

01180



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DESARROLLO DE MICROEQUIPO PARA
CÉLULAS DE MANUFACTURA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

(ÁREA MECÁNICA)

PRESENTA:

LEOPOLDO RUIZ HUERTA, M. EN I.

DIRIGIDA POR:
DR. ERNST KUSSUL
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA

CIUDAD UNIVERSITARIA

ABRIL, 2005

m343413



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Ernst Kussul y del Dr. Marcelo López Parra, y con las aportaciones del M. en I. Alberto Caballero Ruiz. Apoyado por la DGAPA, a través de sus proyectos IN-118799, IN-112102, IX-119504, CONACYT 33944-U y CONACYT-NSF 39395-U.

AGRADECIMIENTOS

... 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...

... en memoria de su apoyo y cariño.

... a mi hermana Margarita...

... por su cariño, apoyo, regaños, risas y ¡claro!, sus consultas gratis.

... a Aurora...

... por el amor brindado y por estar aquí.

... a mis amigo Alberto...

... por su amistad, apoyo, conocimientos, tiempo, asesoría, parrandas complicidad, etc, gracias hermano...

... a mi amigo Javier...

... por su amistad, parrandas, y complicidad... gracias Jovillas

... a mi Familia, Olga, Santiago, Jorge, Santiago, Mary, Malena...

... por su apoyo y amor...

... a mis niñas...

... quienes estuvieron conmigo en todo momento.

... al "Pos Doc" Ascanio...

... por motivarme a seguir adelante.

... a mis amigos Gianna, Dan, Mauricio, Arcelia, Mauricio, Claudia, Antonio, Arantxa, Alina, Adriana, Laura, las Pervers (Blanca Itzel, Leticia, Maribel y Rosario), Nora, y 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 дружелюбное отношение ко мне, во время помощь диссертационной работы.

...a la Dra. Tetiana Baidyk, Dra. Graciela Velasco, Sr. Mario Rodríguez, Eugenio Marin, Jorge Ortega, Guillermo Saavedra, Héctor Silva, y Daniela Rovira...

...por su invaluable participación y amistad...

Agradezco al Dr. Marcelo López Parra su asesoría y tiempo dedicado a este proyecto.

A mi comité doctoral por sus comentarios y aportaciones:

Dr. Marcelo López Parra.
Dr. Ernst Kussul.
Dr. Vicente Borja Ramírez.
Dr. Jesús Manuel Dorador González
Dr. Arturo Barba Pingarrón
Dr. Saúl Santillán Gutiérrez.
Dr. Ricardo Chicurel Uziel

Al CONACYT por su apoyo.

Y finalmente, y no por ello menos importante a la Universidad Nacional Autónoma de México

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

DESARROLLO DE MICROEQUIPO
PARA CÉLULAS DE
MANUFACTURA

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, Área Mecánica

Presenta: Leopoldo Ruiz Huerta, M. en I.

Dirige: Dr. Ernst Kussul

Codirige: Dr. Marcelo López Parra

Abril 2005

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
MEMs	4
Otras tecnologías	10
MICROMECAÁNICA EN MÉXICO	17
BENEFICIOS DE HACER MICROEQUIPO PARA CÉLULAS DE MANUFACTURA	21
CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE PRODUCTOS MICROMAQUINADOS	22
APLICACIONES DE ESCALA HUMANA	22
APLICACIONES PARA EL MICROMUNDO	22
APLICACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN DESARROLLO EN EL ÁMBITO MUNDIAL	23
MERCADO	24
PROPUESTA PARA EL DESARROLLO	26
MARCO TECNOLÓGICO	26
¿CÓMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?	26
MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES	27
DEFINICIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO	30
DEFINICIÓN DE UNA CÉLULA DE MANUFACTURA	31
MARCO TEÓRICO	31
ERRORES QUE DECRECEN CON EL TAMAÑO	32
Rigidez	32
a) Compresión (o extensión) de una barra	32
b) Barra sometida a flexión (Caso 1)	33

