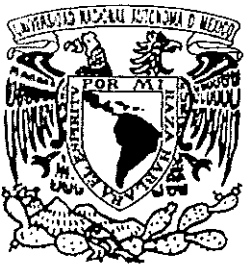


11 01175



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



## T E S I S

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MICROCENTRO DE BAJO COSTO

PRESENTADA POR:

LEOPOLDO RUIZ HUERTA, ING.

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ÁREA MECÁNICA)

DIRIGIDA POR:

DR. ERNST KUSSUL

DR. SAUL SANTILLÁN GUTIÉRREZ

782498

Ciudad Universitaria

Septiembre, 2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CENTRO DE INSTRUMENTOS

# ÁREA MECÁNICA

---

INGENIERÍA MICROMECAÁNICA

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO DE BAJO COSTO**

---

Presenta: Leopoldo Ruiz Huerta, Ing.  
Dirige: Dr. Ernst Kussul  
Dr. Saúl Santillán Gutiérrez

---

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Ernst Kussul, y con las aportaciones del Ing. Alberto Caballero Ruiz y del Dr. Saúl Santillán Gutiérrez. Apoyado por la DGAPA, a través de su proyecto IN-118799.

---

a mi madre...

...dedico este trabajo como la cosecha al apoyo, confianza y cariño que me ha brindado todos estos años. ¡Lo logramos otra vez!

---

... a mi padre...  
... por su apoyo y cariño.

... a mi hermana Margarita...  
... por su cariño, apoyo, regaños, risas y ¡claro!, sus consultas gratis.

... a Aurora...  
... por el cariño brindado y por estar aquí.

... a Natalia...  
... por su manera de ser y por su trabajo en la edición de imágenes.

... a Alberto...  
...quien con su amistad y conocimientos hizo posible este trabajo.

...Благодарность Санкт-Петербурга за его девушек

... a mis niñas...  
... quienes estuvieron conmigo en todo momento.

... al “Doc” Ascanio...  
... por motivarme a seguir adelante.

... a todos aquellos que he omitido (no por descortesía sino por falta de espacio), que contribuyeron o por lo menos no interfirieron en la realización de este trabajo.

---

En primer lugar y de forma muy especial quiero agradecer a mi amigo, el Dr. Ernst Kussul, quien con su apoyo, consejos, paciencia, y sobre todo su amistad contribuyó de forma invaluable al desarrollo de este trabajo.

Во-первых я хочу выразить искреннюю благодарность моему другу и научному руководителю доктору Эрнесту Михайловичу Куссулю за оказанную поддержку, советы, терпение, и самое главное, за дружелюбные отношения ко мне, во время помощь диссертационной работы.

Agradezco a la Dra. Graciela Velasco, por su peculiar manera de ser y por su apoyo en todo momento.

Я благодарю доктора Грасиела Веласко Э. за ее полезные советы на протяжении выполнения моей работы.

Agradezco al Dr. Saúl Santillán su asesoría y tiempo dedicado a este proyecto.

Al Centro de Instrumentos en donde encontré un apoyo tanto de infraestructura como de amigos para la realización de este trabajo.

A mis sinodales por sus comentarios y aportaciones:

Dr. Marcelo López Parra.

Dr. Ernst Kussul.

Dr. Vicente Borja Ramírez.

M. en I. Leopoldo González González.

Dr. Saúl Santillán Gutiérrez.

A mis maestros, de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los conocimientos y experiencias que de estos he recibido.

---



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	3
TÉCNICAS USADAS PARA EL DESARROLLO DE MICROMECAÍNICA .....	4
DESARROLLO EN EL MUNDO .....	5
OBJETIVO Y MARCO TEÓRICO .....	14
OBJETIVO .....	14
ALCANCES.....	14
MARCO TEÓRICO .....	14
¿CÓMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?.....	15
MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES .....	15
DEFINICIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO .....	16
BENEFICIOS DE HACER MICROCENTROS DE MAQUINADO DE BAJO COSTO.....	17
CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE PRODUCTOS MICROMAQUINADOS .....	18
APLICACIONES PARA el Macromundo.....	18
APLICACIONES PARA EL MICROMUNDO .....	18
APLICACIONES DE MEJORA INDEPENDIENTES DEL TAMAÑO .....	19
APLICACIONES EN DESARROLLO EN EL ÁMBITO MUNDIAL.....	19
RECURSOS.....	20
DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCEDIMIENTOS.....	21
DESARROLLO DE UN CASO DE ESTUDIO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO .....	22

<b>PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO</b> .....	<b>22</b>
REQUERIMIENTOS .....	22
ESPECIFICACIONES .....	23
<b>MICROMÁQUINAS DE PEQUEÑAS DIMENSIONES</b> .....	<b>23</b>
<b>DISEÑO CONCEPTUAL</b> .....	<b>25</b>
GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	26
<b>DISEÑO DE DETALLE</b> .....	<b>32</b>
EJES.....	33
SISTEMAS DE SUJECCIÓN.....	37
HERRAMIENTAS .....	39
MOTORES Y ACTUADORES .....	39
BASTIDOR.....	41
DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	42
<b>PRUEBAS DEL EQUIPO Y RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO</b> .....	<b>44</b>
<b>PIEZAS FABRICADAS EN EL MCM</b> .....	<b>48</b>
TORNILLO .....	50
TORNILLO SIN FIN .....	51
BARRA CON DIFERENTES DIÁMETROS .....	51
ENGRANE.....	52
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>54</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>54</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>61</b>
<b>PROGRAMA</b> .....	<b>61</b>
<b>PLANOS</b> .....	<b>81</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

TABLA 1.1. PROCESOS PARA LA CREACIÓN DE MICROSISTEMAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	6
TABLA 1.2. APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE SISTEMAS MICROMECAÑICOS EN LA MEDICINA.....	7
FIGURA 1.1. ESQUEMA DE UNA MICROFÁBRICA O FÁBRICA SOBRE MESA [MICROMACHINE MAGAZINE, 1995].....	9
FIGURA 1.2. MICROMÁQUINA PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS POR EL MÉTODO DE CORRIENTES DE EDDY [MICROMACHINE MAGAZINE, 1995]..	9
FIGURA 1.3. MICROROBOT DE INSPECCIÓN. ....	10
FIGURA 1.4. MICROMANIPULADOR [MICROMACHINE MAGAZINE, 1995] .....	10
FIGURA 1.5. EJEMPLO DE ROBOT SOLAR DE EXPLORACIÓN DE PEQUEÑAS DIMENSIONES. ....	11
FIGURA 1.6. MICROGENERADOR DE CORRIENTE .....	11
1.7. MICROACTUADOR CON TRES GRADOS DE LIBERTAD.....	12
FIGURA 1.8. MICROTORNO JAPONÉS.....	12
FIGURA 1.9. PRIMER PROTOTIPO DE MICROCENTRO DE MAQUINADO DESARROLLADO EN UCRANIA.....	13
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE LAS PRINCIPALES PARTES CONSIDERADAS PARA EL DISEÑO.....	25
FIGURA 3.2. CONFIGURACIÓN PROPUESTA.....	32
FIGURA 3.3. PRIMERA CONFIGURACIÓN PROBADA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MICROCENTRO DE MAQUINADO. ....	33
FIGURA 3.4A. ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA. ....	34
FIGURA 3.4B. DISEÑO EN ENSAMBLE DE GUÍAS Y CARROS. ....	34
FIGURA 3.4C. VISTA EN EXPLOSIÓN DE GUÍAS Y CARROS. ....	35
FIGURA 3.5. ARREGLO DE EJES TRANSLACIONALES PROPUESTO PARA EL MICROCENTRO DE MAQUINADO.....	35
FIGURA 3.6. PARTE CENTRAL DE LA CAJA REDUCTORA.....	36
FIGURA 3.7. SISTEMA DE SUJECCIÓN PARA OPERACIONES DE REVOLUCIÓN..	37
FIGURA 3.8. SISTEMA PORTA HERRAMIENTAS .....	38
FIGURA 3.9. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL CENTRO DE MAQUINADO. 39	
FIGURA 3.10. PRIMER PROTOTIPO DE MOTOR DE PASOS. ....	40
FIGURA 3.11. SEGUNDO PROTOTIPO DE MOTOR DE PASOS. ....	41
FIGURA 3.12. BASTIDOR USADO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL CENTRO DE MAQUINADO. ....	41
FIGURA 3.13. SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO.....	43
FIGURA 3.14. DIAGRAMA DEL CIRCUITO GENERADO POR COMPUTADORA. .	43
FIGURA 4.1. BASTIDOR.....	45
FIGURA 4.2A. MOTOR DE PASOS Y TRANSMISIÓN PARA EJES TRANSLACIONALES. ....	45

FIGURA 4.2B. GUÍAS Y CARROS.....	46
FIGURA 4.3. MOTOR DE PASOS Y TRANSMISIÓN PARA EJE ROTACIONAL (CUARTO EJE).....	46
FIGURA 4.4. SISTEMAS DE SUJECIÓN (PORTA PIEZAS Y PORTA HERRAMIENTAS).....	47
FIGURA 4.5. PROTOTIPO COMPLETO.....	48
FIGURA 4.6. PIEZAS MANUFACTURADAS EN EL PROTOTIPO DE MICROCENTRO DE MAQUINADO (COMPARACIÓN CON LA CABEZA DE UN CERILLO).....	48
FIGURA 4.7. PROYECTOR DE PERFILES NIKON V-16D.....	49
TABLA 4.1. MEDICIONES REALIZADAS A LA PIEZA DE PRUEBA 1.....	50
FIGURA 4.8. TORNILLO EN PROYECTOR DE PERFILES (IZQUIERDA), Y AMPLIFICADO 50 VECES (DERECHA).....	50
TABLA 4.2. MEDICIONES REALIZADAS A LA PIEZA DE PRUEBA 2.....	51
FIGURA 4.9. PIEZA 2.....	51
TABLA 4.3. MEDICIONES REALIZADAS A LA PIEZA DE PRUEBA 3.....	51
FIGURA 4.10. PIEZA 3.....	52
TABLA 4.4. MEDICIONES REALIZADAS A LA PIEZA DE PRUEBA 4.....	52
FIGURA 4.11. ENGRANE.....	52

# INTRODUCCIÓN

*En esta sección se describe brevemente el papel de la micromecánica en el mundo al momento de elaborar el trabajo.. Así mismo se plantea el contenido de cada uno de los capítulos que conforman este trabajo.*

La micromecánica se ha convertido en los últimos 20 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.

Para la generación de micromecánica existen, al momento de escribir este trabajo, una gran cantidad de técnicas, sin embargo todas ellas presentan sus propios inconvenientes y ventajas.

Por tal motivo se propone un marco teórico, y se desarrolla un caso de estudio, que tienen como meta aportar una nueva manera de desarrollar micromecánica.

Se presenta este trabajo en cuatro capítulos centrales, uno más de conclusiones, y por último uno de referencias.

En el primer capítulo, se establece el marco tecnológico existente al momento de realizar este trabajo. De la misma manera se plantean los fundamentos y principios de las técnicas convencionalmente usadas en el desarrollo de microequipo.

En el segundo capítulo, se describe el objetivo y alcance de este trabajo. Se expone además, el marco teórico planteado para el desarrollo de microequipo a bajo costo. Este capítulo es el

antecedente de la tecnología usada para el desarrollo del microcentro de maquinado propuesto

En el capítulo tercero, se describen las actividades realizadas para el desarrollo de un prototipo de microcentro de maquinado, perteneciente a la primera generación de micromáquinas herramientas, desarrollada en México. De igual manera se presentan las alternativas propuestas y los elementos seleccionados finalmente para la construcción del equipo.

En el capítulo cuarto, se describen los productos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Se describe el equipo construido y se muestran imágenes del mismo. Se presentan mediciones realizadas a piezas realizadas en este equipo. De igual manera se hacen conclusiones referentes a las pruebas realizadas.

Por último, en el capítulo dedicado a conclusiones y recomendaciones, se analizan los resultados obtenidos del proyecto, y se proponen los siguientes pasos para la continuación de este línea de investigación.

## ANTECEDENTES

*En este capítulo se establece el marco tecnológico existente al momento de realizar este trabajo. De la misma manera se plantean los fundamentos y principios de las técnicas convencionalmente usadas en el desarrollo de microequipo.*

Como base del proceso evolutivo de productos, diferentes autores mencionan la compactación. Dentro de ésta, se distingue claramente la necesidad de desarrollar técnicas de diseño y producción de equipo acorde con las nuevas necesidades.

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 para la construcción de circuitos integrados de tecnología serie o por lotes para microelectrónica (circuitos integrados).

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. 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).

El desarrollo de sistemas micromecánicos más elaborados (como **MicroMachine Tools (MMT)**, micromanipuladores y microrobots), requieren de estructuras mecánicas con las siguientes características [Kussul, 1996]:

- ⇒ Tres dimensiones reales
- ⇒ Formas complejas
- ⇒ Posibilidades de ensamble y movimiento
- ⇒ Uso de diferentes materiales

Una **micromáquina** es un sistema extremadamente pequeño (pocos milímetros o menos), con elementos altamente sofisticados y funcionales que le permiten realizar tareas complicadas y delicadas [Lee, 1996].

Cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales extremadamente pequeñas en un rango de tamaño de 15mm o menor, es llamado **micromáquina** [Fujimasa, 1997].

Partiendo de las definiciones anteriores, en 1999, definimos en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM (LIMCI), que: **las micromáquinas deben su nombre no solo a su tamaño, sino también al tamaño de sus componentes y, ampliando la definición, al tamaño de las piezas fabricadas con éstas.**

De esta manera, definimos las actividades realizadas en este trabajo, como tecnología aplicada a la creación de micro equipo, es decir **MET (MicroEquipment Technology)**.

## **TÉCNICAS USADAS PARA EL DESARROLLO DE MICROMECAÁNICA**

Varias tecnologías emergieron durante el desarrollo de los MEMS, MST y los MMT, siendo éstas agrupadas dentro de dos rangos: el primero de ellos se refiere a producción de piezas de manera



individual, y las segundas se refieren a procesos aplicados a lotes o grandes volúmenes de producción.

Los procesos de manera **individual**, incluyen técnicas como: oxidación térmica, depósito por vapores químicos, evaporación y Sputtering, fotolitografía, etc.; mientras que las técnicas por **lotes o volumen** involucran procesos de depósito de material como: LIGA (Litographie-Galvanofornung-Abformung), micromaquinados de superficie, contorneado anódico, etc..

En la tabla 1.1 se ilustran diferentes procesos para la creación de microsistemas. Todas las técnicas ahí mencionadas, relacionadas con producciones por lotes o volumen, son actualmente utilizadas para la fabricación de sistemas electrónicos compactos, tales como circuitos CMOS.

El principal interés en el desarrollo de nuevas tecnologías para la fabricación de microsistemas electromecánicos compactos, obedece a las restricciones causadas por los materiales y la geometría de piezas obtenidas con técnicas de producción por lotes o volumen.

Considerando lo anterior, se utilizó la experiencia de la Ingeniería Mecánica convencional, para el desarrollo de nuevas técnicas de producción de sistemas micromecánicos, teniendo como objetivo un bajo costo de producción.

Es conocido que los sistemas o procesos realizados de forma individual ofrecen mayores costos asociados con equipo, mano de obra, costo de instalaciones y terreno, y energía consumida, que todos aquellos procesos que pueden realizarse en grandes volúmenes y en pocos pasos.

## DESARROLLO EN EL MUNDO

El auge del desarrollo de estos dispositivos se inició a mediados de los 80's, desde entonces ha tenido un fuerte impacto en muy diversas áreas en el ámbito científico e industrial, tal es el caso de la medicina, agricultura, biotecnología, la industria química, aeroespacial, de la construcción, generación de energía, etc.

