figura 48. Funcionamiento por joystick.

En consecuencia, los puntos anteriores se plasman en el siguiente diagrama de flujo (figura 49 y 50). En donde primeramente se despliega la página de inicio la cual se oculta al oprimir cualquier tecla; enseguida, se despliega el formulario que permite seleccionar el microequipo a controlar.

El *prototipo lineal* es controlado únicamente a LA y en éste se operan los grados de libertad a una frecuencia predeterminada de 200Hz, en sentido horario y antihorario, además existe la opción de mandar todos los actuadores a una posición de origen previamente determinada, en donde se verifica constantemente el estado de los sensores de contacto. Mientras que el *prototipo de paralelogramos* se puede controlar a LA y LC.

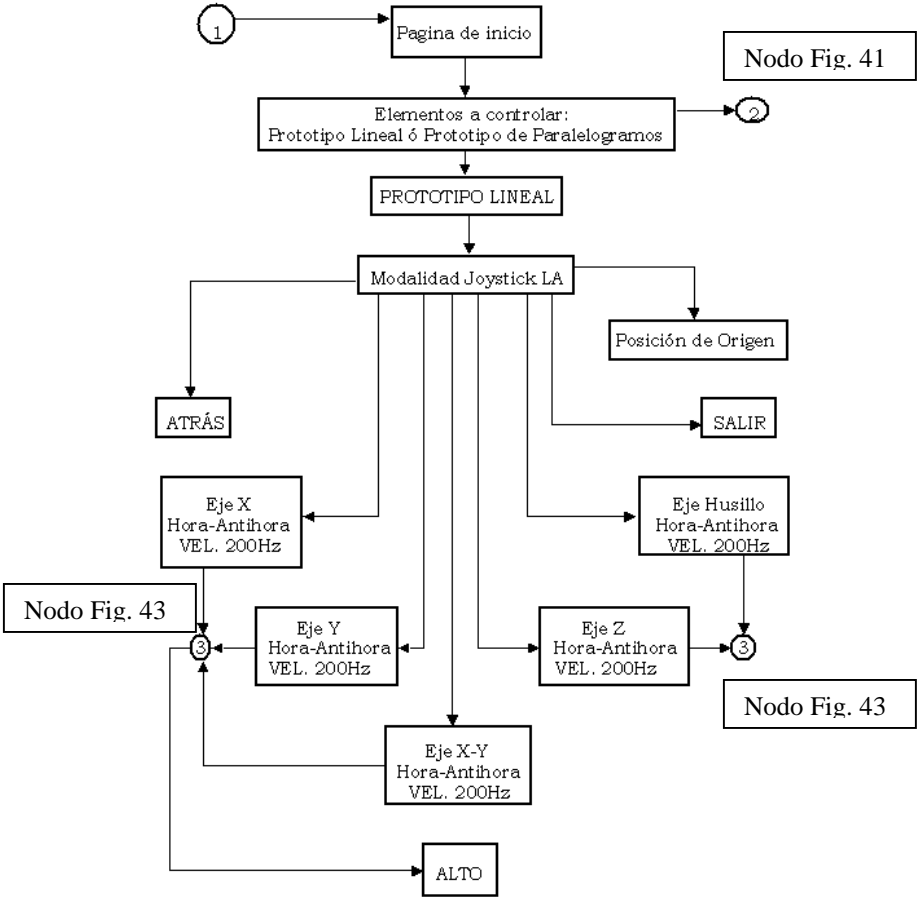


Figura 49. Diagrama de flujo para la interfaz de usuario.

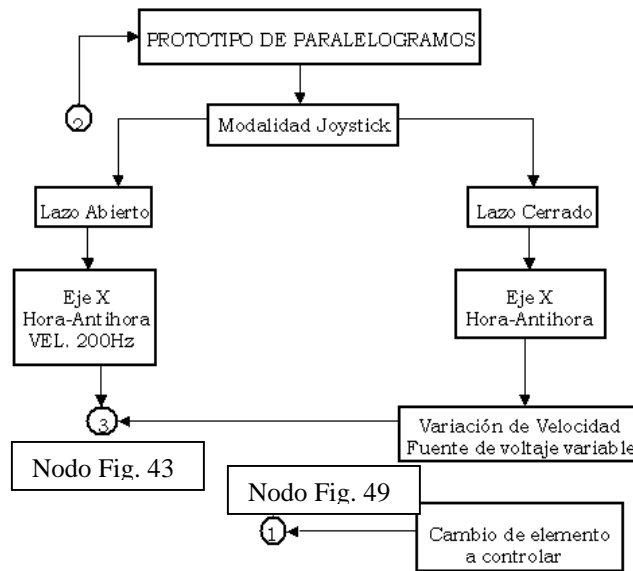


Figura 50. Diagrama de flujo para la interfaz de usuario.

Vía de comunicación.

La comunicación entre la interfaz de usuario y la tarjeta de control es fundamental, y a diferencia del sistema de control actual, en donde se utiliza la comunicación paralela, y el hecho de que este tipo de comunicaciones exijan demasiado cableado para ser operativas, se propone una comunicación serial (secuencial) a través del módulo USART del PIC, es decir un bit al tiempo, utilizando menos líneas de transmisión que en la paralela.

Para ello se usa la norma RS232. Esta fue originalmente diseñada para conectar terminales de datos con dispositivos de comunicación, como módems. Actualmente, los usos de ésta en el entorno doméstico son muchos y ampliamente conocidos (ratón, fax, agendas electrónicas, grabadores de memorias, etc.) Por lo tanto, esto nos habla que la norma serie RS232 sigue siendo por su sencillez, su diseño económico y, sobre todo por su gran difusión, la norma más frecuente para comunicación entre dispositivos electrónicos y computadoras[16].

Por lo tanto fue necesario un conector DB-9 hembra, el cual en sus extremos está configurado como se muestra en la figura 51. En consecuencia, las señales generadas por la interfaz de usuario que salgan a través del puerto serie de la PC (COM1, COM2, etc.) llegarán directamente a la tarjeta de control para llevar a cabo alguna tarea en particular.

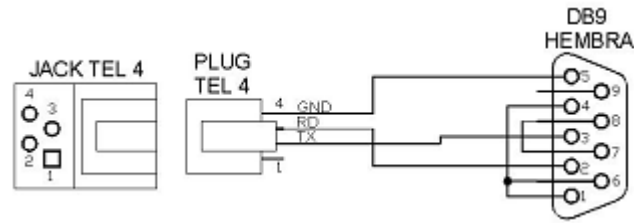


Figura 51. Cable para comunicación serial.