c) Barra sometida a flexión (Caso 2)	34
d) Torsión de una barra	35
Masa	37
Fuerza de inercia (movimiento lineal uniformemente acelerado)	38
Fuerza centrífuga	39
Fuerzas magnéticas	39
Fuerzas electrostáticas	40
Fuerzas neumáticas e hidráulicas	42
Condición 1	42
Condición 2	43
Fuerzas capilares	43
Fuerzas de corte	44
Deformaciones elásticas	46
Vibraciones	48
Expansiones térmicas	48
Errores excepcionales (que no decrecen con el tamaño)	51
Métodos de autocorrección para errores excepcionales	52
Método de palanca	53
Microcentros de maquinado basados en paralelogramos	54
OBJETIVO	54
METAS	54
DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCEDIMIENTOS	54
DESARROLLO DE UN CASO DE ESTUDIO	56
PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO	56
REQUERIMIENTOS	56
ESPECIFICACIONES	57
RECURSOS	57
Evaluación de la propuesta	58
Bases para el diseño	61
Consideraciones especiales	62
Desarrollo	62
Propuesta	62
Consideraciones de movimiento	64
Aplicación de las recomendaciones de diseño	72
Diseño	73
Descomposición modular	73

Elementos	75
Configuración	76
Tren motriz	77
Manufactura.....	77
Control.....	78
PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	81
Descripción del prototipo	81
Pruebas propuestas.....	82
Prueba teórica.....	82
Pruebas experimentales.....	86
Resultados.....	88
Caracterización.....	88
Evaluación de resultados.....	88
Ventajas y desventajas del sistema.....	91
Mecanismo.....	91
Sistema de evaluación.....	92
Costo.....	93
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	95
Conclusiones	95
Recomendaciones	96
Trabajo a futuro.....	97
REFERENCIAS	99
ANEXOS.....	105
Artículos en revistas con arbitraje de circulación internacional.....	105
enviados para su arbitraje.....	105
Publicados.....	105
Artículos en revistas con arbitraje de circulación nacional	106
Capítulos en libros especializados.....	106
Memorias en extenso arbitradas en congresos internacionales	107
Memorias en extenso arbitradas en congresos nacionales.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA 1.1 IMÁGENES DE MECANISMOS DESARROLLADOS EMPLEANDO TECNOLOGÍAS MICROELECTRÓNICAS.....	4
FIGURA 1.2 PROCESO DE FOTOLITOGRAFÍA[2].....	5
FIGURA 1.3. MICROMOTOR ELECTROSTÁTICO.....	6
FIGURA 1.4. MICROVÁLVULA.....	6
FIGURA 1.5. ARREGLO DE MICROACTUADORER EN CANTILEVER [U. DE BERKELEY CALIFORNIA].....	7
FIGURA 1.6. MICROACELERÓMETRO [CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY].....	7
FIGURA 1.7. PROCESO LIGA.....	8
FIGURA 1.8. MICROFRESADO REALIZADAZO CON UNA HERRAMIENTA DE 22 μ M DE DIÁMETRO, LA BARRA DE ESCALA ES DE 100 μ M –IZQUIERDA-; MÁQUINA CON RODAMIENTOS NEUMÁTICOS Y AJUSTE DE POSICIÓN LÁSER DONDE FUE REALIZADO EL MICROFRESADO –DERECHA-.....	10
FIGURA 1.9. ESQUEMA DE UNA MICROFÁBRICA O FÁBRICA SOBRE MESA.....	11
FIGURA 1.10. EJEMPLOS DE MICROEQUIPO.....	12
FIGURA 1.11. MICROTORNO JAPONÉS (IZQUIERDA), FIGURA 1.12. MICROCENTRO DE MAQUINADO UCRANIANO DE 100X100X130 MM. (DERECHA).....	13
FIGURA 1.13. (A)MICROMÁQUINA BASADA EN ESTRUCTURAS PARALELAS DE 50X50X50 MM[26]; (B) MICROFRESADORA DE 119X119X102MM; (C)MICROMANIPULADOR; (D) MICROMANIPULADOR DE DOS DEDOS (48 MM DE DIÁMETRO 65MM DE ALTURA) [10]; (E) MICROTORNO (DIMENSIONES DE LA BASE: 100X150 MM)[11].....	14
FIGURA 1.14. PRIMERA MICROFÁBRICA SOBRE MESA TOTALMENTE AUTOMATIZADA (ARRIBA). DISPOSITIVO MICROMECAÍNICO (RODAMIENTO) DESARROLLADO MEDIANTE UN PROCESO AUTOMÁTICO EN DICHA MICROFÁBRICA (ABAJO Y DERECHA) [13].....	15
FIGURA 1.15. MICROFÁBRICA DESARROLLADA POR LA EMPRESA OLYMPUS OPTICAL CO., LTD.[14].....	16
FIGURA 1.16. MICROTORNO CNC COMERCIAL. NANO CORPORATION.....	16
FIGURA 1.17. CENTRO DE MAQUINADO MINIATURIZADO (GEORGIA TECH INSTITUTE).....	17
FIGURA 1.18. BASTIDOR.....	18
FIGURA 1.19A. MOTOR DE PASOS Y TRANSMISIÓN PARA EJES TRANSLACIONALES.....	19
FIGURA 1.19B. GUÍAS Y CARROS.....	19
FIGURA 1.20. MOTOR DE PASOS Y TRANSMISIÓN PARA EJE ROTACIONAL (CUARTO EJE).....	19
FIGURA 1.21. SISTEMAS DE SUJECIÓN (PORTA PIEZAS Y PORTA HERRAMIENTAS).....	20