Tipo de proceso	Características
Procesos de Silicio	<p>Combina la litografía y la deposición.          Permite la producción en masa con subensambles.          Sólo permite producir dispositivos en dos dimensiones.          Se utiliza principalmente en la fabricación de circuitos integrados, así como también en la miniaturización de partes mecánicas como ejemplo: sensores de presión y de aceleración.</p>
Proceso LIGA (Litographie-Galvanoformung-Abformung)	<p>Combina la litografía con rayos "X" suaves, la electrodeposición de película delgada y el moldeado.          Permite la manufactura de partes con alta calidad de acabado y producción en masa.          Su costo es muy elevado.          No permite realizar formas libres en tres dimensiones.          Se utiliza en la fabricación de elementos ópticos, filtros y sensores de aceleración.</p>
Proceso de Maquinado por Láser	<p>Maquinado directo o asistido por haz de Láser de electrones o de iones.          Permite maquinados en tres dimensiones.</p>
Proceso EDM (Electro-discharge machining)	<p>Combina el molido de cable por electrodescarga y el maquinado por electrodescarga.          Permite maquinados en metales con formas en tres dimensiones.          No utiliza contacto para maquinar.          Únicamente trabaja con materiales conductores, sin embargo semiconductores como el Silicio pueden ser procesados dependiendo de su conductividad.</p>
Fotoformado	<p>Polimeriza localmente resina líquida mediante un haz de láser.          Permite producir formas en tres dimensiones.          No se tiene producción en serie.</p>
Inyección de moldes	<p>Inyecta resina líquida o metal y polvo mezclados en moldes.          Permite la manufactura y la producción en masa de componentes con formas tridimensionales.</p>
Maquinado convencional	<p>Se basa en la remoción de material.          Permite manufacturar piezas en tres dimensiones.</p>
Otros	<p>Maquinado electro-químico.          Implantación de iones.          Maquinado STM, etc.</p>

*Tabla 1.1. Procesos para la creación de microsistemas y sus características*

Dentro del **campo médico** la demanda de microequipos aumenta con aplicaciones en: microscopía, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco agresivas, tratamientos, etc.. La reducción en el tamaño de los instrumentos permite inspeccionar las partes internas del cuerpo humano reduciendo los posibles daños a éste, así mismo, eleva la precisión y la eficiencia en diagnósticos. Algunos de los dispositivos generados con estas tecnologías son:

Aplicación	Productos
Sensado	Microsensores de presión táctil. Microsensores de presión y flujo sanguíneo. Sensores para análisis sanguíneos. Biosensores. Reconocimiento de coordenadas en el espacio.
Observación	Microcámaras de CCD. Dispositivos de diagnóstico por ultrasonido.
Tratamiento	Micromanipuladores de alta precisión. Microactuadores. Tecnología de teleoperación. Tecnología de control.
Transporte de medicamentos	Equipo de microinyección e infusión. Microequipo de muestreo de sangre. Microbombas. Microválvulas. Sistema de cápsula para el traslado de medicamentos.
Estímulos eléctricos	Interfaces nerviosas. Retina artificial.
Sistematización	Tecnología de montaje de alta densidad. Tecnología de sistematización.

*Tabla 1.2. Aplicación de tecnología de sistemas micromecánicos en la medicina*

Otro campo de aplicación importante es la **manufactura** de pequeños productos industriales. En estos casos la energía consumida con este tipo de máquinas disminuye de forma considerable. Recientemente se emplean varias tecnologías para manufacturar componentes

mecánicos de dimensiones pequeñas (decenas de micrómetros), para la construcción de motores y actuadores de bajas dimensiones. La integración de estos sistemas con fines de producción es llamada **microfábrica** o **fábrica sobre mesa** [Kawahara y Kitahara, 1997].

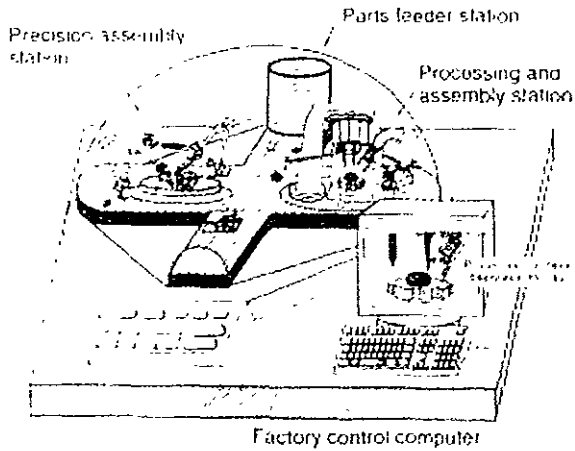
Una microfábrica cuenta con unidades de proceso, ensamble, control de calidad, transporte, mantenimiento, entre otras. En estas microfábricas se utilizan manipuladores para sujetar transportar piezas pequeñas. Estos manipuladores, de dimensiones proporcionales a las piezas con las que trabajan, poseen baja inercia, por lo que son más rápidos y precisos. El uso de éstos representa también un decremento en los tiempos de transporte entre las diferentes etapas del proceso, con lo que se mejora la productividad.

Las microfábricas tienen como ventajas [Kawahara y Kitahara, 1997]:

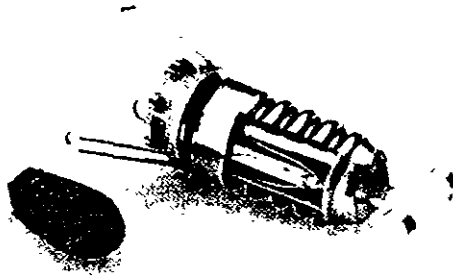
- ⇒ Bajo consumo energético
- ⇒ Ahorro de recursos
- ⇒ Eficiencia en uso de espacios
- ⇒ Flexibilidad.

Con estas fábricas sobre mesa, se obtienen elementos funcionales, equipo médico, material farmacéutico, dispositivos y circuitos integrados híbridos sin la necesidad de grandes áreas limpias o esterilizadas. Un esquema de este tipo de fábrica es mostrado en la figura 1.1.

En lo que respecta a inspección y mantenimiento de equipo industrial, los sistemas micromecánicos juegan un rol muy importante. En la actualidad, existe interés en el desarrollo de pequeños robots de mantenimiento para inspección y reparación en lugares estrechos y/o inaccesibles. La aplicación de este tipo de robots cubre un amplio rango de equipo: maquinaria para transporte, plantas de energía (inspección en turbinas sin necesidad de desensamble), inspección de tuberías, plantas químicas, petroleras, nucleares, etc.. En la figura 1.2 se muestra una micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy.

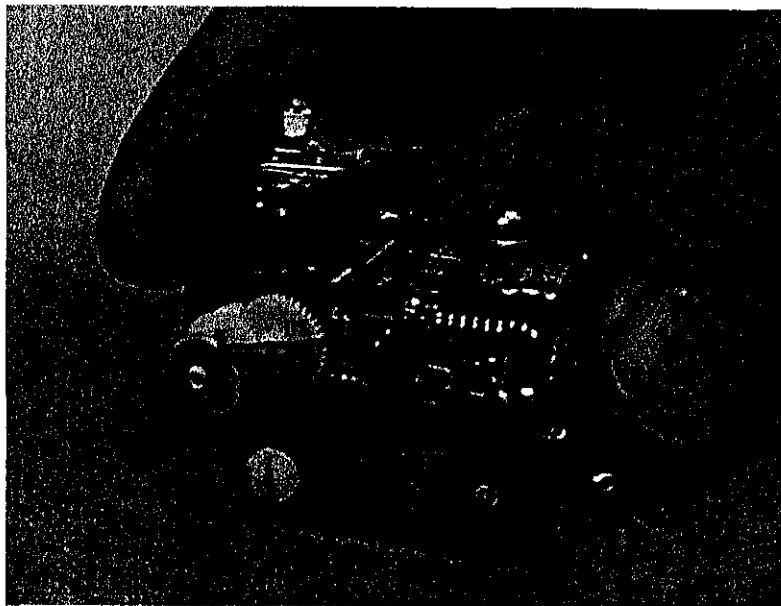


*Figura 1.1. Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa [Micromachine Magazine, 1995].*

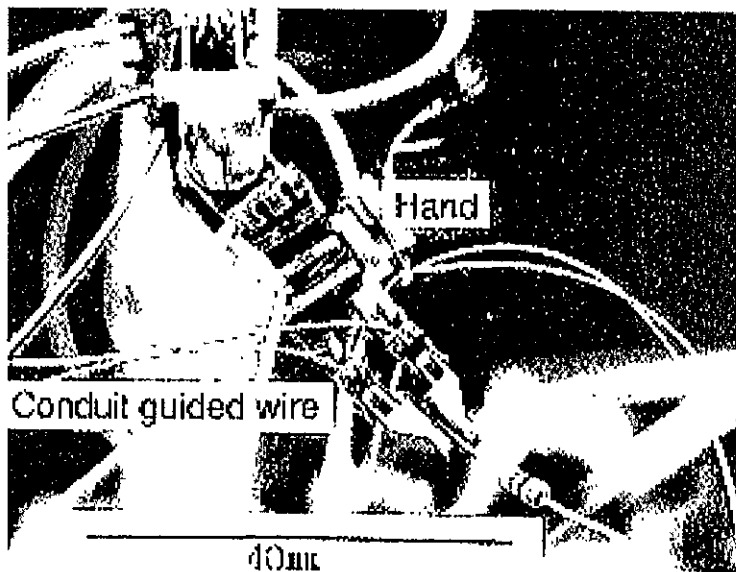


*Figura 1.2. Micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy [Micromachine Magazine, 1995].*

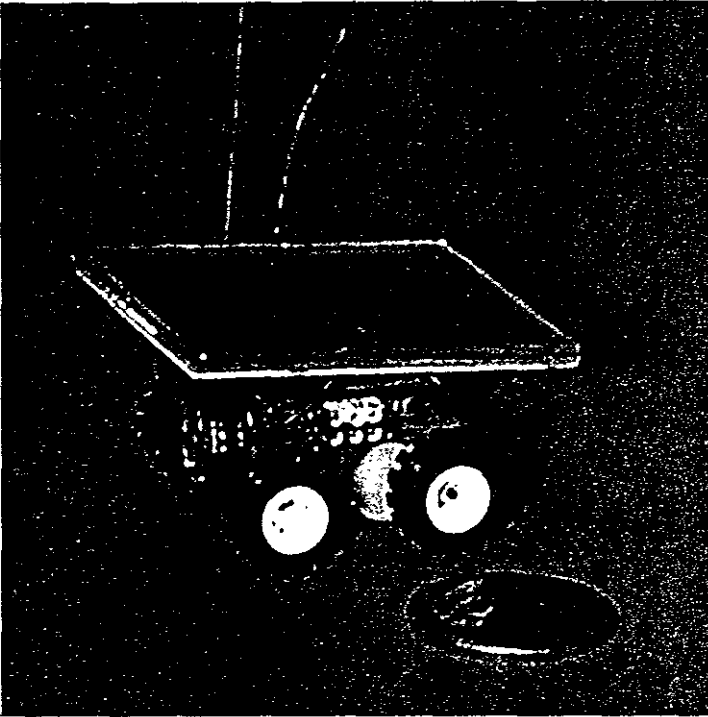
De igual manera que los casos anteriores, podemos encontrar aplicaciones realizadas con microsistemas mecánicos, como los mostrados en las figuras de la 1.3 a la 1.7.



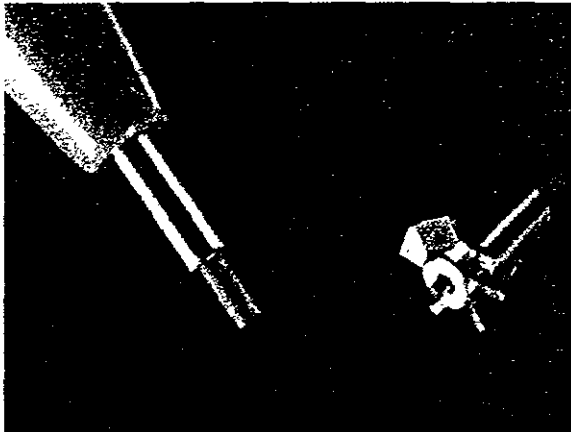
*Figura 1.3. Microrobot de inspección.*



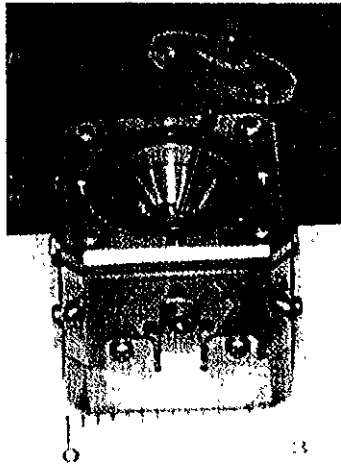
*Figura 1.4. Micromanipulador [Micromachine Magazine, 1995]*



*Figura 1.5. Ejemplo de robot solar de exploración de pequeñas dimensiones.*

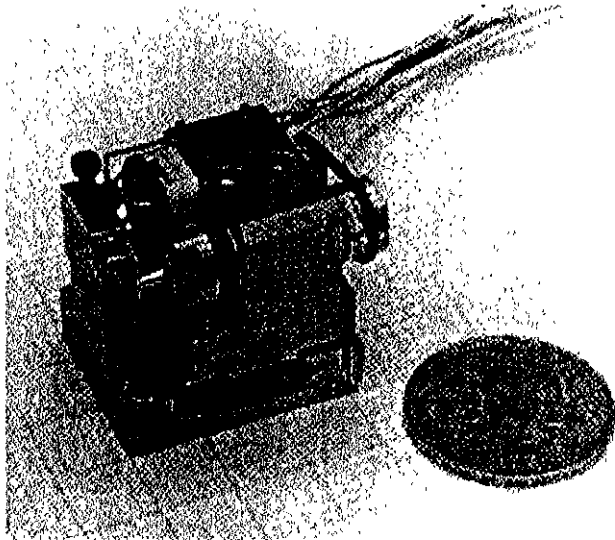


*Figura 1.6. Microgenerador de corriente*



### *1.7. Microactuador con tres grados de libertad*

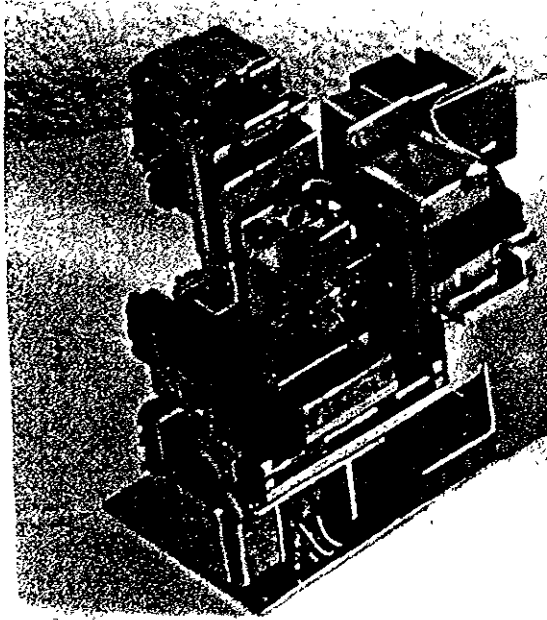
En el ámbito de micromáquinas herramientas, existe poca información reportada al momento de realizar este trabajo. En la figura 1.8 se presenta un microtorno japonés [Varios, Micromachine Magazine, 1997], sin embargo se desconoce sus capacidades de producción, tipo de control, etc.



*Figura 1.8. Microtorno Japonés*



En la figura 1.9, se aprecia el primer prototipo de microcentro de maquinado desarrollado en el International Research and Training Center of Information Technology Systems, National Academy of Sciences of Ukraine en 1997. Este presenta movimientos aproximados de 25.4mm. por eje, y una resolución de  $1\mu\text{m}$ . Este prototipo reportó fallas de rigidez [Kussul, 1998].