El conjunto de caracteres generados y transmitidos a la tarjeta de control por la interfaz de usuario, se muestran en la *tabla 3.10*. dichas señales de activación son generadas con el fin de activar las rutinas correspondientes a la tarea que el usuario quiera realizar.

Sin embargo, las señales enviadas necesitan una modificación ya que el puerto RS232 maneja niveles de voltaje que están entre +12 [V] y -12 [V], de tal manera que un “0” lógico es manejado cuando la terminal esta entre +9 y +12[V], mientras que un “1” lógico se da cuando los niveles de voltaje estén entre -9 y -12[V][16]. Mientras tanto, la tarjeta de control maneja niveles lógicos TTL (Transistor-Transistor Logic), por lo cual, se necesita que las señales de activación generadas se acoplen a los niveles lógicos manejados por esta tarjeta y viceversa.

Cuando se describió la tarjeta de control se mencionó el C.I. MAX232, de la firma MAXIM, éste permite hacer la conversión de los niveles TTL a los del estándar RS-232 cuando se hace una transmisión de datos del PIC hacia el puerto serie de la PC, y cambia los niveles RS-232 a TTL cuando hay una transmisión de datos del puerto serie hacia el PIC16F877.

Este C.I. dispone de dos canales de entrada para niveles TTL, que son el T1IN y el T2IN, con sus correspondientes salidas, R1OUT y R2OUT. Igualmente posee dos canales de entrada para niveles RS-232 R1IN y R2IN y sus correspondientes salidas TTL, T1OUT y T2OUT, los cuales se muestran en la *figura 52*.

| Datos en Binario | DESCRIPCION |
|-------------------------|---|
| 1 | Modo de Joystick a LA (modo 1). |
| 2 | Modo de Joystick a LC (modo 2). |
| 3 | Motor X en sentido horario a LA en modo 1, y a LC en modo 2. |
| 4 | Motor Y en sentido horario a LA en modo 1, y motor X en antihora en modo 2. |
| 5 | Motor Z en sentido horario a LA. |
| 6 | Motor HUS en sentido horario a LA. |
| 7 | Motor X en sentido antihorario a LA. |
| 8 | Motor Y en sentido antihorario a LA. |
| 9 | Motor Z en sentido antihorario a LA. |
| 10 | Motor HUS en sentido antihorario a LA. |
| 11 | Motor HUS y Y en sentido horario a LA. |
| 12 | Motor HUS y Y en sentido antihorario a LA. |
| 13 | Posición de origen. |
| 14 | ALTO. |
| 15 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 1Hz. |
| 16 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 20Hz. |
| 17 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 40Hz. |
| 18 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 60Hz. |
| 19 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 80Hz. |
| 20 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 100Hz. |
| 21 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 120Hz. |
| 22 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 140Hz. |
| 23 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 160Hz. |
| 24 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 170Hz. |
| 25 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 180Hz. |
| 26 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 190Hz. |
| 27 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 200Hz. |
| 28 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 210Hz. |
| 29 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 220Hz. |
| 30 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 210Hz. |
| 31 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 220Hz. |
| 32 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 210Hz. |
| 33 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 220Hz. |
| 34 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 230Hz. |
| 35 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 240Hz. |
| 36 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 250Hz. |
| 37 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 260Hz. |
| 38 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 270Hz. |
| 39 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 280Hz. |
| 40 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 290Hz. |
| 41 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 300Hz. |
| 42 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 310Hz. |
| 43 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 320Hz. |
| 44 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 330Hz. |
| 45 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 340Hz. |
| 46 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 350Hz. |
| 47 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 360Hz. |
| 48 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 370Hz. |
| 49 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 380Hz. |
| 50 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 390Hz. |
| 51 | Motor X en sentido Horaio a LA a una frecuencia de 400Hz. |

Tabla 3.10. Caracteres generados por la interfaz.

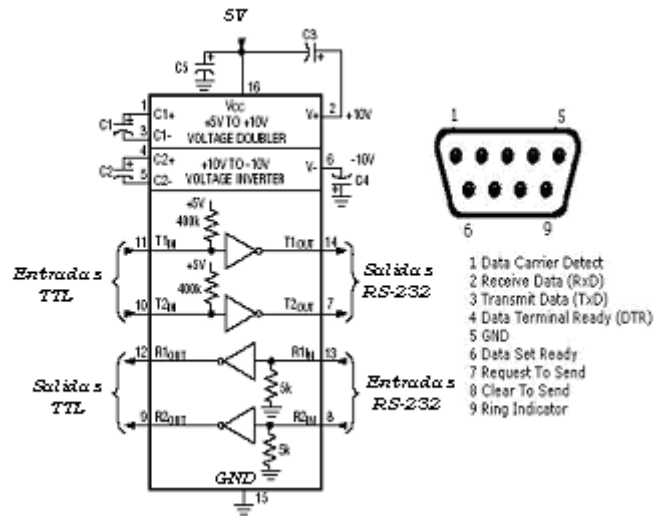
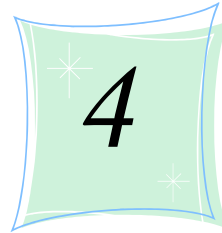


Figura 52. A la izquierda el circuito MAX232, y a la derecha el conector DB9

En el siguiente capítulo se describirán las pruebas realizadas al sistema micromecánico controlado, y se reportarán los resultados obtenidos a partir de éstas.

Capítulo



PRUEBAS Y RESULTADOS.

Debido a que los MPAP son dispositivos mecánicos, deben vencer ciertas inercias para comenzar a girar, por lo que el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta. En tal sentido, el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas:

- ✓ Puede que no realice ningún movimiento en absoluto.
- ✓ Puede comenzar a vibrar pero sin llegar a girar.
- ✓ Puede girar erráticamente.
- ✓ Puede llegar a girar en sentido opuesto.

Por lo tanto, para obtener un arranque suave y preciso es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja, y gradualmente ir incrementando hasta determinar cuál es la velocidad máxima tolerada [14].

De tal forma, las pruebas realizadas se dividen en cuatro categorías atendiendo a la bimodalidad del sistema y el comportamiento térmico de los actuadores:

- ✓ Señales del hardware electrónico.
- ✓ Pruebas a LA.
- ✓ Pruebas a LC.
- ✓ Temperatura máxima.

Señales del hardware electrónico.

Como se pudo observar en el *capítulo 3*, el diseño a detalle del sistema propuesto está conformado por una serie de etapas, en donde cada una de éstas cuenta con circuitos electrónicos. La evaluación de éstos últimos consistió en capturar el estado de las señales proporcionadas durante la operación del sistema.