FIGURA 1.22 PROTOTIPO COMPLETO	21
TABLA 1.1 MUESTRA EL TAMAÑO DEL MERCADO DE PRODUCTOS QUE ACTUALMENTE EXISTEN Y QUE PUEDEN SER SUSTITUIDOS POR EQUIPO MICROMECAÁNICO	24
TABLA 1.2 MUESTRA EL POSIBLE MERCADO DE NUEVOS PRODUCTOS RESULTANTES DE LA APLICACIÓN DE MICROEQUIPO EN LA INDUSTRIA.	25
FIGURA 2.1. ESQUEMA DE DE MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES	29
FIGURA. 2.2. COMPRESIÓN O EXTENSIÓN DE UNA BARRA	33
FIGURA 2.3. BARRA SOMETIDA A FLEXIÓN (CASO 1)	34
FIGURA. 2.4. BARRA SOMETIDA A FLEXIÓN (CASO 2)	35
FIGURA 2.5. TORSIÓN DE UNA BARRA	36
FIGURA 2.6. FUERZA DE INERCIA	38
FIGURA 2.7. FUERZA CENTRÍFUGA	39
FIGURA 2.8. DIAGRAMA PARA ANÁLISIS DE FUERZAS EN TIEMPO CONSTANTE	42
FIGURA 2.9. ESQUEMA DE FUERZAS CAPILARES	44
FIGURA 2.10. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DE VIRUTA	45
FIGURA 2.11 FUERZAS QUE AFECTAN EL PROCESO DE CORTE.	46
FIGURA 2.12. ESQUEMA QUE EXPLICA EL ORIGEN DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA EN MÁQUINAS DE DIFERENTE TAMAÑO.	49
FIGURA 2.13. AUTO CORRECCIÓN DE TORNILLO SINFIN	52
FIGURA 2.14. MÉTODO DE PALANCA.	53
TABLA 2.1. OBJETIVOS Y SUS VALORES	59
TABLA 2.2 TABLA COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES SOLUCIONES DE GUÍAS	60
TABLA 2.3. PROCESO DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA GUÍAS.	60
FIGURA 3.1. MECANISMO DE PALANCA.	63
FIGURA 3.2. MECANISMO DE PARALELOGRAMO	64
FIGURA 3.3. CONFIGURACIÓN PROPUESTA PARA LOS EJES	64
FIGURA 3.4. ESQUEMA GENERAL DE MOVIMIENTOS	65
FIGURA 3.5. ESQUEMA DE APOYO PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE UN PUNTO EN EL PLANO XY	66
FIGURA 3.6. ESQUEMA PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE UN PUNTO EN EL PLANO YZ	70
FIGURA 3.7A. SISTEMA DE UNIÓN DE ELEMENTOS CON BALINES ABIERTO.	75
FIGURA 3.7B. SISTEMA DE UNIÓN DE ELEMENTOS CON BALINES CERRADO	75
FIGURA 3.8. REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO	76
FIGURA 3.9. ARREGLO Y COMPONENTES DEL TREN MOTRIZ	78
FIGURA 3.10. PROCESO DE MANUFACTURA	79
FIGURA 3.11 IMÁGENES DEL SISTEMA DE CONTROL	80
FIGURA 3.12 PANTALLA DE CONTROL	80
FIGURA 4.1. PROTOTIPO MANUFACTURADO	82
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE SOLUCIÓN DE CASQUETES CIRCULARES.	84