*Figura 1.9. Primer prototipo de microcentro de maquinado desarrollado en Ucrania.*

## OBJETIVO Y MARCO TEÓRICO

*En este capítulo se describe el objetivo y alcance de este trabajo. Se expone además, el marco teórico planteado para el desarrollo de microequipo a bajo costo.*

### OBJETIVO

Utilizar una alternativa de desarrollo tecnológico para la construcción económica de microequipo.

### ALCANCES

Describir la tecnología utilizada para generar microequipo de bajo costo.

Desarrollo de un caso de estudio: Diseño y construcción de un prototipo de microcentro de maquinado.

### MARCO TEÓRICO

Teniendo como referencia las tecnologías descritas en los antecedentes de este trabajo, partiremos con una descripción de la tecnología propuesta en el desarrollo de micro equipo de bajo costo, misma que será utilizada en el desarrollo del caso de estudio.

## ¿CÓMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?

La propuesta para la manufactura de microdispositivos mecánicos de bajo costo se encuentra basada en una extensión de la ingeniería mecánica convencional.

En la mecánica convencional, los procesos individuales de maquinado involucran un alto costo debido principalmente a las erogaciones realizadas en equipo, mano de obra, costo de instalaciones y terreno, y energía consumida. De esta manera es posible afirmar que los procesos de manufactura que involucran producciones por lotes son preferibles.

En el caso de la micromecánica el costo de procesos individuales cambia notablemente en función de [Kussul, 1996]:

1. **Miniaturización.** Al decrecer las dimensiones del equipo, y su masa, es posible incrementar la eficiencia de uso de suelo para producción.
2. **Mano de obra.** Esta disminuye en función del grado de automatización obtenido y del nivel de mantenimiento de cada dispositivo en un ciclo de producción.
3. **Bajos costos de equipo.** Estos se obtienen de la miniaturización del equipo, una baja cantidad de materiales, así como equipo simple para su producción.
4. **Manejo de producciones en paralelo.** Se plantea el uso de células de producción en pequeñas fábricas o microfábricas, que tengan como característica la producción simultánea de microdispositivos que requieran grandes volúmenes.

## MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES

Es posible generar microequipo mediante una secuencia de generaciones. Cada generación incluye microequipo de una misma escala (máquinas herramientas, manipuladores, dispositivos y técnicas de ensamble, instrumentos de medición, herramientas, etc.), suficiente para la manufactura del mismo tipo de equipo pero de

escala menor. Cada generación es manufacturada por la generación precedente. Cada nueva generación tiene menores dimensiones que la generación que la produce [Kussul, 1996].

Se define como factor de compactación de generación (GDF), como la reducción que experimenta equipo de una generación a otra. De esta manera un equipo con dimensiones en su primera generación de 100×100×100, y que en su segunda generación presenta 50×50×50, posee un GDF=2. De esta manera:

$$GDF = \frac{\text{Dimensiones de la generación anterior}}{\text{Dimensiones de la nueva generación}} \dots \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Partiendo de esta idea, la primera generación de microequipo se creó usando máquinas y herramientas de escala humana. La segunda generación, será fabricada con la primera generación y así de manera subsecuente.

## **DEFINICIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO**

Un centro de maquinado es una máquina herramienta que permite hacer una amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, maquinado de cuerdas, etc.), [Weck, 1980].

Existen diferentes configuraciones que pueden ser adoptadas por este tipo de maquinaria, sin embargo en términos generales, la herramienta de corte se desplaza en tres ejes ortogonales, mientras que la pieza de trabajo se encuentra sujeta durante el maquinado, en bases intercambiables, bases giratorias o en sistemas planetarios.

Los centros de maquinado usualmente cuentan con las siguientes características [Weck, 1980]:

- ⇒ Control numérico [NC].
- ⇒ Carruseles con cambiadores automáticos de múltiples herramientas.

- ⇒ Ejes habilitados para trabajar en todos los lados de la pieza.
- ⇒ Cuando se encuentra en sistemas de manufactura flexible, se contempla la alimentación y retiro de pieza de forma automática.

Los centros de maquinado generalmente se recomiendan para bajas o medianas producciones, pero con un alto grado de automatización, permitiendo ser configuradas para diferentes tipos de producciones (en cuanto a volumen y tipo de piezas producidas), en relativamente corto tiempo [Weck, 1980].

Con lo mencionado anteriormente, definimos en el LIMCI un **microcentro de maquinado** como: **Una máquina herramienta que permite hacer un amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, maquinado de cuerdas, etc.), que posee bajas dimensiones, o bien sus componentes o productos tienen dimensiones globales inferiores a 15mm..**

## **BENEFICIOS DE HACER MICROCENTROS DE MAQUINADO DE BAJO COSTO**

El microequipo presenta un amplio rango de aplicaciones potenciales, derivadas de los desarrollos generados en materiales, procesos de manufactura, ensamble y diseño introducido a ingeniería micromecánica. Para convertir en realidad las aplicaciones de microequipo, es indispensable mantener un bajo costo de manufactura de cada uno de los productos generados con esta tecnología. [Kussul, 1996]

En la medida en que se desarrolle microequipo de uso general de bajo costo, que permita obtener estructuras mecánicas complejas en tres dimensiones y de diversos materiales, será posible la construcción a bajo costo de: robots, manipuladores, microfábricas, productos micro, etc.

Otro de los factores importantes para la disminución de costo en el desarrollo de microequipo, consiste en el planteamiento de

producciones en paralelo, que permite la producción de una gran cantidad de dispositivos de manera simultánea.

## **CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE PRODUCTOS MICROMAQUINADOS**

En el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM, se propuso una clasificación basada en las funciones de los productos obtenidos con los centros de maquinado:

### **APLICACIONES PARA EL MACROMUNDO**

Este macroefecto (en proporción con el tamaño de los microcomponentes), se obtiene con la integración, en una sola estructura o aplicación, de un gran número de micropartes. Cada una de estas partes se encuentra diseñada para obtener un mejor desempeño, no antes alcanzado con mecánica convencional. Como puede apreciarse, el pensar en estas aplicaciones nos refiere al hecho de grandes producciones y ensambles a bajo costo. Ejemplos de estas aplicaciones son: filtros, intercambiadores de calor, sistemas de separación de líquidos, pantallas táctiles, etc.

### **APLICACIONES PARA EL MICROMUNDO**

La diversidad de materiales requeridos, la necesidad de partes con formas complejas en 3D, los requerimientos de ensambles sofisticados con articulaciones, limitan las aplicaciones de los procesos por lotes. De esta manera microequipo, generado con mecánica convencional incrementa el rango de aplicaciones micro.

Por su complejidad, potencial y aplicaciones inmediatas, podemos encontrar desde microherramientas hasta microrobots, incluyendo las aplicaciones de instrumental quirúrgico, microsensores, aplicaciones en microelectrónica, micromotores y actuadores, microinstrumentos, micromanipuladores para aplicaciones biológicas, microcentros de maquinado, micromanipuladores, microfábricas, etc.

### APLICACIONES DE MEJORA INDEPENDIENTES DEL TAMAÑO

En esta categoría, se encuentran principalmente las aplicaciones de almacenamiento y procesamiento de información. Esta aplicación, se encuentra relacionada con la miniaturización y con el desarrollo de dispositivos de almacenamiento y procesamiento.

La reducción en tamaño de sistemas magnéticos y ópticos, para almacenamiento de información, deberán relacionarse con una disminución en el consumo de energía, y un incremento en la capacidad de almacenamiento [Nicoud, 1995].

Con este tipo de aplicaciones es posible desarrollar también autómatas microelectrohidráulicos, procesadores y memorias de computadoras.

### APLICACIONES EN DESARROLLO EN EL ÁMBITO MUNDIAL

Dentro de las aplicaciones de micromecánica que requieren el desarrollo de microequipo (centros de maquinado), de bajo costo, y en específico microcentros de maquinado encontramos:

**Microfiltros:** Estos operan bajo el principio de una baja caída de presión, derivada de la nula absorción de fluidos que presentan algunos materiales. De esta manera es posible el manufacturar y ensamblar una gran cantidad de elementos filtro, donde cada uno de estos tiene definido un paso de partículas. Con esto es factible realizar procesos de filtrado de líquidos y gases de manera efectiva [Kussul, 2000].

**Intercambiadores de calor compactos:** Para el desarrollo de estos, se plantea el uso de nuevas aleaciones y manufactura que incrementen el área de intercambio térmico, así como también proponen el uso de la capilaridad como medio para hacer más eficiente la circulación de fluidos dentro de los conductos de bajos diámetros [Kussul, 2000].

**Motores de pasos electromagnéticos:** Los motores electromagnéticos proporcionan alto par. Sin embargo, su fabricación requiere de un mejor manejo en las tolerancias de manufactura y evidentemente de ensamble. Por esta razón, se trabaja en un diseño

más simple, manufactura más confiable, y técnicas de miniaturización para este tipo de motores [Nicuod, 1995].

**Motores de pasos hidráulicos:** El potencial de compactación de estos motores es mejor que el de 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 con uno similar electromagnético [Guckel].

## RECURSOS

Este trabajo fue desarrollado en el Centro de Instrumentos UNAM, a través de sus Laboratorios, en especial el de Ingeniería Mecánica.

Dentro de la infraestructura con la que se contaba para este proyecto se puede mencionar:

- ✓ Taller mecánico con máquinas herramientas convencionales.
- ✓ Apoyo de instrumental convencional de medición geométrica y Máquina de Medición por Coordenadas del Laboratorio de Metrología del mismo CIUNAM.
- ✓ Computadoras Pentium

Dentro de los recursos humanos con los que contaba este proyecto:

- ✓ Supervisión del Dr. Ernst Kussul, Coordinador del Laboratorio de Ingeniería Mecánica del CIUNAM (LIMCI).
- ✓ Dos estudiantes de Maestría en Ingeniería Mecánica.
- ✓ Asesorías por parte del Laboratorio de Metrología del CIUNAM.

De manera adicional para el desarrollo de este proyecto se contó con los recursos financieros del proyecto **PAPIIT IN-118799**.



## DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCEDIMIENTOS

Para el desarrollo del caso de estudio, un microcentro de maquinado, se establecieron los siguientes pasos:

↳ **Investigación del estado del arte en micromáquinas herramientas.** En esta primera etapa del proyecto se investigó la información reportada referente a micromáquinas herramientas para producción. Ciertamente la información encontrada fue escasa debido a una tendencia tecnológica hacia sistemas de producción para máquinas en dos dimensiones, que por sus características de origen no pueden ser utilizadas como máquinas herramientas. La información encontrada es reportada en el primer capítulo de este trabajo.

↳ **Investigación de procedimientos para obtener microequipo de bajo costo.** En esta sección se investigaron los fundamentos usados para la creación de microequipo de bajo costo. También, se plantearon los beneficios de desarrollar microcentros de maquinado.

↳ **Desarrollo.** En esta etapa se definieron los conceptos usados para el desarrollo del caso de estudio, un microcentro de maquinado. Así mismo, se realizó el planteamiento y se describieron los dispositivos usados para su construcción.

↳ **Evaluación.** Se describió el producto obtenido, así como la medición de algunas piezas obtenidas en este. Se aclara que las piezas utilizadas para su evaluación únicamente fueron ejercicios de manufactura, probando así la operación de la máquina. Se realizó una caracterización a detalle, que muestra sus resultados en la tesis: **CARACTERIZACIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO DE BAJO COSTO**, Caballero 2000.

# DESARROLLO DE UN CASO DE ESTUDIO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

*En este capítulo se describen las actividades realizadas para el desarrollo de un prototipo perteneciente a la primera generación, de micromáquinas herramientas, desarrollada en México.*

## PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO

Se propone desarrollar un microcentro de maquinado, que permita la generación de micropiezas en 3D, inferiores a 5mm. Este caso de estudio debería ser de bajo costo, tanto de la máquina como de las piezas producidas en esta.

## REQUERIMIENTOS

Para el desarrollo de este equipo, los requerimientos fueron:

- ↳ De concepto, diseño, componentes y manufactura, tan simples como sea posible, en función de los recursos disponibles.
- ↳ De bajo costo, relativo a los desarrollos en el ámbito mundial.

- ↳ Para la generación de piezas, principalmente, de revolución.
- ↳ Multifuncional. El centro de maquinado desarrollado debía cumplir con la definición planteada en el capítulo 2, y permitir el cambio de operaciones con el uso de accesorios: tipo de sujeción de herramientas y piezas, herramientas y/o software.
- ↳ Uso de sistemas de bajo consumo de potencia y sensores sencillos. En virtud de lo posible, evitar el uso de sistemas comerciales para mantener bajo costo y disminuir la dependencia.
- ↳ Sistema de control automatizado, que facilite su uso y disminuya la cantidad de mano de obra utilizada en la operación.

## ESPECIFICACIONES

Las especificaciones propuestas en el LIMCI para el desarrollo de este prototipo de microcentro de maquinado, de la primera generación de microequipo, fabricado en México, fueron:

- ↳ Capacidad para producir piezas dentro del rango de 100 micrómetros y hasta 5 milímetros.
- ↳ Resolución de 2 micrómetros en cada eje.
- ↳ El equipo debe contar con al menos 4 grados de libertad, siendo de estos 3 ejes de translación y al menos 1 rotacional.
- ↳ Software capaz de operar en sistema Pentium con 32Mb en memoria RAM.

## MICROMÁQUINAS DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

Las principales fuentes de error en procesos de maquinado, obedecen a factores de: expansión térmica, errores geométricos, juego entre partes, falta de rigidez en la máquina y resolución [Push 1986].

Es así como al comparar los diferentes tipos de errores asociados a máquinas herramientas, en dos diferentes casos (A y B), idénticos en diseño, material y precisión relativa, pero donde la máquina A, y su pieza de trabajo, es S veces más grande que la máquina B, y su pieza de trabajo, en dimensiones, se tienen los siguientes resultados [Kussul 1996]:

- **Expansión térmica:** Dado que la expansión térmica es proporcional a las dimensiones lineales, la expansión térmica de la máquina B es S veces más pequeña que la máquina A.
- **Errores geométricos:** Dada la similitud geométrica, la desviación lineal de las partes con respecto a la geometría de referencia es S veces más pequeña para la máquina B.
- **Juego entre partes:** Dada la similitud entre máquinas, B requiere S veces menos espacio entre partes (juego) que la máquina A.
- **Resolución:** Determinada por el diseño de la máquina, pero al ser de diseños iguales, la resolución mínima de la máquina B es S veces menos que la de la máquina A.
- **Rigidez:** La rigidez de una máquina requiere de especial atención, dado que ésta es proporcional a la relación entre la fuerza que actúa sobre una parte de la máquina, y el desplazamiento que esta fuerza causa [Birger 1986]. Los errores de rigidez dependen de la acción de varias fuerzas. Para el caso de la fuerza de corte – donde ésta es aproximadamente proporcional a la sección de la viruta –, y donde el avance y la profundidad de corte son S veces menores en B que en A. La fuerza de corte en la máquina B es  $S^2$  veces menor que en A.

Es así como se puede afirmar que el error absoluto de cada fuente de error es al menos S veces menor en B que en A, por lo tanto, el error total absoluto de B es al menos S veces menor que en A. De esta manera se concluye que para evitar los problemas de hacer equipo a escala humana de ultraprecisión, es necesario fabricar micropartes usando microequipo con dimensiones proporcionales a lo que se desea como producto.

## DISEÑO CONCEPTUAL

Partiendo de la definición propuesta para un microcentro de maquinado, inició el proceso de diseño mediante el uso de la técnica de descomposición funcional.

La descomposición funcional es una técnica que nos sugiere la identificación de las diferentes funciones en un diseño. Una vez que éstas se encuentran identificadas, es posible asociar a cada una de las funciones, las partes y especificaciones asociadas. Así mismo se especifican las relaciones e interfaces entre cada una de las funciones que conforman el diseño en su totalidad [Lewis, 1988].

Tras la descomposición funcional, se propuso un diagrama base, mostrado en la figura 3.1, en éste se muestran las principales partes que consideraron para el desarrollo de este centro de maquinado.