Primeramente, se obtuvo una muestra del tren de pulsos generado por el microcontrolador PIC (reloj del sistema), correspondiente al eje X (*figura 53*). Cabe mencionar que para la tarjeta de control se utilizó una fuente independiente al resto del sistema con el fin de aislar lo más posible el dispositivo de control.

Enseguida se procedió a capturar las señales generadas por los C.I's de la etapa de potencia, L297 y L298N, y la relación de éstos con reloj del sistema (*figuras 54, 55 y 56*). Esta etapa tiene dos niveles de alimentación, uno para la lógica interna (5V) y otro destinado para la carga a soportar (10V).

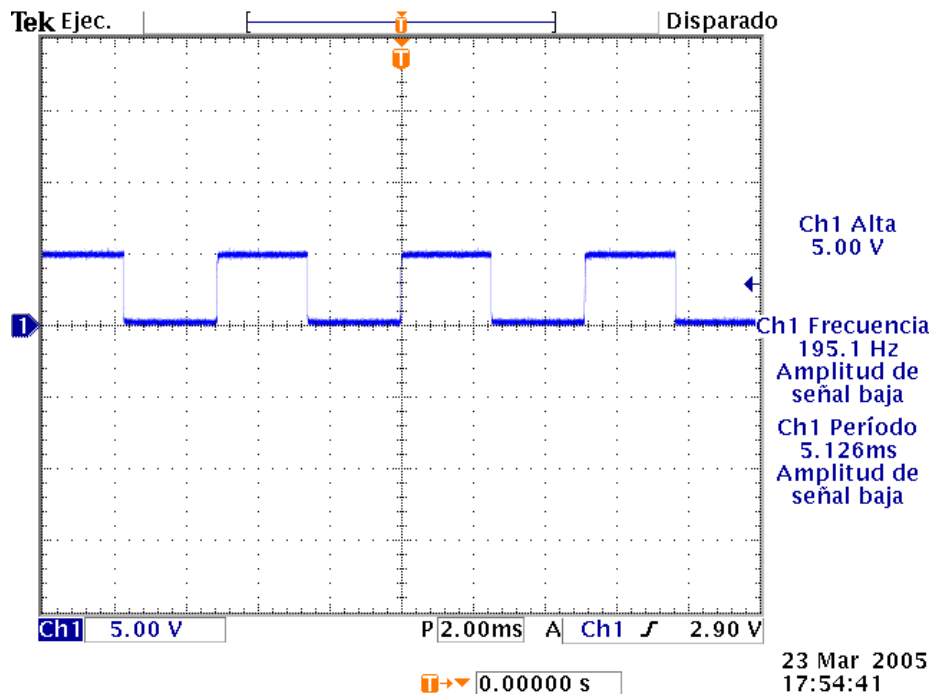


Figura 53. Tren de pulsos generado por el microcontrolador PIC

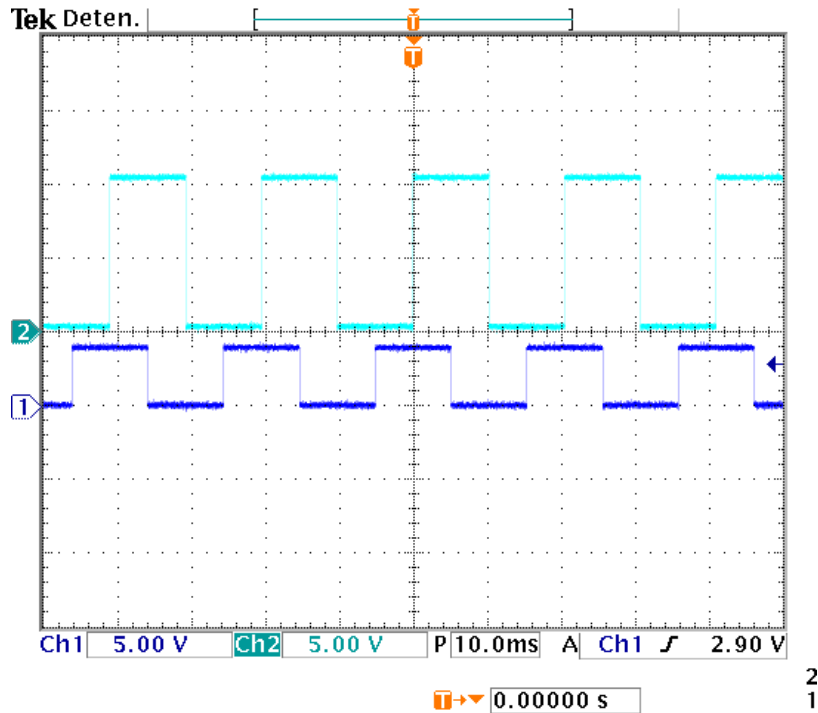


Figura 54. Salidas del L297(ch1) y L298N(ch2).

En la figura anterior se puede observar que las señales tienen un desfase, el cual es debido al tiempo que tarda en retroalimentarse el sistema, proceso que empieza desde la señal generada por el L298N hasta el momento en el que el driver L297 recibe la señal de reloj para generar la secuencia correcta de giro de los actuadores.

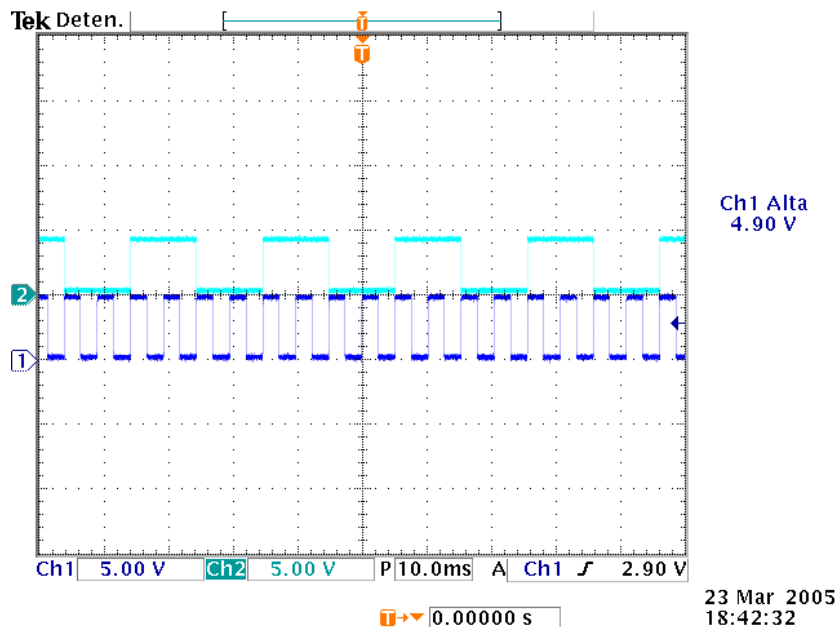


Figura 55. Salidas del L297(ch1) y el reloj del sistema(ch2).