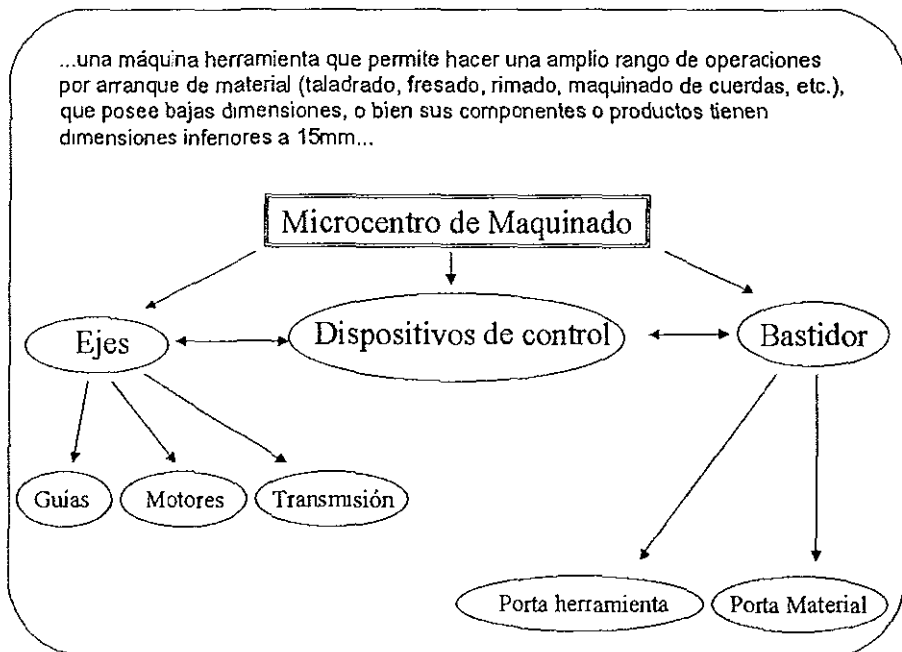


Figura 3.1. Diagrama de las principales partes consideradas para el diseño.

Teniendo este primer bosquejo de las principales partes del microcentro de maquinado, se buscó una configuración que

cumpliese con la definición de microcentro de maquinado y que proporcionara toda la versatilidad solicitada para la creación de piezas de bajas dimensiones en 3D.

## GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Fueron generadas diferentes alternativas durante la búsqueda de soluciones para cada una de las partes o funciones que integraron el microcentro de maquinado. El procedimiento para la generación de estas alternativas fue:

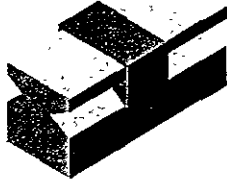
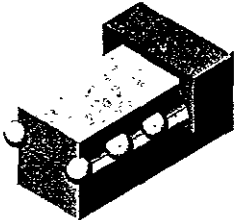
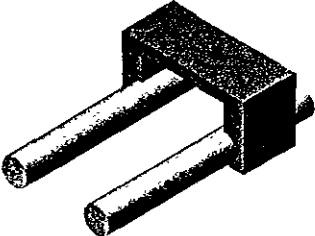
- ↳ Se realizó una lista requerimientos.
- ↳ Para cada parte o función se propusieron diferentes alternativas. Generando de esta manera diferentes soluciones.
- ↳ Se revisaron las posibles soluciones obtenidas, de tal manera que fue posible obtener las posibles combinaciones de soluciones entre todas las funciones.
- ↳ Se identificaron las posibles soluciones, en función de los objetivos.

Las partes que mayormente nos interesan son:

### ➤ Microcentro de maquinado:

- ↳ Ejes.
  - ✓ Guías.
  - ✓ Motores / Actuadores
  - ✓ Transmisión.
- ↳ Bastidor.
  - ✓ Porta herramientas.
  - ✓ Porta material.
- ↳ Dispositivos de control

Los resultados de este proceso de búsqueda de soluciones son:

Guías	
Solución 1	Cola de Milano 
Solución 2	Bolas 
Solución 3	Barras paralelas 

Motores / Actuadores	
Solución 1	Motor convencional de corriente directa
Solución 2	Servomotores
Solución 3	Motores de pasos

Transmisión	
Solución 1	Engranés
Solución 2	Cadenas
Solución 3	Bandas y poleas

Porta Herramientas	
Solución 1	De carrusel rotatorio
Solución 2	De posicionamiento ortogonal

Porta Material	
Solución 1	De apertura variable
Solución 2	Fijo

Dispositivos de Control	
Solución 1	Uso de microcontrolador externo
Solución 2	Uso de PC

Como puede apreciarse, se contaba con una gran cantidad de posibles soluciones, por lo que fue necesario utilizar técnicas de evaluación de alternativas para obtener la que mejor cumpliera con los objetivos planteados.



Para comparar las diferentes soluciones generadas, se asignó valor a cada una de los objetivos planteados. El procedimiento para la evaluación de estas soluciones fue:

- ↻ Listar los requerimientos planteados.
- ↻ Ordenar estos objetivos de manera jerárquica.
- ↻ Asignar valores relativos a cada objetivo.
- ↻ Establecer parámetros de rendimiento en función de evaluaciones en todos los objetivos para cada solución.
- ↻ Calcular y comparar diseños en función de resultados.

De esta manera se consideraron los siguientes objetivos con los siguientes valores:

Objetivo	Valor
Facilidad de Manufactura	3
<i>Performance</i>	3
Bajo costo	2
Facilidad para miniaturizar	2

De esta manera definimos que en cada objetivo se tiene una escala del uno al diez, estando en posibilidades de obtener un valor de hasta 100 puntos por cada propuesta de diseño.

Los resultados del proceso de evaluación son:

Guías					
Solución	Manufactura (3)	<i>Performance</i> (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
Cola de milano	8	9	7	7	79
Bolas	8	7	7	6	71
Barras paralelas	9	7	8	8	80

Motores / Actuadores					
Solución	Manufactura (3)	<i>Performance</i> (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
Motor convencional de corriente directa	10	6	10	10	88
Servomotores	8	9	8	7	81
Motores de pasos	9	10	10	9	95

Transmisión					
Solución	Manufactura (3)	<i>Performance</i> (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
Engranes	8	8	7	7	76
Cadenas	7	6	6	7	65
Bandas y poleas	7	6	8	7	69

Porta Herramientas					
Solución	Manufactura (3)	<i>Performance</i> (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
De carrusel rotatorio	6	9	6	8	73
De posicionamiento ortogonal	9	8	7	9	83

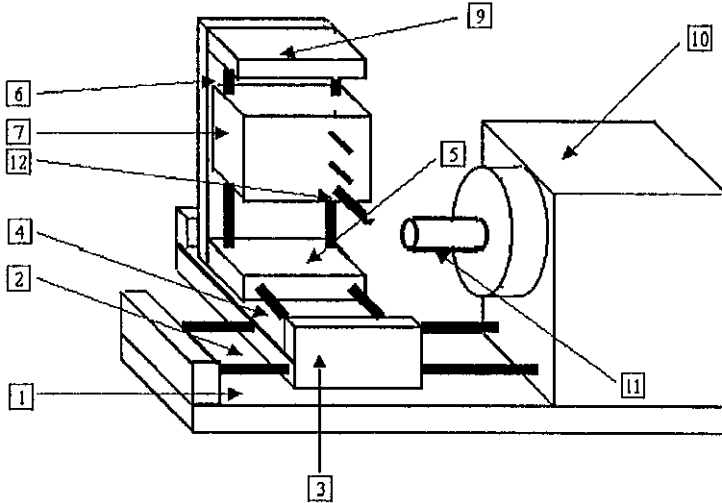
Porta Material					
Solución	Manufactura (3)	Performance (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
De apertura variable	6	9	8	6	73
Fijo	9	6	9	9	81

Dispositivos de Control					
Solución	Manufactura (3)	Performance (3)	Bajo costo (2)	Facilidad para miniaturizar (2)	Total
Uso de microcontrolador externo	8	8	7.5	8	79
Uso de PC	9	9	8	6	82

En lo que se refiere a la configuración general del equipo teníamos dos alternativas: seleccionar una configuración que tuviese como función base el fresado con posibilidades de instalación de un eje rotacional adicional para el torneado; o bien seleccionar, una configuración que permitiese como función base el crear piezas de revolución, con opción a fresado, cambiando el orden de montaje entre herramienta y pieza de trabajo.

Se seleccionó una configuración cuya función base sea el torneado, dado que aproximadamente el 80% de las piezas que se planeaban producir en este equipo, son piezas de revolución que pueden ser generadas con equipo de estas características.

De esta manera, la configuración propuesta se muestra en la figura 3.2, donde podemos identificar: un bastidor (1), tres juegos de guías (2), (4), (6), tres carros (3), (5), (7), estos últimos para proporcionar el movimiento a lo largo de los ejes X, Y, Z., el eje rotacional (10), la pieza de trabajo (11) y las herramientas 12.



*Figura 3.2. Configuración propuesta*

## DISEÑO DE DETALLE

Aquí se presentan las soluciones tomadas para la construcción del prototipo. Para el desarrollo de este equipo fue utilizada la experiencia reportada por el International Research and Training Center of Information Technology Systems, National Academy of Sciences of Ukraine, en la creación de su versión de este tipo de equipos.

Es importante mencionar que tras la descomposición funcional realizada, se inició el proceso de desarrollo de cada una de las partes que se relacionan con las funciones, sin embargo, existen técnicas especiales de diseño (para ensamble, para desensamble, óptimo, etc.), que pueden ser aplicadas a este tipo de equipos.

Las soluciones aquí mostradas resolvieron el problema planteado, sobre la base de las soluciones presentadas en la búsqueda y evaluación de alternativas, sin que esto indique que no es posible una evolución de las mismas, en función de un cambio en las especificaciones o bien, tras la aplicación de algunas técnicas de optimización.

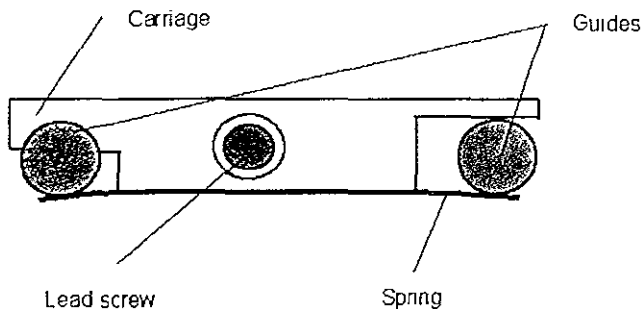
## EJES

Los ejes de translación se diseñaron para ser formados por conjuntos de guías y carros. Los tres ejes propuestos para translación presentan la misma configuración.

Las guías para carros, consisten en un par de barras redondas paralelas de acero AISI 4140. Esta solución fue tomada para simplificar la manufactura, ensamble y su futuro decremento de dimensiones en generaciones subsecuentes.

Los carros se diseñaron con componentes que deslizan sobre las guías y son fabricados en latón. Se manufacturaron características de medios cilindros para que estos ajusten sobre las guías.

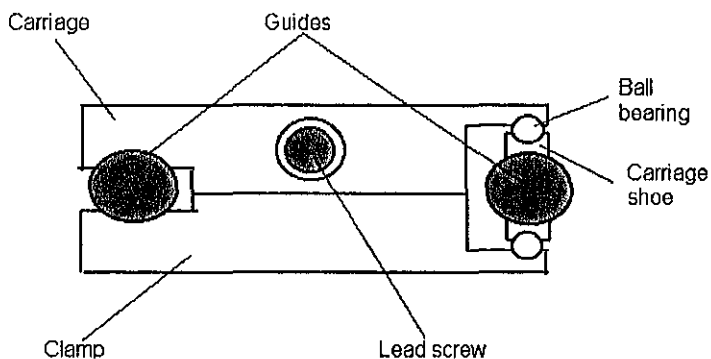
Primeramente fueron planteados sistemas de resortes para evitar el posible juego entre las guías y los carros, sin embargo estos no presentaron una adecuada rigidez en su operación. Esta configuración es mostrada en la figura 3.3.



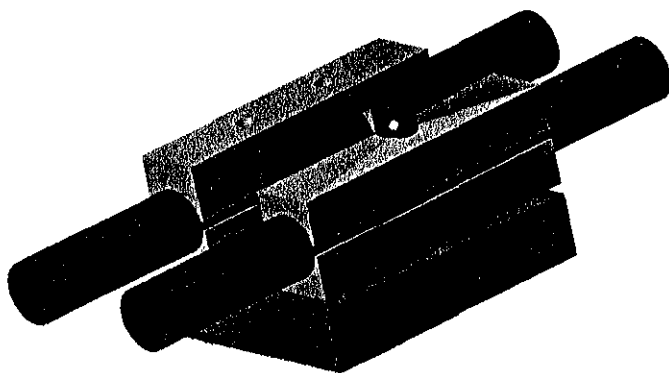
*Figura 3.3. Primera configuración probada en la construcción del microcentro de maquinado.*

De esta manera se decidió implementar un sistema que presentara mejores condiciones de rigidez, pero que de igual manera cumpliera con las condiciones de bajo costo y sencillez de manufactura y ensamble.

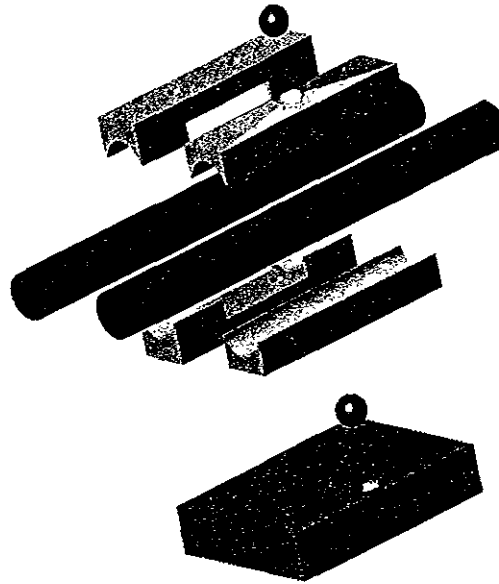
Es así como se implementó el uso de esferas metálicas (balines), de 4mm de diámetro, para obtener un grado de apoyo más robusto. El uso de estos balines, permite el deslizamiento a lo largo de la guía, absorbiendo las posibles variaciones generadas por problemas de manufactura, o bien derivadas de efectos térmicos durante largas jornadas de servicio. La configuración propuesta se muestra en las figuras 3.4a, 3.4b y 3.4c.



*Figura 3.4a. Esquema de la configuración propuesta para la construcción de la máquina.*

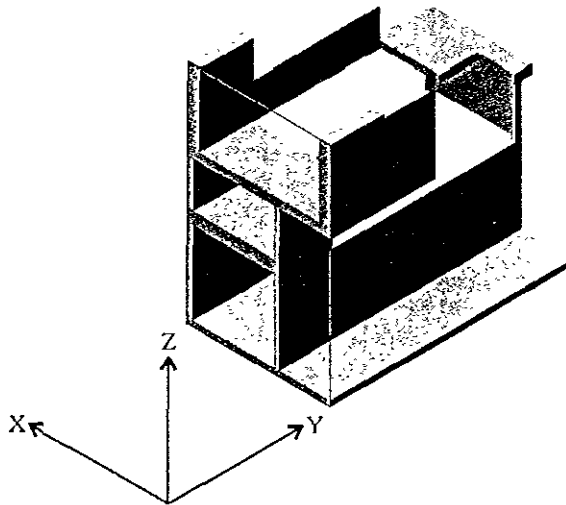


*Figura 3.4b. Diseño en ensamble de guías y carros.*



*Figura 3.4c. Vista en explosión de guías y carros.*

Un esquema de la configuración de ejes planteada para el microcentro de maquinado es mostrado en la figura 3.5.



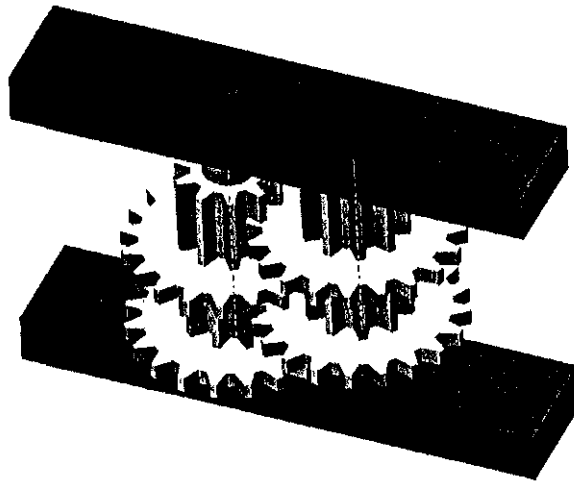
*Figura 3.5. Arreglo de ejes translacionales propuesto para el microcentro de maquinado.*

Para el desplazamiento del carro a lo largo de las guías se utilizó un tornillo acoplado a una caja reductora que será descrita posteriormente.

El desplazamiento total diseñado para cada eje varía en función del eje de trabajo del que hablemos, de tal suerte tenemos: 20 mm de desplazamiento en el eje X y en Z, mientras que para el eje Y se definió con la misma configuración un desplazamiento de 70 mm.

La resolución de cada uno de los ejes, es determinada por el movimiento angular obtenido a la salida del reductor de velocidad y por el paso de un tornillo colocado al centro de las dos guías, y que proporciona movimiento a los carros.

La caja de reducción, con relación 84.7:1, se encuentra formada por: 6 engranes dobles, 10 y 20 dientes, de Nylon (comerciales en equipos electrónicos), y un par de engranes de latón fabricados en el LIMCI. La caja reductora planteada se forma con tres módulos, el primero es un engrane que se coloca en la flecha de salida del motor, el segundo es un módulo compuesto por 4 engranes plásticos, y el tercero de ellos es uno terminal con un engrane de plástico y un par de engranes metálicos que se acoplan con el tornillo correspondiente a cada eje, figura 3.6.



*Figura 3.6. Parte central de la caja reductora.*



El tornillo utilizado para proporcionar movimiento a los carros es de acero 4140, con un diámetro de 3.175mm (1/8") y 40 hilos por pulgada.

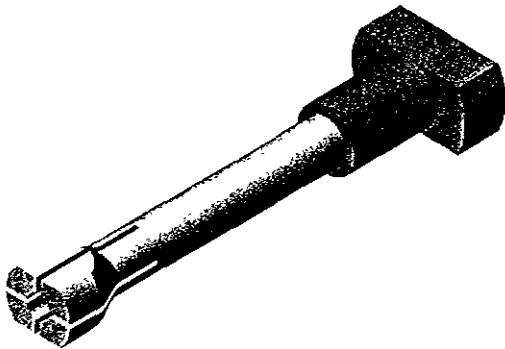
De esta manera se determinó que: con toda esta configuración mecánica, por cada revolución a la entrada de nuestro sistema de reducción (motor), obtenemos 7.5µm de avance lineal.

Fue seleccionado este tipo de transmisión de potencia, pese a sus inconvenientes de juego o **backlash**, dado que presenta bajo costo y un ensamble muy sencillo.

Para el eje rotacional (cuarto eje), se diseñó una configuración sencilla de reductor de velocidad de 18 a 1, acoplado directamente al sistema de sujeción mostrado más adelante

### SISTEMAS DE SUJECIÓN

El sistema de sujeción planteado para la pieza de trabajo, en caso de tratarse de operaciones de revolución (torneado, taladrado, etc.), es un accesorio de forma cilíndrica, que tiene un barreno pasado en la parte central de este, y dos cortes diametrales ortogonales. Todo este sistema mantiene un grado de sujeción adecuado, al ser colapsado de forma radial con la ayuda de la fuerza axial producida al tensar dicho cilindro. Este sistema es mostrado en la figura 3.7.



*Figura 3.7. Sistema de sujeción para operaciones de revolución.*

El sistema mostrado en la figura 3.8, es el diseño para la sujeción de herramientas en las operaciones descritas anteriormente.

Este diseño, es una torre de herramientas que permite el alojamiento de manera vertical de diferentes configuraciones de cortadores(1). De manera adicional se cuenta con un accesorio que permite colocar herramientas de manera paralela al eje rotacional (2), consiguiendo con esto operaciones de acción radial y axial. Todo el porta herramientas utiliza tornillos para su sujeción (3).

Cuando es el caso, se coloca la herramienta sobre el eje rotacional, y la pieza de trabajo es montada sobre la base de herramientas, consiguiendo con esto operaciones de fresado.

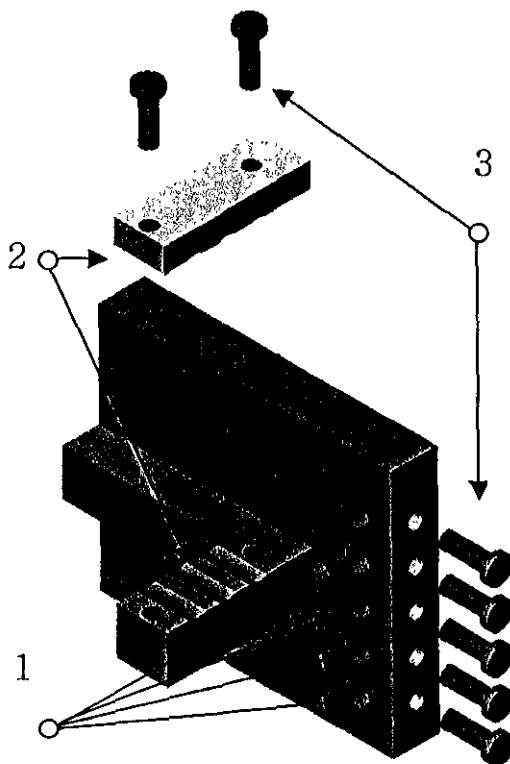
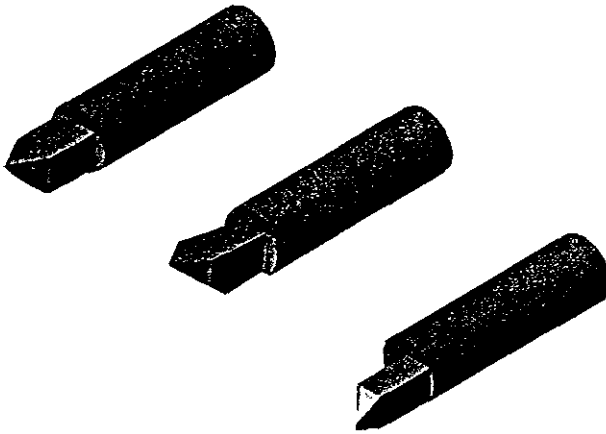


Figura 3.8. Sistema porta herramientas

## HERRAMIENTAS

De manera inicial se fabricaron herramientas de corte, afilando de manera manual aceros rápidos, obtenidos de la parte trasera de brocas.

Como en el caso de escala humana; los procesos de afilado, materiales de la herramienta, y parámetros de corte, determinan la aplicación y la eficiencia de las mismas. Ejemplos de éstas se muestran en la figura 3.9.



*Figura 3.9. Herramientas utilizadas en el centro de maquinado.*

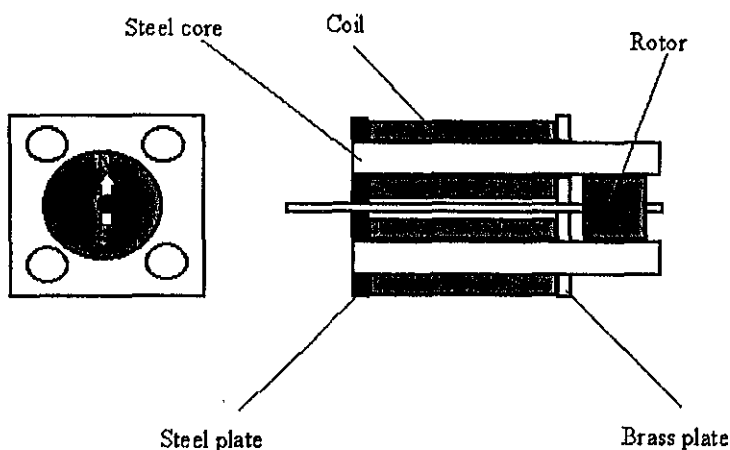
## MOTORES Y ACTUADORES

Para proporcionar movimiento al centro de maquinado, fue necesario considerar diferentes alternativas de actuadores y motores, sin embargo, decidimos utilizar la experiencia en el desarrollo de motores de pasos del Dr. Kussul, dado que éstos presentan sencillez de manufactura, ensamble y bajo costo. Adicionalmente estos motores no presentan detalles difíciles de escalar al momento de pensar en futuras generaciones de microequipo.

La primera versión de motores (mostrada en la figura 3.10), se refiere a motores de pasos que contienen 4 bobinas con alma de fundición gris, soportadas por una placa de latón y otra de acero, que

de igual manera soportan al eje del rotor. El rotor fue fabricado de material permanentemente imantado y es magnetizado de forma radial. Las bobinas fueron conectadas de manera cruzada y sin punto central, de esta manera el motor contaba con cuatro puntos de contacto de entrada.

De acuerdo con la descripción anterior, es posible deducir que el motor cuenta con cuatro pasos por revolución, y puede ser forzado a ocho medios pasos.

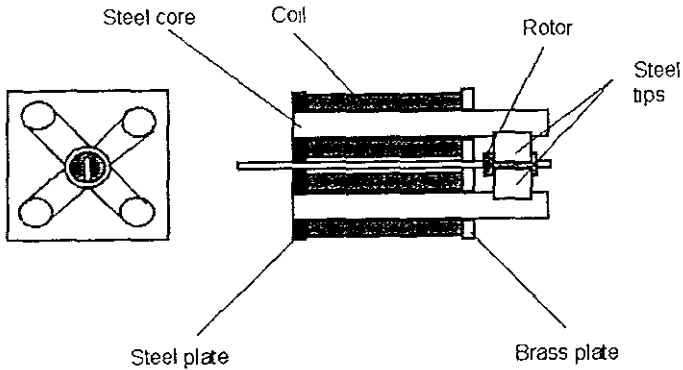


*Figura 3.10. Primer prototipo de motor de pasos.*

De este primer prototipo de motor de pasos, detectamos problemas de operación relacionados con el modo dinámico. Estos motores tenían un momento de inercia alto, por lo que fue necesario trabajar en la reducción del mismo. Para esto, se diseñó un rotor con un menor momento de inercia, reduciendo éste alrededor de tres veces comparado con el primer diseño.

Un esquema del diseño de este segundo prototipo de motor de pasos es mostrado en la figura 3.11. Con este segundo prototipo obtuvimos mejores velocidades de motor.

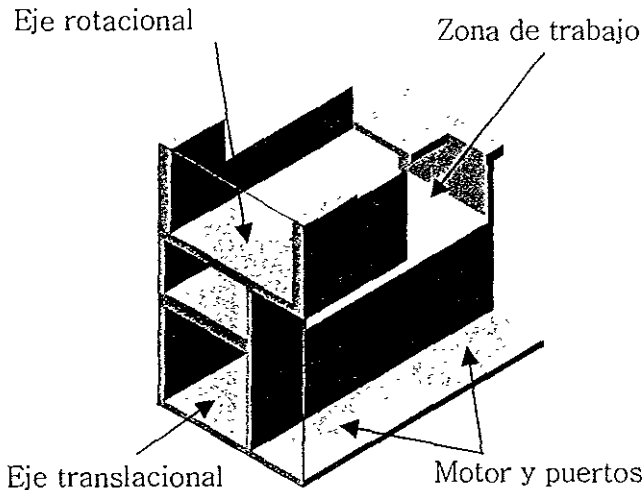
Las velocidades registradas para los motores oscilan entre las 500 y los 5000 pasos por minuto.



*Figura 3.11. Segundo prototipo de motor de pasos.*

## BASTIDOR

El sistema de montaje y bastidor de la máquina se planteó de geometría sencilla, ésta en su mayoría fue fabricada en placa de aluminio de 6.35 mm y 3.18mm ( $\frac{1}{4}$ " y  $\frac{1}{8}$ " respectivamente). En la figura 3.12 se muestra el bastidor usado para el montaje de los componentes del centro de maquinado.



*Figura 3.12. Bastidor usado en la construcción del centro de maquinado.*

## DISPOSITIVOS DE CONTROL

El sistema de control de este prototipo fue diseñado con el objetivo de emplear una computadora personal y eliminar hardware externo.

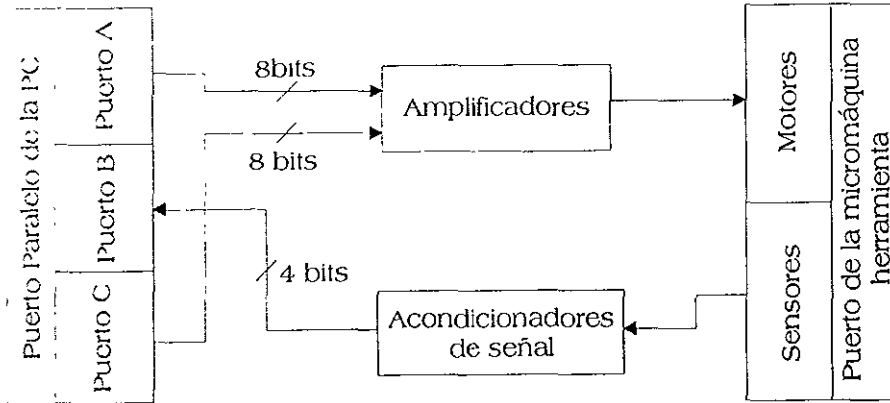
Hasta este momento el hardware externo está compuesto por un amplificador de DC de 16 canales.

El puerto del microcentro de maquinado debía contener los conectores para los motores de pasos, y para la señal de los sensores de contacto. La señal de los sensores es enviada hacia los acondicionadores de voltaje TTL, para que puedan ser leídos en el puerto paralelo de la PC. El estado de cada uno de los motores es determinado por los datos que se encuentran en el puerto A del puerto paralelo de la PC.

Para mover un paso el motor, en la computadora se tenía que realizar un cambio en cuatro bits. Para obtener una velocidad aceptable en el movimiento de los carros se decidió hacer trabajar los motores de pasos en modo estático.

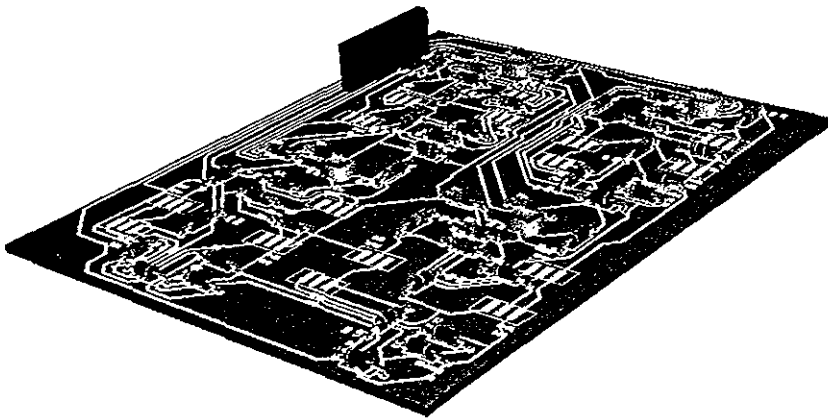
La retroalimentación de la micromáquina herramienta a la computadora fue realizada con la ayuda de cuatro sensores de contacto, tres de ellos colocados para determinar la posición inicial de los carros y el restante para detectar la posición de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Este último sensor es con el fin de determinar las posiciones relativas de diferentes instrumentos empleados en los procesos de manufactura. Esta característica es usada para determinar dimensiones en la pieza. Se decidió el uso de contacto eléctrico, dada su facilidad de operación, pero únicamente existe retroalimentación con piezas de trabajo metálicas. El diagrama de control se muestra en la figura 3.13, mientras que en la figura 3.14 se muestra el diseño por computadora de los circuitos empleados.