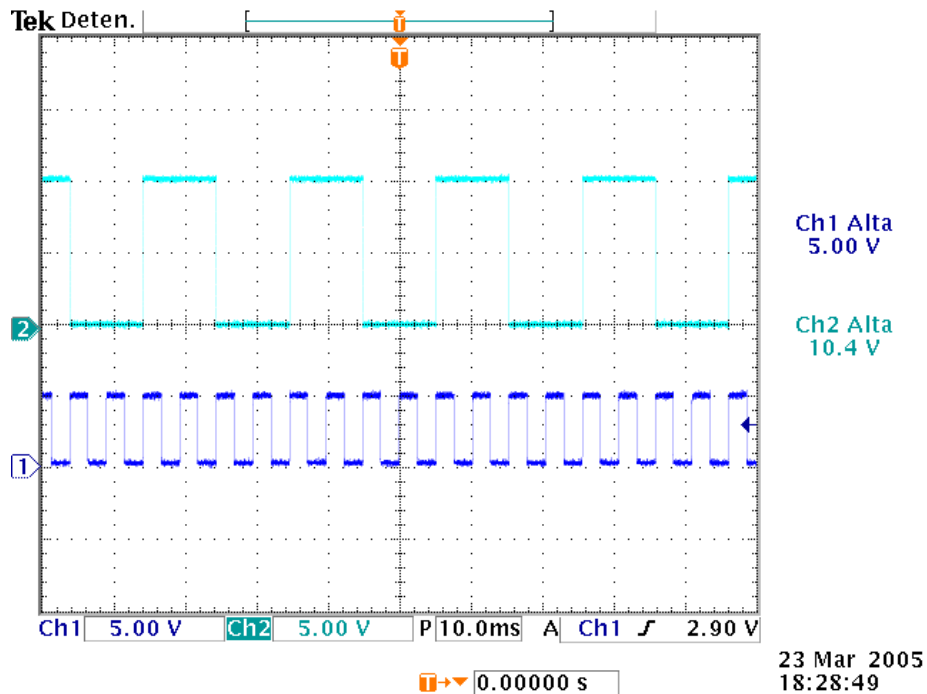


Figura 56. Salidas del L298N(ch1) y el reloj del sistema(ch2).

En las figuras 55 y 56 se puede apreciar el reloj del sistema comparado con las señales de salida del L297 y L298N, respectivamente, de lo cual se puede ver que cada 4 pulsos del PIC se genera 1 por parte de los dos integrados, debido al modo en el que se encuentra operando el driver L297, modo de paso completo.

Por lo tanto, una vez generados los cuatro trenes de pulsos que alimentan a cada una de las cuatro bobinas de los actuadores, se procedió a capturar las señales generadas por el arreglo encoder-optosensores, montado en la tarjeta impresa acoplada a la transmisión del micromotor, en donde podemos observar el desfase de 90° del que se habló en el capítulo 3 (figura 57).

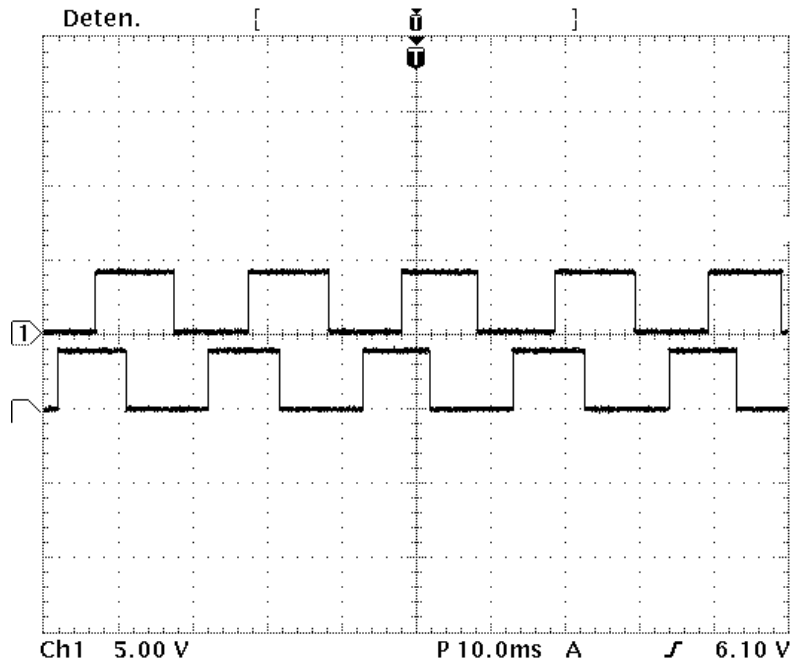


Figura 57. Salida de optosensores.

Las señales generadas por el *detector de flancos* están comparadas con las señales de los optosensores, de donde se observa como éste circuito genera un pulso muy angosto en cada flanco de subida y de bajada (*figura 58*) además, en la *figura 59* se anexa a estas tres señales la del microcontrolador PIC.

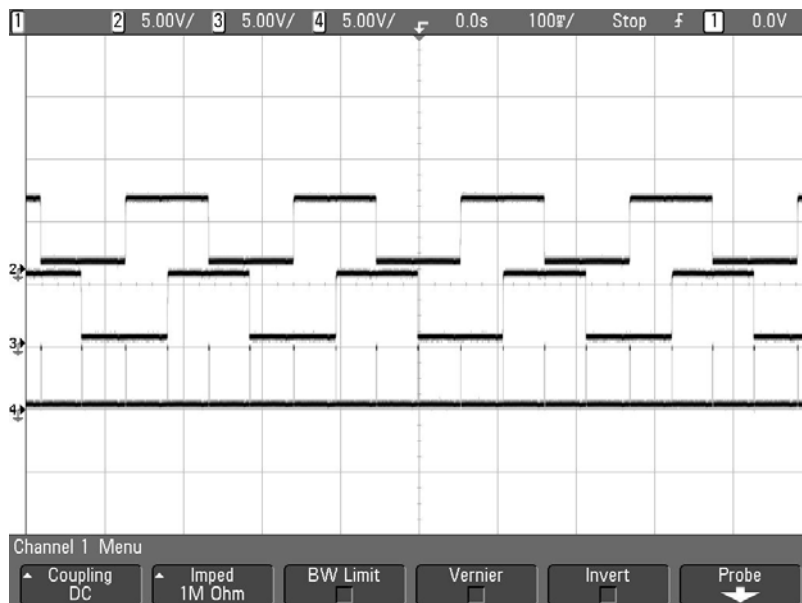


Figura 58. Salidas de optosensores(arriba) y detector de flancos(abajo).

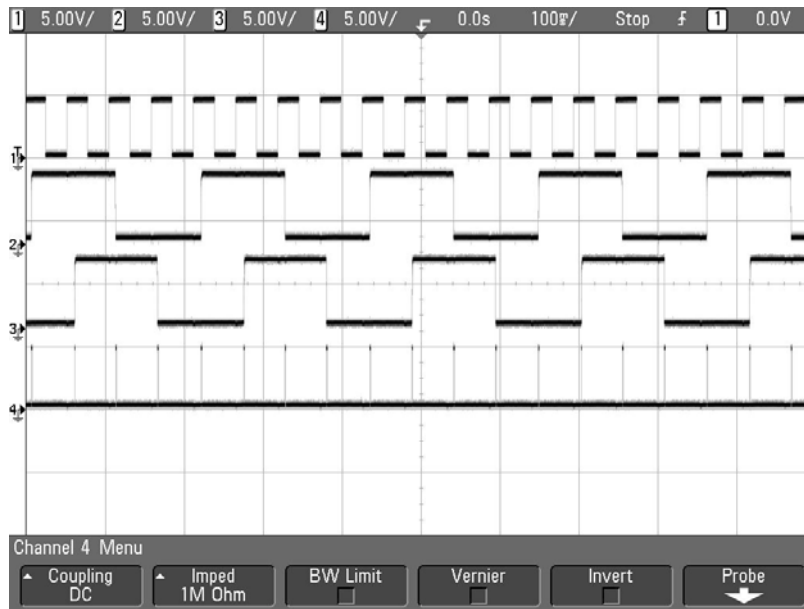


Figura 59. Reloj PIC(arriba), salidas de optosensores(en medio) y detector de flancos(abajo).

Una vez que se observó el correcto funcionamiento del hardware electrónico se procedió a realizar las pruebas con el equipo micromecánico, llevándose a cabo primeramente las de LA y enseguida las de LC.

Pruebas a LA.

Las pruebas que se realizaron a LA están basadas en el aumento gradual de la frecuencia del tren de pulsos generado por el PIC, el rango de variación va desde 1[Hz] hasta 400[Hz], con incrementos de 10[Hz]. Esto permitió caracterizar, en el prototipo lineal, los actuadores correspondientes al eje *Y* y al *Husillo*, mientras que en el prototipo de paralelogramos se caracterizó uno de sus ejes (*X*), con el fin de evaluar la bimodalidad del sistema. Cabe mencionar que estos actuadores están en fase de perfeccionamiento, ya que en su operación suelen presentar variaciones de par, lo cual trae como consecuencia pasos no uniformes. Algunos detalles como la no equidistancia entre el rotor y los estatores, provocan que el desempeño del actuador sea impreciso.

La frecuencia calculada y programada por las *ecs. 3.2 y 3.3*, en el dispositivo de control, se tomaron como dato teórico; y la frecuencia de la señal resultante representó el dato experimental. Como resultado, los motores de los prototipos en cuestión giraron sin complicaciones hasta los 390[Hz] (5850 RPM's) en el prototipo lineal, y 397[Hz] (5955 RPM's) en el

prototipo de paralelogramos, con una alimentación de 10[V] y un consumo de 0.45[A]; arriba de estas frecuencias comenzaron a oscilar y perder pasos (figura 60, 61 y 62).

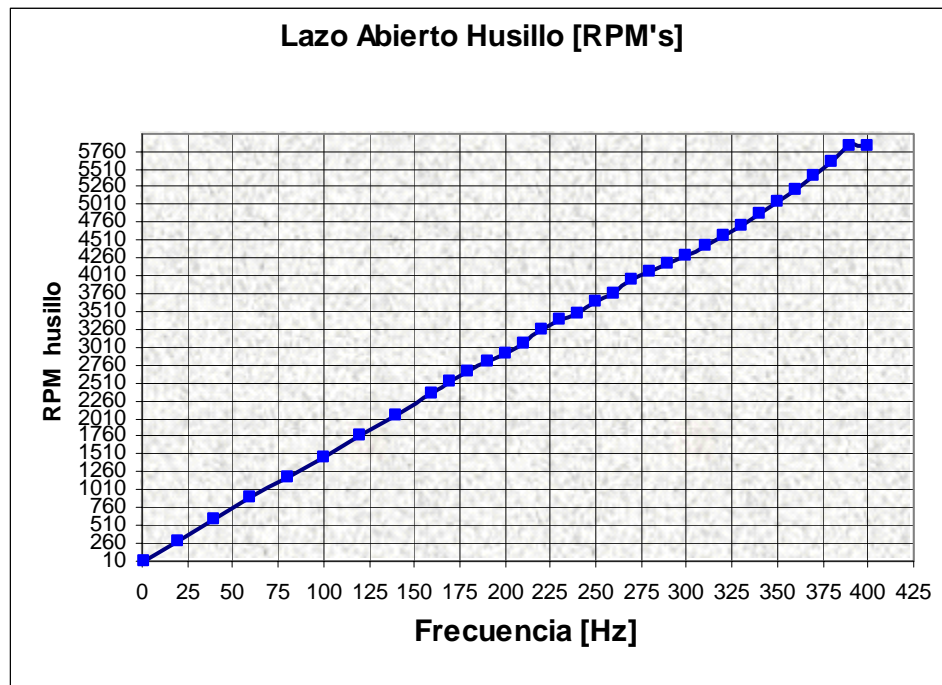


Figura 60. Rango de velocidad alcanzado a LA del Husillo (Prototipo lineal).