*Figura 3.13. Sistema de control del prototipo.*

El lenguaje de programación empleado para desarrollar el programa de control para esta micromáquina es Borland C++, dada su facilidad para el manejo de puertos y pocos recursos necesarios para su operación.



*Figura 3.14. Diagrama del circuito generado por computadora.*

En los anexos de este trabajo se presentan algunos subensambles de partes de este microcentro de maquinado.

## **PRUEBAS DEL EQUIPO Y RESULTADOS**

*En este capítulo se describen los productos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Se muestran imágenes del equipo obtenido, así mismo, se presentan mediciones realizadas a piezas realizadas en el mismo.*

### **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

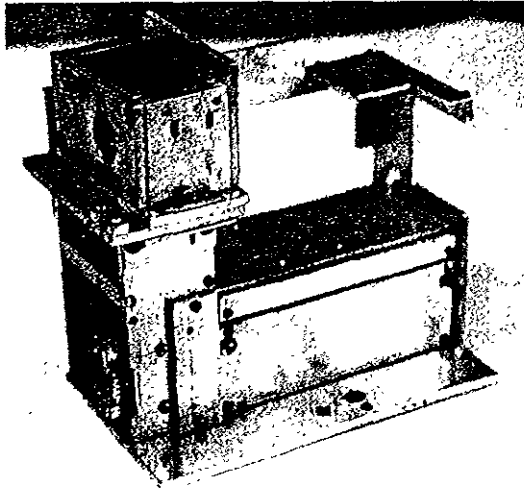
El trabajo anteriormente descrito, resultó en un prototipo, manufacturado en su mayoría con herramientas de mano, o bien con máquinas herramientas convencionales.

El prototipo desarrollado en el LIMCI, es el resultado más importante de este trabajo. Este equipo, es el primer prototipo de la primera generación de micromáquinas herramientas (MicroEquipo), desarrollado en México.

El costo en materiales fue de aproximadamente \$100usd, mientras que el tiempo efectivo de trabajo invertido por tres personas fue de aproximadamente 1000 horas

Sus partes estructurales (bastidor), son en mayoría de placa de aluminio de 3.125 y 6.35mm (1/8" y 1/4" respectivamente), placa de latón de 3.125 y 6.35mm (1/8" y 1/4" respectivamente), realizando las uniones con tornillos de 2mm. El bastidor del microcentro de maquinado es mostrado en la figura 4.1.

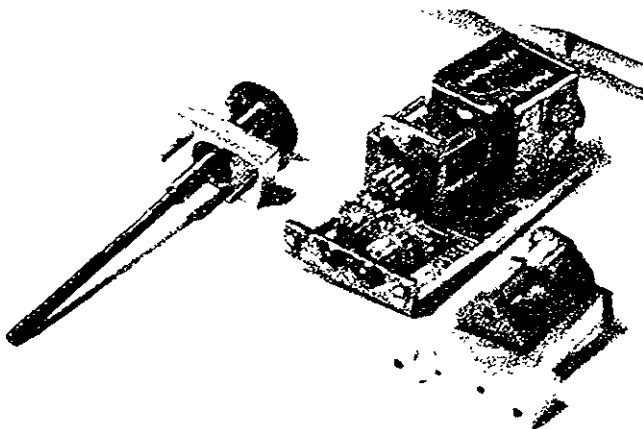




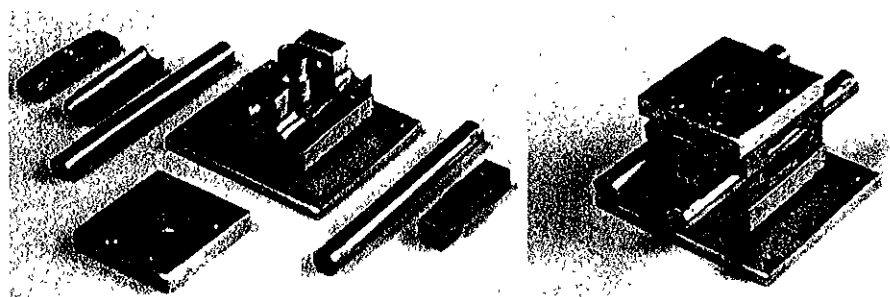
*Figura 4.1. Bastidor.*

Para los movimientos translacionales (tres ejes ortogonales), se colocaron tres arreglos de motor de pasos, reductor de velocidad, tornillo de avance y guías con carros; obteniendo de esta manera un sistema de fácil armado y con una resolución de  $1.875\mu\text{m}$  por cada paso de avance del motor. La alimentación de la máquina es con 12volts de corriente directa.

Los arreglos de ejes translacionales son mostrados en las figuras 4.2a y 4.2b.

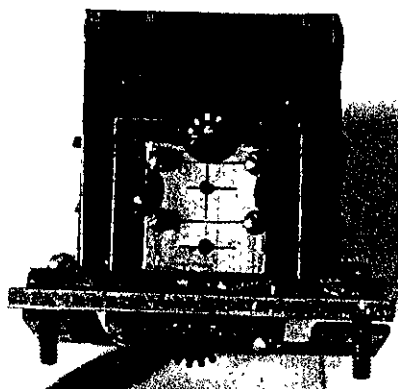


*Figura 4.2a. Motor de pasos y transmisión para ejes translacionales.*



*Figura 4.2b. Guías y carros.*

El movimiento rotacional (cuarto eje), es conseguido con la ayuda de otro motor de pasos, éste acoplado a un reductor de 18 a 1. Este arreglo se muestra en la figura 4.3.

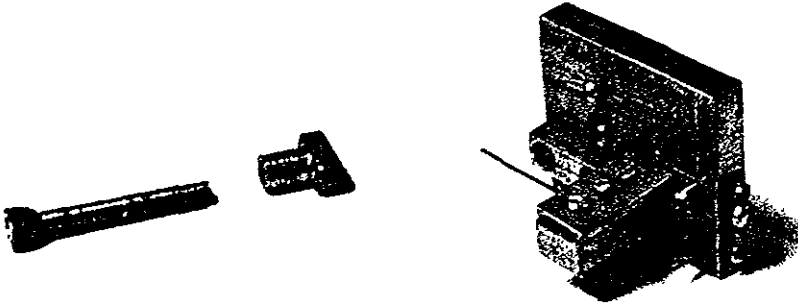


*Figura 4.3. Motor de pasos y transmisión para eje rotacional (cuarto eje).*

De esta manera tenemos velocidades de avance para los ejes ortogonales de 33mm/minuto y velocidades angulares para el eje rotacional de 196 rpm.

El desplazamiento total de cada eje varía en función del eje de trabajo del que hablemos, de tal suerte tenemos: 20 mm de desplazamiento en el eje X y en Z, mientras que para el eje Y se definió con la misma configuración un desplazamiento de 35 mm.

Los sistemas porta herramienta y porta pieza, son mostrados en la figura 4.4. Ambos, son fabricados en latón. El porta herramientas permite el acomodo de hasta cuatro herramientas o accesorios.



*Figura 4.4. Sistemas de sujeción (Porta Piezas y Porta Herramientas).*

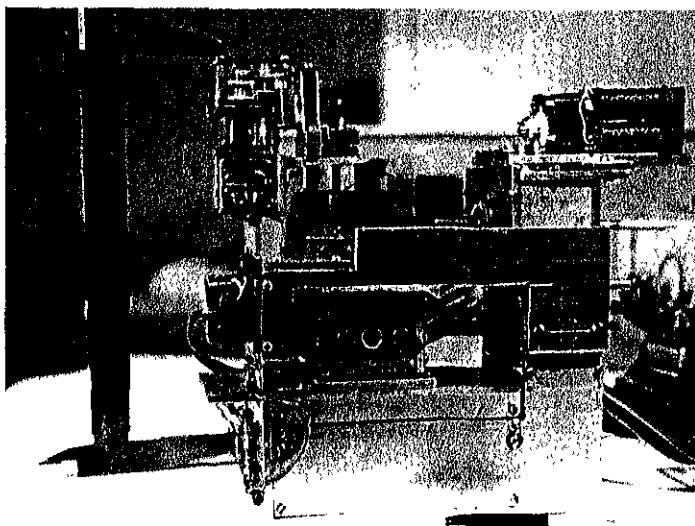
El sistema de control se encuentra delegado totalmente a una computadora personal, mediante la conexión del microcentro de maquinado a esta, por medio de dos puertos paralelos.

Por estos puertos es enviada, de la computadora a la máquina, la información de movimiento a los cuatro motores de pasos, mientras que de la máquina herramienta, la computadora recibe la información de posición de origen de los ejes translacionales por medio de cuatro microinterruptores colocados en el inicio de desplazamiento de éstos.

Por otro lado, la máquina envía información de la posición de cortadores (en el caso de piezas metálicas), dado el cierre de un circuito eléctrico formado entre estos y la pieza de trabajo.

Como sistema de control, la máquina utiliza software, desarrollado en Borland C++. En estos programas existe un tronco central, que contiene las instrucciones de avance rápido, posicionamiento al origen y activación de sensores. Independiente a este módulo base, se programa: la geometría a manufacturar, las herramientas a ocupar, las velocidades y avances de corte, el número de piezas a manufacturar, etc.

Se describió una micromáquina herramienta con configuración de microcentro de maquinado (figura 4.5), con dimensiones de 13x16x8.5cm, sin contar las etapas de potencia y la fuente de voltaje.



*Figura 4.5. Prototipo completo.*

## **PIEZAS FABRICADAS EN EL MCM**

Piezas desarrolladas con este quipo, son mostradas en la figura 4.6..



*Figura 4.6. Piezas manufacturadas en el prototipo de microcentro de maquinado (comparación con la cabeza de un cerillo)*

Se seleccionaron diferentes piezas generadas en el Micro Centro de Maquinado (MCM), para ser dimensionadas con la ayuda de un proyector de perfiles (comparador óptico), marca Nikon, Modelo V16D, perteneciente al Laboratorio de Metrología del Centro de Instrumentos. Este equipo es mostrado en la figura 4.7.



*Figura 4.7. Proyector de perfiles Nikon V-16D.*

Las piezas seleccionadas son:

- ↳ Tornillo
- ↳ Barra con varios diámetros
- ↳ Engrane

↪ Tornillo sin fin

Las condiciones bajo los cuales fueron realizadas las pruebas son:

↪ Temperatura ambiente de 20°C.

↪ Humedad relativa del 50%.

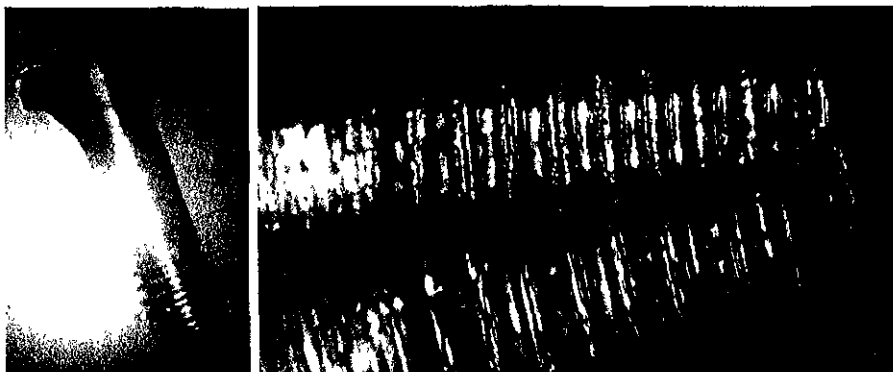
↪ 1μ de resolución en el equipo de medición.

## TORNILLO

La primer pieza analizada, es un tornillo (figura 4.8). Los resultados de las mediciones realizadas a esta pieza son mostrados en la tabla 4.1. En los anexos de este trabajo se presenta el programa para la manufactura de un tornillo.

Descripción	Valor Teórico	Valor medido
Diámetro de cabeza	1580μm	1585μm
Diámetro de tornillo	800μm	796μm
Profundidad de cuerda	30μm	32μm
Longitud total	----	329μm
Longitud de cuerda	----	858μm
Hilos por milímetro	7.2	7.24

*Tabla 4.1. Mediciones realizadas a la pieza de prueba 1.*



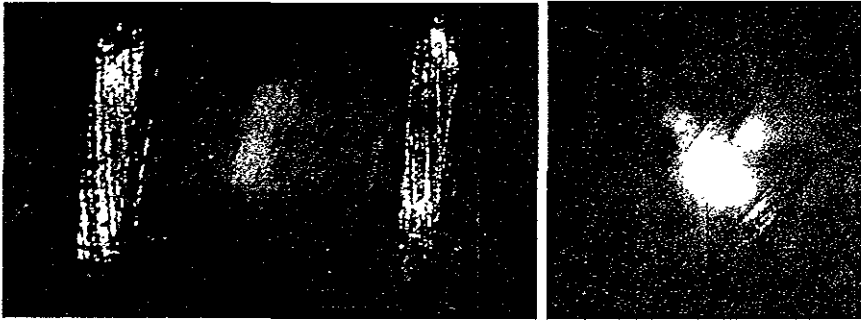
*Figura 4.8. Tornillo en proyector de perfiles (izquierda), y amplificado 50 veces (derecha).*

## TORNILLO SIN FIN

La segunda pieza analizada, fue un tornillo sin fin, mostrado en la figura 4.9. Los resultados de las mediciones realizadas a esta pieza son mostrados en la tabla 4.2.

Descripción	Valor teórico	Valor medido
Diámetro de tornillo	2600 $\mu\text{m}$	2610 $\mu\text{m}$
Profundidad de cuerda	60 $\mu\text{m}$	57 $\mu\text{m}$
Longitud total	----	3300 $\mu\text{m}$
Longitud de cuerda	2500 $\mu\text{m}$	2610 $\mu\text{m}$
Hilos por milímetro	1	1.15

*Tabla 4.2. Mediciones realizadas a la pieza de prueba 2.*



*Figura 4.9. Pieza 2.*

## BARRA CON DIFERENTES DIÁMETROS

La tercera pieza analizada, es una barra con diferentes diámetros, figura 4.10. Los resultados de las mediciones realizadas a esta pieza son mostrados en la tabla 4.3.

Descripción	Valor teórico	Valor medido
Diámetro exterior	3480 $\mu\text{m}$	3485 $\mu\text{m}$
Segundo diámetro	2180 $\mu\text{m}$	2185 $\mu\text{m}$
Tercer diámetro	990 $\mu\text{m}$	989 $\mu\text{m}$
Longitud total	----	8732 $\mu\text{m}$
Longitud segundo diámetro	1910 $\mu\text{m}$	1913 $\mu\text{m}$
Longitud de tercer diámetro	1680 $\mu\text{m}$	1681 $\mu\text{m}$

*Tabla 4.3. Mediciones realizadas a la pieza de prueba 3.*



*Figura 4.10. Pieza 3.*

## ENGRANE

La cuarta pieza analizada, es un engrane, figura 4.11. Los resultados de las mediciones realizadas a esta pieza son mostrados en la tabla 4.4.

Descripción	Valor teórico	Valor medido
Diámetro exterior	1700	1695 $\mu\text{m}$
Diámetro de barreno interior	800	802 $\mu\text{m}$
Número de dientes	12	12

*Tabla 4.4. Mediciones realizadas a la pieza de prueba 4.*



*Figura 4.11. Engrane.*



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tanto las piezas, como el microcentro de maquinado presentado, cumplieron los objetivos propuestos, tanto en resolución, costo, y en el potencial de piezas a producir.

De acuerdo con las piezas mostradas y la operación de la máquina, podemos encontrar que existe backlash asociado al sistema de transmisión, detectado en la unión del tornillo y la tuerca de potencia entre las guías.