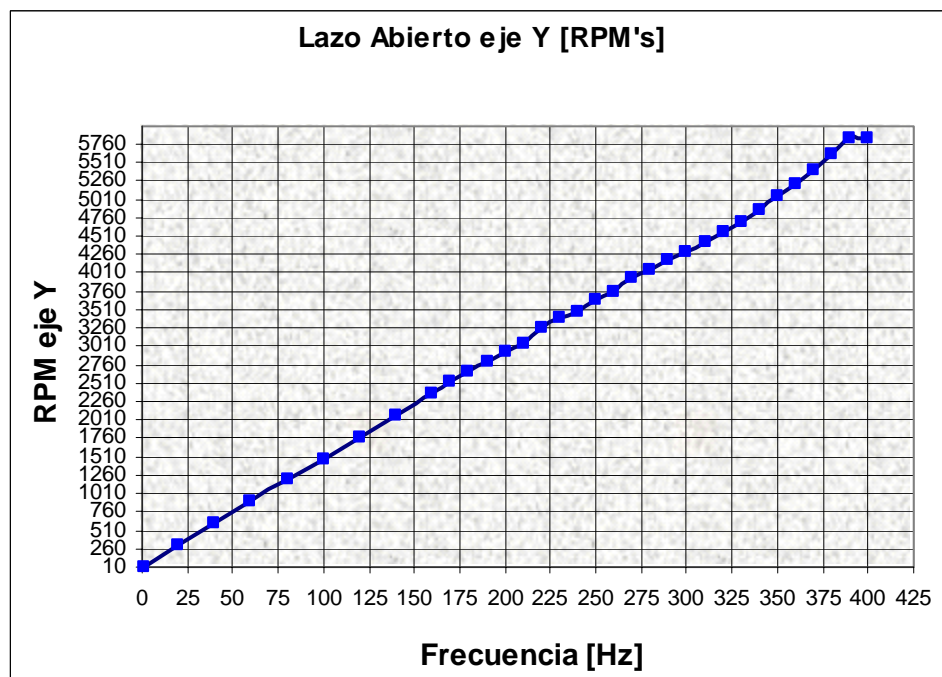


Figura 61. Rango de velocidad alcanzado a LA del eje Y (Prototipo lineal).

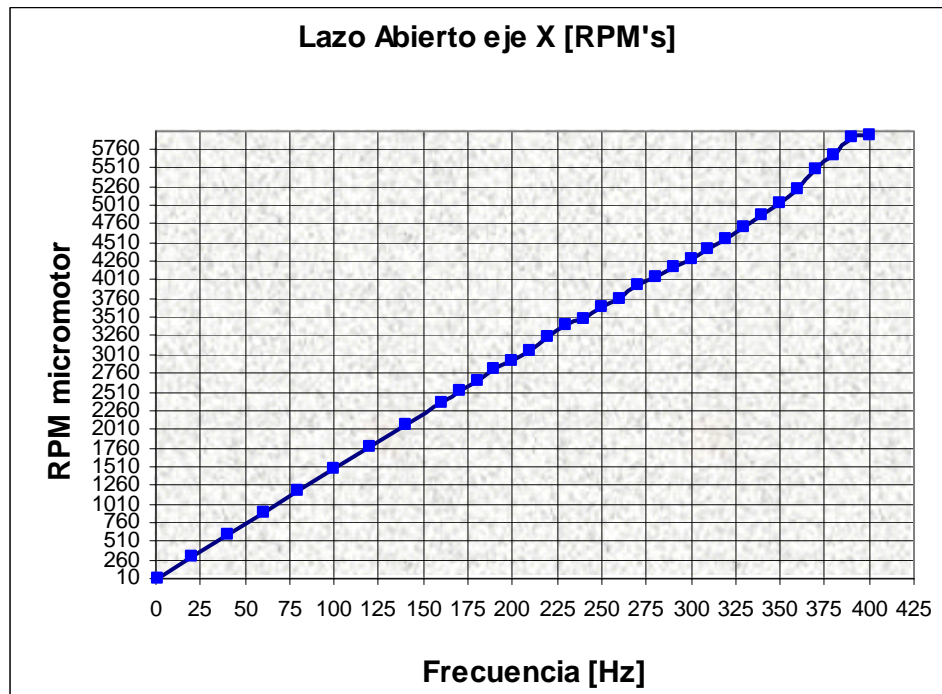


Figura 62. Rango de velocidad alcanzado a LA del eje X (Prototipo de paralelogramos).

Pruebas a LC.

Debido a la falta de hardware para la retroalimentación en el prototipo lineal, la *prueba a LC* se realizó sólo con el eje X del prototipo de paralelogramos.

Aquí básicamente, el proceso consistió en incrementar unitariamente el nivel de voltaje, de 8[V] a 25[V], y así pues, ir tomando la lectura de la frecuencia del tren de pulsos generado por el detector de flancos, para después graficar la relación de voltaje contra RPM's alcanzadas (*figura 64*).

Para esta prueba y en la de LA (sólo en el prototipo de paralelogramos), se utilizó una etapa de potencia (*figura 63*), separada de las cuatro que conforman el sistema de potencia, debido a que éste experimentó señales de ruido que alteraban el funcionamiento de los actuadores, haciéndolos cambiar de dirección sin motivo aparente.

Este modo comenzó a funcionar con un voltaje mínimo de 8[V] con un consumo de 0.4[A] obteniéndose 5900 RPM's, para después obtener las 20250[RPM's] a los 25[V] con un consumo de 1.2[A], sin embargo, el

actuador sufrió un fuerte incremento en su temperatura a partir de los 23[V].

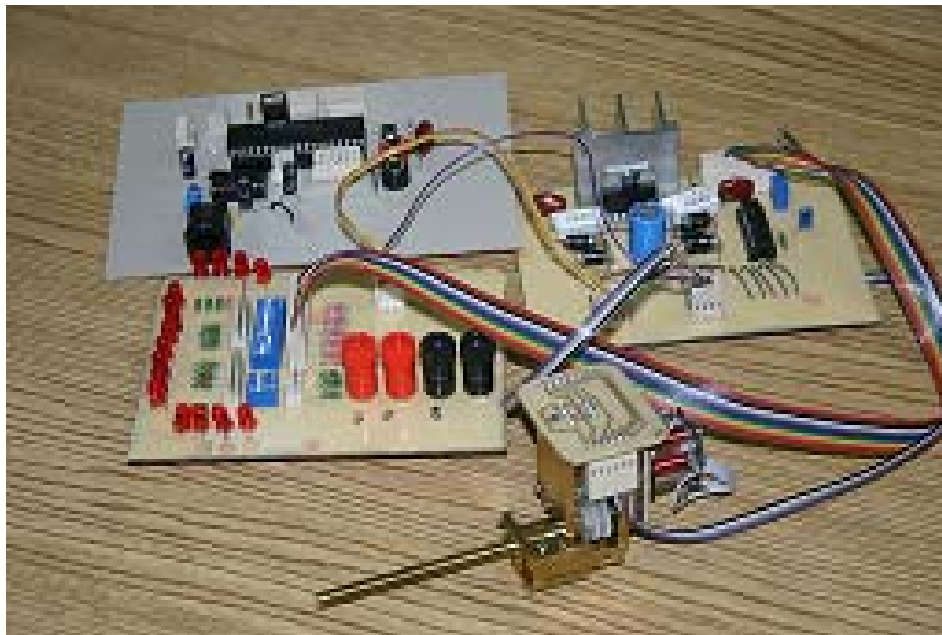


Figura 63. Sistema para pruebas, LA y LC, de la 2da. MMH.

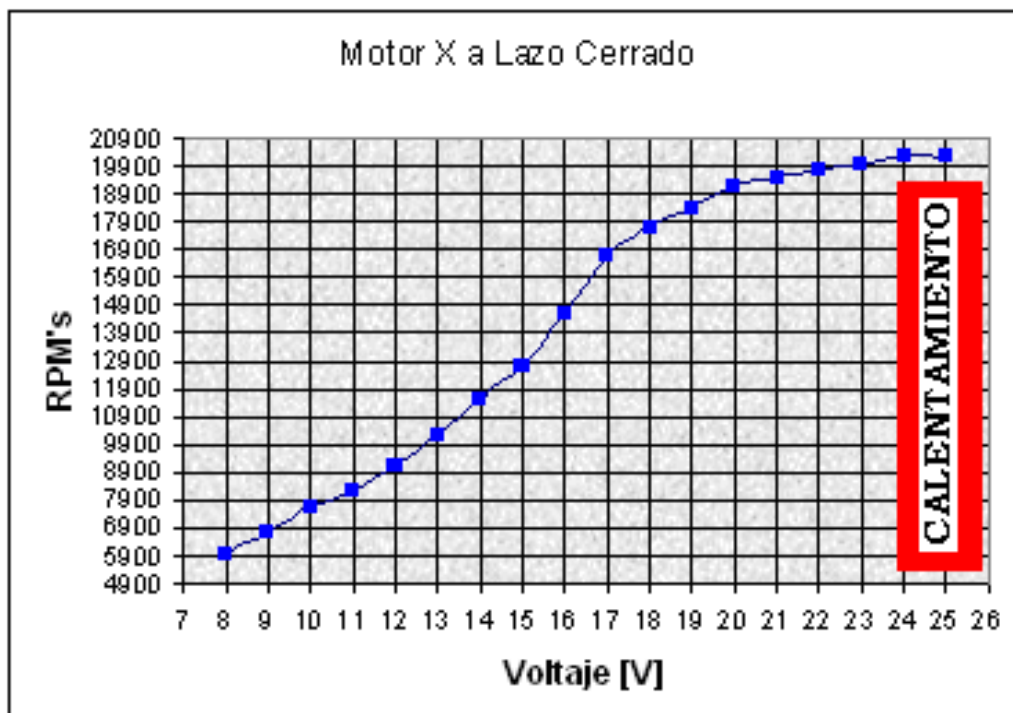


Figura 64. Rango de velocidad alcanzado a LC del eje X (Prototipo de paralelogramos).

Temperatura máxima.

Durante la operación del micromotor a LC y debido a las altas revoluciones alcanzadas, la temperatura en el actuador se incrementó de manera significativa a partir de los 23[V], en donde se registraron 40.4[°C]; de tal forma que al llegar a los 25[V], la temperatura que se registró fue de 46.2[°C] lo cual ya no resulta conveniente para la operación del actuador.

Por lo tanto, se ha determinado que el motor debe operar por debajo de los 45[°C], y en caso de operarlo a temperaturas mayores es necesario adaptarle un medio de disipación como lo pudiese ser un disipador montado en un ventilador.

CONCLUSIONES.

Con este trabajo se cumple satisfactoriamente la implementación de un sistema de control alternativo, basado en un microcontrolador PIC, que opera equipo micromecánico desarrollado en el LMM. Además, se deja sentada la base para incrementar el número de grados de libertad a controlar, sin la necesidad de aumentar también el número de computadoras.

A su vez, se realizó un par de investigaciones comparativas con buenos resultados en donde se describió brevemente los sistemas de control más sobresalientes en el campo de la MMH's. También, una vez que se determinaron las necesidades y señales requeridas para la operación de los actuadores, se seleccionó una nueva alternativa tecnológica dentro de los diferentes dispositivos programables propuestos en una línea de investigación que se viene desarrollando en el LMM (*desarrollo de microequipo automatizado*), aunque en realidad se pretende seguir experimentando con cada una de éstas alternativas tecnológicas y en un futuro no muy lejano, analizar y comparar los diferentes resultados arrojados por cada una de éstas.

Dentro del desarrollo de este trabajo se planteó un diseño conceptual, el cual permitió establecer, implementar y probar la electrónica del sistema propuesto correspondiente al hardware de control externo. Este respondió de manera satisfactoria (señales obtenidas en pruebas y resultados), permitiendo la correcta operación de cada uno de los ejes del microequipo controlado, así como el correcto sensado en el retorno a la posición de origen y la variación de la velocidad.

Los elementos de retroalimentación propuestos e implementados cumplieron su propósito, proporcionando en LA un rango de operación de las 10 a las 5800[RPM's] y además, la información digital necesaria para la operación a LC alcanzando altas velocidades, desde las 5900 hasta las 20250[RPM's].

Sin embargo, es importante hacer notar que durante la operación en este modo, se registró un incremento considerable en la temperatura de los actuadores empleados a partir de los 23[V] (40.4°C), alcanzando los 45[°C] en los 25[V] de operación. Esto ya no es recomendable para la operación del sistema, por lo cual se ha decidido operar a los actuadores 20% por debajo de su frecuencia de operación máxima, y en caso de ser necesario adaptar un disipador con ventilador.

El sistema de control implementado, además de ser probado con una interfaz de usuario, también se probó con una interfaz para convertir el código G y M (*código numérico estándar que utilizan las máquinas con Control Numérico asistido por Computadora-CNC*), a instrucciones utilizadas por el microcontrolador PIC, logrando por el momento con esta interfaz desarrollar trazos circulares.

TRABAJO A FUTURO.

El trabajo a futuro se centra en tres puntos. El primero consiste en migrar a la familia de gama alta, PIC18F8720, con lo cual tendremos la oportunidad de ampliar el número de entradas/salidas del sistema, controlando más grados de libertad, siendo más específicos los dos prototipos de MMH's (8 grados de libertad), el prototipo lineal y el prototipo de paralelogramos.