Las piezas anteriormente presentadas fueron desarrolladas y evaluadas como parte de ejercicios de manufactura de este microcentro de maquinado.

Las dimensiones aquí reportadas únicamente describen el comportamiento del MCM con determinados tipos de piezas, y que a su vez no fueron desarrolladas con algoritmos de programación con auto compensación.

Desde el inicio de este trabajo, hasta el momento de su presentación, se trabaja en el desarrollo de mejoras vía software, requiriendo para esto una caracterización que permitió el introducir elementos de compensación por eje y herramienta.

Destacan las ventajas obtenidas en la producción de piezas en 3D, sobre las tecnologías convencionales (MEM's), para producción de microequipo.

Cuando se analizan las piezas obtenidas bajo el microscopio, es posible detectar que los acabados pueden mejorarse en virtud de mejores herramientas, procesos y resolución de la máquina.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

*Aquí se analizan los resultados obtenidos y se proponen los siguientes pasos para la continuación de este trabajo.*

### **CONCLUSIONES**

Como resultado, se desarrolló un MicroCentro de Maquinado (MCM). Con dimensiones totales de 130×160×85mm, controlado mediante el uso de una computadora personal y software elaborado en Borland C++.

Este microcentro de maquinado tiene como configuración: tres ejes translacionales ortogonales, y un eje adicional rotacional.

El volumen de trabajo obtenido con este microcentro de maquinado es de: 20 mm de desplazamiento en los ejes X y Z, mientras que para el eje Y se definió con la misma configuración un desplazamiento de 35 mm.

La resolución manejada con el conjunto de transmisión y motor de cuatro pasos (similar para los tres ejes translacionales), es de 1.9 $\mu$ m.

Hablando de la exactitud del equipo, se aprecia que ésta puede mejorar con la introducción de nuevos sistemas de transmisión de potencia (en específico con un cambio en el paso de los tornillos usados para los desplazamientos ortogonales).

Durante el desarrollo de este trabajo, fueron planteados los conceptos básicos que rodean el desarrollo de microequipo. Se realizó una comparación sencilla con las técnicas desarrolladas en el ámbito mundial entorno a la misma.

De igual manera se planteó el marco teórico propuesto en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos, con el fin de desarrollar microequipo de bajo costo.

Este trabajo demuestra con el caso de estudio, que las técnicas presentadas en el segundo capítulo para el desarrollo de microequipo, son válidas para el microcentro de maquinado presentado.

## **RECOMENDACIONES**

El microcentro de maquinado desarrollado representa el primer prototipo, de la primera generación, de microequipo desarrollado en México. De igual manera se plantea que cada generación derivada de esta, será de dimensiones inferiores a la generación que precede, con lo que es posible afirmar que es solamente el principio de la miniaturización de la Ingeniería Mecánica convencional.

Con la experiencia en el desarrollo de este microequipo, se identificaron problemas de miniaturización que se presentarán en futuras generaciones, tales como la necesidad de sistemas de visión en tiempo real para las tareas de control.

Las herramientas utilizadas en este microcentro de maquinado, fueron afiladas a mano. Sin embargo, es necesario plantear nuevos materiales y procesos de afilado.

De igual manera se identifica la necesidad de investigar nuevas configuraciones de mecanismos y técnicas de ensamble, para futuras generaciones de equipo, logrando identificar en corto plazo, la demanda de un micromanipulador para el manejo de los productos generados.

En un futuro de mediano plazo, el software de esta tecnología deberá auto diagnosticarse, logrando con esto la introducción automática de algoritmos para la compensación por desgaste, estado de herramientas, y estado del hardware en general.

Con el fin de este trabajo, se tienen las bases para el desarrollo de productos en el corto plazo (como son los microfiltros desarrollados en el mismo LIMCI). Aplicaciones de mediano plazo (ensamble de microtarjetas electrónicas flexibles y de bajo costo), así como y el inicio de desarrollo de nuevos microequipos.

De igual manera se recomienda iniciar el desarrollo de la segunda generación de microequipo, que además de ofrecer las características y fundamentos presentados en este trabajo, podrá incluir ventajas tecnológicas derivadas del uso de otros procesos y tecnologías.

## REFERENCIAS

*Se presentan los artículos y libros utilizados en el desarrollo de este trabajo.*

Bier W., Keller W., Linder G., Siedel D., Schubert K., Martin H. **Gas-to Gas Transfer in Micro Heat Exchangers.** // Chemical Engineering and Processing, 1993, V.32, pp 33-43.

Caprari G., Balmer P., Piguët R., Siegwart R. **The Autonomous Micro Robot "Alice": a Platform for Scientific and Commercial Applications.** //International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998, pp. 231-235.

Cibuzar G., Polla D., McGlennen R. **Biomedical MEMS Research at the University of Minnesota.** //Proceedings of the 12-th Biennial University/Government/Industry Microelectronics Symposium, 1997, pp 145-149.

Clark, W.M., **A Manual of Mechanical Movements;** Garden City Publishing Co.; 1947.

Cochran, W.G.; **Experimental Designs;** Wiley; 1957.

Cross, N; **Engineering Design Methods;** John Wiley & Sons; 1994

Dohi T. **Computer Aided Surgery and Micro Machine.** // Proceedings of the 6-th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95, pp 21-24

E.M.Kussul, D.A.Rachkovskij, T.N.Baidyk et al. **Micromechanical engineering: a basis for the low cost manufacturing of mechanical**

**microdevices using microequipment.** // J. Micromech. Microeng. - 1996. - 6. - P. 410-425.

Eddy D.S., Sparks D.R. **Application of MEMS Technology in Automotive Sensors and Actuators.** //Proceedings of the IEEE, V.86, Issue 8, 1998, pp 1747-1755.

Friedrich C., Kang S. **Micro Heat Exchangers Fabricated by Diamond Machining.** //Precision Engineering, 1994, V.16, pp 56-59.

Friedrich C.R. and Kang S.D. **Micro Heat Exchangers Fabricated by Diamond Machining.** //Precision Engineering, 1994, 16, pp 56-59.

Friedrich C.R. and Vasile M.J. **Development of the Micromilling Process for High- Aspect- Ratio Micro Structures.** //J. Microelectromechanical Systems, 1996, 5, pp 33-38.

Fujita H. **Microactuators and Micromachines.** // Proceedings of the IEEE, VOL.86, 1998, N8, pp 1721-1732.

Fukuda, T.; **Micro Mechanical Systems, Principles and Technology;** ELSEVIER; 1998.

Hayashi I., Iwatsuki N. **Micro Moving Robotics.** //International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998, pp. 41-50.

Ishihara H., Arai F., Fukuda T. **Micro Mechatronics and Micro Actuators.** //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996, V.1, pp68-79.

**ISO Standard Handbook 5, Machine Tools;** ISO; 1987.

Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina I., Baydyk T.: **The perspectives of micro mechanical filters application for fine filtration of liquids and gases;** First International Conference on Mechatronics and Robotics; Saint-Petesburg, Russia; May 29-June 2, 2000; Proceedings Volume1; pp 103-108.

Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina I., Baydyk T; **CNC machine tools for low cost micro devices manufacturing;** First

International Conference on Mechatronics and Robotics; Saint-Petesburg, Russia; May 29-June 2, 2000; Proceedings Volume1; pp 98-103

Kussul E.M. **Micromechanics as a New Area of Neural Network Applications.** //EUFIT'97, 1997, vol.1, pp 521-523.

Kussul E.M., Bajdyk T.N., Rachkovskij D.A., Talayev S.A. **The Method of Micro Devices Manufacturing.** //Russian Patent N 2105652.

Kussul E.M., Rachkovskij D.A., Artykutsa S.Y., Kasatkin A.M., Kasatkina L.M., Lukovich V.V., Talayev S.A. **Adaptive Control System for Fully Automated Micromechanical Factory: The Problems and Possible Neural Network Solutions.** //EUFIT'97, 1997, V.1, pp.524-527.

Madni A.M., Wan L.A. **Micro Electro Mechanical Systems (MEMS): an Overview of Current State-of-the Art.** //Aerospace Conference, 1998 IEEE, V.1, pp 421-427

Mazuzawa T. **An Approach to Micromachining through Machine Tool Technology.** //Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Micro Machine and Human Science (Nagoya, Japan), 1991, pp 47-52.

Ohlckers P., Hanneborg A., Nese M., **Batch processing for micromachined devices** // J. Micromech. Microeng. - 1995. - 5. - P.47-56

P.Rai-Choundhury; **Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication;** SPIE Press, 1997.

Plauger, P.J.; **Standard C;** Microsoft Press; 1989.

Rachkovskij D.A., Kussul E.M., Talayev S.A. **Heat Exchange in Short Microtubes and Micro Heat Exchangers with Low Hydraulic Losses.** //Microsystem Technologies, 1998, V.4, pp 151-158.

**Some Micro Machine Activities in Japan.** //Report ATIP96.021, 1996.

Sun L., Sun P., Qin X., Wang C., **Micro Robot in Small Pipe with Electromagnetic Actuator.** //International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998, pp. 243-248.

Trimmer, W. S.; **Micromechanics and MEMS, Classic and Seminal Papers to 1990;** IEEE; 1996.

Weck, Manfred; **Handbook of Machine Tools;** Vol. 1, 2 y 3; John Wiley & Sons; 1984.

Wu S., Mai J., Tai Y.C., Ho C.M. **Micro Heat Exchanger by Using MEMS Impinging Jets.** //12-th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 1999, pp 171-176.

Wunsch D.C., Kussul N.N., Kussul M.E. **Adaptive Critic Design for Optimization of Micromechanical Factory Neural Control Systems.** //EUFIT'97, 1997, V.1, pp.528-533.

Yamagata Y. and Higuchi T. **Four Axis Ultra Precision Machine Tool and Fabrication of Micro Parts by Precision Cutting Technique.** //Proc. 8<sup>th</sup> Int. Precision Engineering Seminar (Compiègne, France) 1995, pp.467-470.



## ANEXOS

*Se coloca información relacionada con el trabajo, que no es el motivo del mismo, sin embargo fué necesario para su realización.*

### PROGRAMA

Aquí se muestra un ejemplo del programa, elaborado en Borland C++ , para la fabricación de un tornillo

```

/* This program must make un tornillo */

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <process.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>

#define A 0x378
#define B 0x379
#define C 0x37A
#define D 0x278
#define E 0x279
#define F 0x27C

#define N 250

unsigned char rgrX[]={0x9,0xC,0x6,0x3};
unsigned char rgrY[]={0x9,0xC,0x6,0x3};
unsigned char rgrZ[]={0x6,0xC,0x9,0x3};
unsigned char rgrSpind[]={0x6,0xC,0x9,0x3};
int timer(void);
void set_channel12_0(unsigned);
unsigned get_from_channel12(void);
long X,Y,Z,Q;

```

```

float MicroPP=1.9;

int XForwardRot(long StepNum,unsigned char SpeedX,unsigned char
SpeedRot);
int YForwardRot(long StepNum,unsigned char SpeedY,unsigned char
SpeedRot);
int ZForwardRot(long StepNum,unsigned char SpeedZ,unsigned char
SpeedRot);

int XForwardRot0(long StepNum,unsigned char SpeedX,unsigned char
SpeedRot);
int YForwardRot0(long StepNum,unsigned char SpeedY,unsigned char
SpeedRot);
int ZForwardRot0(long StepNum,unsigned char SpeedZ,unsigned char
SpeedRot);

int XForward(long dX,unsigned char Speed);
int YForward(long dY,unsigned char Speed);
int ZForward(long dZ,unsigned char Speed);

int XForward0(long dX,unsigned char Speed);
int YForward0(long dY,unsigned char Speed);
int ZForward0(long dZ,unsigned char Speed);

int SpindForward(long dSpind,unsigned char Speed);

int XBack(long dX,unsigned char Speed);
int YBack(long dY,unsigned char Speed);
int ZBack(long dZ,unsigned char Speed);
int SpindBack(long dSpind,unsigned char Speed);

int XBack0(long dX,unsigned char Speed);
int YBack0(long dY,unsigned char Speed);
int ZBack0(long dZ,unsigned char Speed);

int XStart(long dX,unsigned char Speed);
int YStart(long dY,unsigned char Speed);
int ZStart(long dZ,unsigned char Speed);
int ZPS(long dZ,unsigned char Speed); /*Busca perdida de contacto
en diametro*/
int ZPB(long dZ,unsigned char Speed);

signed char aX,aY,aZ,aSpind;
long XB=50000L;
long YB=50000L;
long ZB=50000L;
long START=1000L;
unsigned char VMAX=16;
long x1,y1,z1,q1,x2,y2,z2,q2;

main(void)
{

```

```

long i, j, k, x1, y1, z1, R, CP, YMAT;
long VY=50L;
long Npass;
long DY;

XBack(1000, 16);

YBack(YB, VMAX);
YBack0(50L, 16);
YStart(START, 50);

XBack(XB, VMAX);
XBack0(50L, 16);
XStart(START, 50);

ZBack(ZB, VMAX);
ZBack0(50L, 16);
ZStart(START, 50);

//          X=-100L;

    clrscr();

/* search of end of workpiece by cutter1 */
ZForward(2000L, 16);
XForward(3324L, 16);
YForward(50000L, 16);

/* large diameter turning */
x1=X; y1=Y; z1=Z;
XBack((x1-2100L), 16);
XForward0(250L, 16);
/* first diameter */

for(i=0; i<12; i++)
{
    printf("\ni=%ld", i);
    XForwardRot0(50L*(VMAX), VMAX, VMAX);
    YForwardRot0(2000L*VY, VY, VMAX);
    SpindForward(350L, VMAX);
    XBack(200L, VMAX);
    YBack(2200L, VMAX);
    YForwardRot0(200L*(VMAX), VMAX, VMAX);
    XForwardRot0(200L*(VMAX), VMAX, VMAX);
}
x1=X;
y1=Y;
z1=Z;

/* slot */

YBack(2000, 16);
XBack(x1-1000, 16);
ZForward0(6600-z1, 16);

```

```

XForward0(3500,16);
YForward(8000,16);
XBack(800,16);

for(j=0;j<10;j++)
{
    printf("\nj=%ld",j);
    YForward0(15,16);
    XForward0(1700,16);
    YBack(200,16);
    XBack(1700,16);
    YForward0(200,16);
}
x2=X;y2=Y;z2=Z;
    YBack(2000,16);
    XBack(x2-1000,16);
    ZBack(z2-1500,16);
x2=X;y2=Y;z2=Z;

/*second diameter */

    ZForward0(z1-z2,16);
    YForward0(y1-y2,16);
    XForward0(x1-x2,16);
    YForward0(500,16);

for(k=0;k<8;k++)
{
    printf("\nk=%ld",k);
    XForwardRot0(30L*(VMAX),VMAX,VMAX);
    YForwardRot0(1400L*VY,VY,VMAX);
    SpindForward(350L,VMAX);
    XBack(600L,VMAX);
    YBack(1600L,VMAX);
    YForwardRot0(200L*(VMAX),VMAX,VMAX);
    XForwardRot0(600L*(VMAX),VMAX,VMAX);
}
x1=X;
y1=Y;
z1=Z;
XBack(x1-2000,16);
ZForward0(4060-z1,16);
YForward0(600,16);
XForward0(1100,16);
YForward(8000,16);
YBack(300,16);
XForward0(250,16);
x2=X;y2=Y;z2=Z;

for(i=0;i<6;i++)
{
    printf("\ni=%ld",i);
    XForwardRot0(15L*(VMAX),VMAX,VMAX);

```

```

    YForwardRot0(300L*VY, VY, VMAX);
    SpindForward(350L, VMAX);
    XBack(600L, VMAX);
    YBack(300L, VMAX);
    XForwardRot0(600L*(VMAX), VMAX, VMAX);
}

XBack(1000, 16);
x1=X;
YBack(800, 16);
YForward0(300, 16);
XForward0(x2-x1, 16);
    q1=Q;

for(j=0; j<4; j++)
{
    printf("\nj=%ld", j);
    XForward0(15L, VMAX);
    YForwardRot0(750L*16L, 16, 16);
    XBack(600L, VMAX);
    YBack(950L, VMAX);
    YForward0(200, 16);
    q2=Q;
    SpindBack(q2-q1, 16);
    XForward0(600L, VMAX);
}

    YForwardRot0(750L*16L, 16, 16);
    XForwardRot0(100L*250, 250, 16);

XBack(1000, 16);

YBack(YB, VMAX);
YBack0(75L, 16);
YStart(START, VMAX);

XBack(XB, VMAX);
XBack0(75L, 16);
XStart(START, VMAX);

ZBack(ZB, VMAX);
ZBack0(75L, 16);
ZStart(START, VMAX);

    return(0);
}

/* Similar to XForward with Spindle rotation. StepNum number of
minimal
time steps given by timer */

int XForwardRot(long StepNum, unsigned char SpeedX, unsigned char
SpeedRot)
{

```

```

long i,j,k,m,n;
unsigned char sensors,RGR;

m=StepNum-SpeedX;
n=StepNum-SpeedRot;
RGR=rgrX[aX];
RGR=RGR<<4;
outportb(D,RGR);
RGR=rgrSpind[aSpind];
outportb(A,RGR);
delay(200);
for(i=StepNum;i>0;i--)
{
    timer();
    if(i<m)
    {
        m=m-SpeedX;
        aX=aX+1;
        if(aX>3) aX=0;
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D,RGR);
        X++;
    }
    if(i<n)
    {
        n=n-SpeedRot;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3) aSpind=0;
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outportb(A,RGR);
        Q++;
    }
    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x10;
    if(sensors==0x10)
        goto mXFR;
}
mXFR: delay(200);
    outportb(A,0);
    outportb(D,0);
    return(i);
}
/* Similar to YForward with Spindle rotation. StepNum number of
minimal
time steps given by timer */

int YForwardRot(long StepNum,unsigned char SpeedY,unsigned char
SpeedRot)
{
    long i,j,k,m,n;
    unsigned char sensors,RGR, joint;

    m=StepNum-SpeedY;

```

```

n=StepNum-SpeedRot;
RGR=rgrY[aY];
RGR=RGR<<4;
joint=RGR|rgrSpind[aSpind];
outportb(A, joint);
delay(200);
for(i=StepNum; i>0; i--)
{
    timer();
    if(i<m)
    {
        m=m-SpeedY;
        aY=aY+1;
        if(aY>3) aY=0;
        RGR=rgrY[aY];
        RGR=RGR<<4;
        joint=(joint&0xf)|RGR;
        outportb(A, joint);
        Y++;
    }
    if(i<n)
    {
        n=n-SpeedRot;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3) aSpind=0;
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        joint=(joint&0xf0)|RGR;
        outportb(A, joint);
        Q++;
    }
    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x10;
    if(sensors==0x10)
        goto mYFR;
}
mYFR: delay(200);
    outportb(A, 0);
    outportb(D, 0);
    return(i);
}
/* Similar to ZForward with Spindle rotation. StepNum number of
minimal
time steps given by timer */

```

```

int ZForwardRot(long StepNum, unsigned char SpeedZ, unsigned char
SpeedRot)
{
    long i, j, k, m, n;
    unsigned char sensors, RGR;

    m=StepNum-SpeedZ;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrZ[aZ];
    outportb(D, RGR);
}

```

```

RGR=rgrSpind[aSpind];
outportb(A,RGR);
delay(200);
for(i=StepNum;i>0;i--)
{
    timer();
    if(i<m)
    {
        m=m-SpeedZ;
        aZ=aZ+1;
        if(aZ>3) aZ=0;
        RGR=rgrZ[aZ];
        outportb(D,RGR);
        Z++;
    }
    if(i<n)
    {
        n=n-SpeedRot;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3) aSpind=0;
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outportb(A,RGR);
        Q++;
    }
    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x10;
    if(sensors==0x10)
        goto mZFR;
}
mZFR: delay(200);
    outportb(A,0);
    outportb(D,0);
    return(i);
}
/* Similar to XForwardRot, but without cutter contact test */

int XForwardRot0(long StepNum,unsigned char SpeedX,unsigned char
SpeedRot)
{
    long i,j,k,m,n;
    unsigned char sensors,RGR;

    m=StepNum-SpeedX;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrX[aX];
    RGR=RGR<<4;
    outportb(D,RGR);
    RGR=rgrSpind[aSpind];
    outportb(A,RGR);
    delay(200);
    for(i=StepNum;i>0;i--)
    {
        timer();
        if(i<m)

```



```

    {
        m=m-SpeedX;
        aX=aX+1;
        if (aX>3) aX=0;
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D, RGR);
        X++;
    }
    if(i<n)
    {
        n=n-SpeedRot;
        aSpind=aSpind+1;
        if (aSpind>3) aSpind=0;
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outportb(A, RGR);
        Q++;
    }
}
mXFR: delay(200);
    outportb(A, 0);
    outportb(D, 0);
    return(i);
}
/* Similar to YForwardRot, but without cutter contact test */

int YForwardRot0(long StepNum,unsigned char SpeedY,unsigned char
SpeedRot)
{
    long i,j,k,m,n;
    unsigned char sensors,RGR,joint;

    m=StepNum-SpeedY;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrY[aY];
    RGR=RGR<<4;
    joint=RGR|rgrSpind[aSpind];
    outportb(A, joint);
    delay(200);
    for(i=StepNum;i>0;i--)
    {
        timer();
        if(i<m)
        {
            m=m-SpeedY;
            aY=aY+1;
            if (aY>3) aY=0;
            RGR=rgrY[aY];
            RGR=RGR<<4;
            joint=(joint&0xf)|RGR;
            outportb(A, joint);
            Y++;
        }
    }
    if(i<n)

```

```

    {
        n=n-SpeedRot;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3) aSpind=0;
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        joint=(joint&0xf0)|RGR;
        outportb(A, joint);
        Q++;
    }
}
mYFR: delay(200);
    outportb(A, 0);
    outportb(D, 0);
    return(i);
}
/* Similar to ZForwardRot, but without cutter contact test */

int ZForwardRot0(long StepNum, unsigned char SpeedZ, unsigned char
SpeedRot)
{
    long i, j, k, m, n;
    unsigned char sensors, RGR;

    m=StepNum-SpeedZ;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrZ[aZ];
    outportb(D, RGR);
    RGR=rgrSpind[aSpind];
    outportb(A, RGR);
    delay(200);
    for(i=StepNum; i>0; i--)
    {
        timer();
        if(i<m)
        {
            m=m-SpeedZ;
            aZ=aZ+1;
            if(aZ>3) aZ=0;
            RGR=rgrZ[aZ];
            outportb(D, RGR);
            Z++;
        }
        if(i<n)
        {
            n=n-SpeedRot;
            aSpind=aSpind+1;
            if(aSpind>3) aSpind=0;
            RGR=rgrSpind[aSpind];
            outportb(A, RGR);
            Q++;
        }
    }
}
mZFR: delay(200);
    outportb(A, 0);

```

```

        outportb(D,0);
        return(i);
    }

/* Moves the carriage X on the dX steps and returns 0,
   if cutter has contact with workpiece, stops the movement and
returns
   the number of steps, which were not made to reach dX */
int XForward(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dX;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x10;
        if(sensors==0x10)
            goto mXF;
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D,RGR);
        X++;
        aX=aX+1;
        if(aX>3)
            aX=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mXF: delay(200);
    outportb(D,0);
    return(i);
}

/* Moves the carriage Y on the dY steps and returns 0,
   if cutter has contact with workpiece, stops the movement and
returns
   the number of steps, which were not made to reach dY */
int YForward(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dY;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x10;
        if(sensors==0x10)
            goto mYF;
        RGR=rgrY[aY];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(A,RGR);
    }
}

```

```

    Y++;
    aY=aY+1;
    if(aY>3)
        aY=0;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mYF: delay(200);
outportb(A,0);
return(i);
}

/* Moves the carriage Z on the dZ steps and returns 0,
   if cutter has contact with workpiece, stops the movement and
returns
   the number of steps, which were not made to reach dZ */

int ZForward(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dZ;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x10;
        if(sensors==0x10)
            goto mZF;
        RGR=rgrZ[aZ];
        outportb(D,RGR);
        Z++;
        aZ=aZ+1;
        if(aZ>3)
            aZ=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mZF: delay(200);
    outportb(D,0);
    return(i);
}

/* Moves the carriage X on the dX steps and returns 0,don-t test
sensors */

int XForward0(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dX;i>0;i--)
    {

```

```

    RGR=rgrX[aX];
    RGR=RGR<<4;
    outputb(D,RGR);
    X++;
    aX=aX+1;
    if(aX>3)
        aX=0;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mXF: delay(200);
outputb(D,0);
return(i);
}
/* Moves the carriage Y on the dY steps and returns 0, don't test
sensors */

int YForward0(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dY;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrY[aY];
        RGR=RGR<<4;
        outputb(A,RGR);
        Y++;
        aY=aY+1;
        if(aY>3)
            aY=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mYF: delay(200);
    outputb(A,0);
    return(i);
}

/* Moves the carriage Z on the dZ steps and returns 0, don't test
sensors */

int ZForward0(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dZ;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrZ[aZ];
        outputb(D,RGR);
        Z++;
        aZ=aZ+1;
    }
}

```

```

    if(aZ>3)
        aZ=0;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mZF: delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}

/* Rotates Spindle forward on dSpind steps, returns 0 */
int SpindForward(long dSpind,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char RGR;

    for(i=dSpind;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outportb(A,RGR);
        Q++;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3)
            aSpind=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    delay(200);
    outportb(A,0);
    return(i);
}
/* Moves the carriage X back on the dX steps and returns 0,
   if carriage is moved to home position, stops the movement and
   returns
   the number of steps, which were not made to reach dX */
int XBack(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dX;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x40;
        if(sensors==0x40)
            goto mXB;
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D,RGR);

```

```

    X--;
    aX=aX-1;
    if(aX<0)
        aX=3;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mXB: delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}
/* Moves the carriage Y back on the dY steps and returns 0,
   if carriage is moved to home position, stops the movement and
returns
   the number of steps, which were not made to reach dY */
int YBack(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dY;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x80;
        if(sensors!=0x80)
            goto mYB;
        RGR=rgrY[aY];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(A,RGR);
        Y--;
        aY=aY-1;
        if(aY<0)
            aY=3;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mYB: delay(200);
    outportb(A,0);
    return(i);
}
/* Moves the carriage Z back on the dZ steps and returns 0,
   if carriage is moved to home position, stops the movement and
returns
   the number of steps, which were not made to reach dZ */
int ZBack(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dZ;i>0;i--)
    {

```

```

    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x20;
    if(sensors==0x20)
        goto mZB;
    RGR=rgrZ[aZ];
    outportb(D,RGR);
    Z--;
    aZ=aZ-1;
    if(aZ<0)
        aZ=3;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mZB: delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}

/* Moves the carriage X back on the dX steps and returns 0, don't
test
sensors */

int XBack0(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dX;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D,RGR);
        X--;
        aX=aX-1;
        if(aX<0)
            aX=3;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mXB: delay(200);
    outportb(D,0);
    return(i);
}

/* Moves the carriage Y back on the dY steps and returns 0, don't
tests
sensors */

int YBack0(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

```



```

for(i=dY;i>0;i--)
{
    RGR=rgrY[aY];
    RGR=RGR<<4;
    outportb(A,RGR);
    Y--;
    aY=aY-1;
    if(aY<0)
        aY=3;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mYB: delay(200);
outportb(A,0);
return(i);

}
/* Moves the carriage Z back on the dZ steps and returns 0, don't
tests
sensors */

int ZBack0(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dZ;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrZ[aZ];
        outportb(D,RGR);
        Z--;
        aZ=aZ-1;
        if(aZ<0)
            aZ=3;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mZB: delay(200);
    outportb(D,0);
    return(i);
}

/* Rotates Spindle back on dSpind steps, returns 0 */

int SpindBack(long dSpind,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char RGR;

    for(i=dSpind;i>0;i--)
    {
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outportb(A,RGR);

```

```

    Q--;
    aSpind=aSpind-1;
    if(aSpind<0)
        aSpind=3;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
delay(200);
outportb(A,0);
return(i);
}
/* Moves carriage X forward to the initial position X=0 */
int XStart(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dX;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x40;
        if(sensors!=0x40)
            goto mXS;
        RGR=rgrX[aX];
        RGR=RGR<<4;
        outportb(D,RGR);
        aX=aX+1;
        if(aX>3)
            aX=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mXS: delay(200);
    outportb(D,0);
    X=0;
    return(i);
}
/* Moves carriage Y forward to the initial position Y=0 */
int YStart(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dY;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x80;
        if(sensors==0x80)
            goto mYS;
        RGR=rgrY[aY];

```

```

    RGR=RGR<<4;
    outportb(A,RGR);
    aY=aY+1;
    if(aY>3)
        aY=0;
    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mYS: delay(200);
outportb(A,0);
Y=0;
return(i);

}
/* Moves carriage Z forward to the initial position X=0 */
int ZStart(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

    for(i=dZ;i>0;i--)
    {
        sensors=inportb(B);
        sensors=sensors&0x20;
        if(sensors!=0x20)
            goto mZS;
        RGR=rgrZ[aZ];
        outportb(D,RGR);
        aZ=aZ+1;
        if(aZ>3)
            aZ=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    mZS: delay(200);
    outportb(D,0);
    Z=0;
    return(i);
}

int timer(void)        // Lukovich
{
    unsigned char xb;
    int T1;
    int ix1,ix2,ix3;
    unsigned char xbyte;

    xbyte=inportb(0x61);
    xb=xbyte|0x03;
    outportb(0x61,xb);
    T1=10000;

```

ESTA TESIS NO DEBE  
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

```

aaa:  set_channel2_0(T1);
      ix1=get_from_channel2();
      ix2=ix1-N; // 1193 - for msec
      ix3=ix1;
      while(ix3>ix2) ix3=get_from_channel2();
      set_channel2_0(T1);
      outportb(0x61,xbyte);
      return 0;
}

```

/\*Sub-rutina para detectar la parte baja  
de la pieza para determinar di metro inicial\*/

```

int ZPB(long dZ,unsigned char Speed)
{
  long i,j;
  unsigned char sensors,RGR;

  for(i=dZ;i>0;i--)
  {
    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x10;
    if(sensors==0x10)
      goto mZB;
    RGR=rgrZ[aZ];
    outportb(D,RGR);
    Z--;
    aZ=aZ-1;
    if(aZ<0)
      aZ=3;
    for(j=0;j<Speed;j++)
      timer();
  }
  mZB: delay(200);
  outportb(D,0);
  return(i);
}

```

/\*Sub-rutina para detectar parte alta  
de la pieza para determinar di metro inicial\*/

```

int ZPS(long dZ,unsigned char Speed)
{
  long i,j;
  unsigned char sensors,RGR;

  for(i=dZ;i>0;i--)
  {
    sensors=inportb(B);
    sensors=sensors&0x10;
    if(sensors!=0x10)
      goto mZS;
  }

```

```

RGR=rgrZ[aZ];
outportb(D,RGR);
Z++;
aZ=aZ+1;
if(aZ>3)
    aZ=0;
for(j=0;j<Speed;j++)
    timer();
}
mZS: delay(200);
outportb(D,0);
return(i);

}

//-----
----

void set_channel2_0(unsigned no)
{
asm mov al, 0xb0;
asm out 0x43,al;
asm mov ax,no;
asm out 0x42, al;
asm mov al,ah;
asm out 0x42, al;
return;
}
//-----
unsigned get_from_channel2(void)
{
unsigned x;

asm mov al,0x80;
asm out 0x43,al;
asm in al,0x42;

asm mov ah,al;
asm in al,0x42;
asm xchg ah,al;
asm mov x,ax;
return x;
}

```

## PLANOS

Aquí se presentan planos de algunos subensambles de la máquina