El segundo punto es seguir experimentando con las diferentes alternativas tecnológicas aquí propuestas, con el fin de obtener la más viable para el control de microequipo y sobre todo, para la automatización de una microfábrica sobre mesa.

El probar las conexiones USB (*Universal Serial Bus*) para el control de las MMH's, sería el tercer punto a desarrollar; con el fin de ver el desempeño de estos puertos aplicado al control de microequipo.

Por lo tanto, se puede decir que el perfeccionamiento del sistema de control en las diferentes alternativas, permitirá al primer microcentro de maquinado, mas allá de ser un proyecto piloto en el desarrollo de micromáquinas en México, consolidarse como un prototipo viable en la producción de micropartes que requieren los diferentes campos de la industria, así como el uso de éste en la producción de futuros prototipos de microcentros de maquinado, el cual es uno de los fines principales de esta nueva tecnología.

REFERENCIAS.

- [1] Newton C. Braga. Robotics, Mechatronics and Artificial Intelligence. Editorial Newnes. USA 2002.
- [2] Francisco. Javier Ceballos. Curso de programación de Visual Basic v6.0 Edit. Alfaomega.
- [3] Alberto Caballero Ruiz. Caracterización de un microcentro de maquinado de bajo costo. Tesis de maestría, área mecánica. Septiembre 2000.
- [4] Leopoldo Ruiz Huerta. Diseño y construcción de un microcentro de bajo costo. Tesis de maestría, área mecánica. Septiembre 2000.
- [5] <http://www.etek.chalmers.se/~e6lazze/mems/idb.fm.html>
- [6] Pedro J. Esteban. Microfactory Approach in Japan. 2nd Internacional Workshop on Microfactories. Octubre 2000. Fribourg, Switzerland.
- [7] Muñoz Leines Carlos, Santos Carrasco César. Empleo de FPGA's para el sistema de control de motores de pasos bimodales en micromecánica. Tesis de licenciatura, área electrónica analógica. Mayo 2003.
- [8] Microsoft Encarta 96 Encyclopedia. "Automation", 1993-1995.
- [9] Sumio Ito, Daisuke Iijima, Akira Hayashi, Hisayuki Aoyama y Masashi Yamanaka. NC Micro-Lathe for microfactories. Mechanical Engineering Laboratory, Japón 1996.
- [10] Kimiyuki Mitsui, Tosía Shiramatsu y Masayoshi Kawada. Development of Measuring Method for 3D Shapes and Dimensions of microcomponent. Mechanical Engineering Laboratory, Keio University, Japón.
- [11] Tokuji Kuronita y Shigeru Tadokoro, Hisayuki Aoyama. Swarm Control for Automatic Drilling Operation by Multiple Micro Robots. MEL. University of Electro-Communications. Noviembre 2001. Tokio, Japón.
- [12] Ruiz L., Kussul E., Caballero A., 2002, Guidelines for low cost Micromechanis. En ASPE XVII Annual Meeting, (Eds.), St. Louis, Missouri. pp. 228-233.
- [13] W. Bolton. Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Editorial Alfaomega. 2da. Edición.

- [14] <http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/steppertutorial.htm>
- [15] Benjamín C. Kuo. Sistemas de Control Automático. Editorial Prentice. Séptima edición 1996.
- [16] W. Stallings. Comunicaciones y Redes de Computadores. Capítulo 5: “La interfaz en las comunicaciones de datos”. Editorial Prentice Hall (1997). 5^{ta}. edición.
- [17] Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. José M.^a Angulo Usategui. Ignacio Angulo Martínez. Editorial Mc Graw Hill, 2da. Edición.
- [18] Beatriz Cristina López Walle. Tecnología de prototipos rápidos por tejido de alambre magneto para tarjetas electrónicas aplicada al control de microequipo. Tesis de Licenciatura. Área Mecánica. Octubre, 2003.
- [19] Bartolomé Navarro Ruiz. Diseño y construcción de un robot autónomo. Control de motores y movimiento. Ing. Técnico Industrial Electrónica. Universidad Pontificia Comillas. Junio, 2001.
- [20] José Reséndiz Sánchez. Investigación del sistema de control de una MMH y propuesta de optimización del sistema. Tesis de Licenciatura. Área Mecánica Electricista. Marzo 9, 2005.
- [21] http://www.ic.chalmers.se/courses/student_proj/idb.fm.html
- [22] 2nd International Workshop on Microfactories.
- [23] Makoto Tanaka. Mechanical Engineering Laboratory,
- [24] Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM), Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), UNAM.
- [25] Micromachine magazine, Varios, 1997.
- [26] Martín Ortega Breña, Shair Mendoza Flores. Automatización de una máquina herramienta convencional a máquina de control numérico mediante microcontroladores. Tesis de licenciatura. Ingeniería mecánica. Octubre, 2004.
- [27] Data Sheet PIC16F873/74/76/77.

- [28] Leopoldo Ruiz Huerta. Desarrollo de microequipo para células de manufactura. M. En I. Tesis de doctorado, área mecánica. Abril 2005.
- [29] Friedrich C. R. and Vasile M. J. Development of the Micromilling Process for High Aspect Ratio Micro Structures. *Micromechanical Systems*, 1996, 5, pp 33-38.
- [30] Data Sheet L297, L298N.
- [31] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Kasatkina L., 2002, Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, pp. 795-813.
- [32] Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina L., Baidyk T., 2000, CNC Machine Tools for low cost Micro Devices Manufacturing. Proc. Of first int. Conf. on Mechatronics and Robotics (M&R'2000), Saint Petersburg, May 29-June 2, Vol.1. pp. 98-103.
- [33] Kussul E. M., Kasatkina L.M., 1998, Los problemas de desarrollo de MMH controladas por computadora para fábricas micromecánicas sobremesa. *Sistemas de control y computadoras*, N5, v.28, pp. 32-39, 1 cita.
- [34] L. Ruiz-Huerta., A. Caballero Ruiz., E. Marin-Aguilar., G. Velasco., T. Baidyk and E. Kussul. Parallelogram Micromachine for low cost Micromechanics, aceptado para publicarse en ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, 2004, celebrado del 13 al 19 Noviembre en Anaheim, California, USA.
- [35] L. Ruiz-Huerta., A. Caballero Ruiz., G. Ascanio., T. Baidyk and E. Kussul. In the way to the second generation of microequipment, aceptado para publicarse en IWMP04 4th International Workshop on Microfactories, Shangai, China, 15-17 Octubre 2004. pp. 86-91.