FIGURA 4.3. CURVAS OBTENIDAS CON EL PROGRAMA DE SOLUCIÓN DE CASQUETES CIRCULARES.	85
FIGURA 4.4. ARREGLO DEL SISTEMA DE EVALUACIÓN.	86
FIGURA 4.5. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.	87
FIGURA 4.6 VISTA DE UN BARRENO DE REFERENCIA EN ALUMINIO.	88
TABLA 4.1 RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO.	89
FIGURA 4.7. TRAYECTORIA FORMADA CON PUNTOS REALES DEL PROTOTIPO.	90
FIGURA 4.8. POSICIÓN DEL BARRENO EN EL PROTOTIPO.	91
FIGURA 4.9. EQUIPO PARA MICROMAQUINADO DE LA COMPAÑIA KERN.	94

INTRODUCCIÓN

Se presenta de manera resumida el contenido de este trabajo de tesis.

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

Para la generación de micromecánica existen, al momento de presentar este trabajo, una gran cantidad de técnicas, sin embargo todas ellas presentan sus propios inconvenientes y ventajas. Por tal motivo se investiga y propone una manera alternativa de hacer micromecánica, y se desarrolla un caso de estudio, que tiene como meta aportar conocimiento y experiencia en el campo de la micromecánica de bajo costo.

En el primer capítulo de este trabajo se tratan los antecedentes relacionados con el desarrollo de la micromecánica, incluyendo el estado del arte internacional y nacional al momento de presentarlo. Posteriormente, en un segundo capítulo se expone el marco tecnológico y teórico propuesto para el desarrollo de este tema de tesis. En este segundo capítulo se plantean también el objetivo y las metas. Siguiendo a esto, en el tercer capítulo, se desarrolla como caso de estudio para el desarrollo de microequipo para células de manufactura, un microcentro de maquinado de bajo costo. Durante el desarrollo se propone una lista de recomendaciones para el proceso de diseño de este tipo de equipo. Adicionalmente, en el cuarto

capítulo, se realizan pruebas relacionadas con la operación teórica y real de la micromáquina propuesta en este trabajo; también se discuten ventajas y desventajas del prototipo y de la técnica de medición empleada. Finalmente se presentan conclusiones, recomendaciones, y trabajo a futuro, el cual abre nuevas líneas de investigación relacionadas con la micromecánica.

De esta manera este trabajo hace aportaciones al campo de la micromecánica, estableciendo lineamientos cercanos a la frontera del conocimiento en el desarrollo de microequipo de bajo costo, que pueden aplicarse a células de producción, y establece actividades futuras ligadas con estos tópicos, a fin de incrementar de manera paulatina los conocimientos generados en México dentro de este campo del conocimiento.

CAPÍTULO
1**ANTECEDENTES**

En este capítulo se establece el estado del arte al momento de presentar este trabajo. También se plantean los fundamentos y principios de las técnicas convencionalmente usadas en el desarrollo de microequipa.

Durante la época de los 80's surgen varias propuestas para desarrollar sistemas productivos con la finalidad de generar dispositivos con dimensiones menores a un milímetro. Dichos microdispositivos debían estar conformados tanto por partes microelectrónicas, como por partes micromecánicas [1,2,3].

En el caso de las partes microelectrónicas no existían inconvenientes para generarlas, puesto que desde aquel tiempo ya se tenían avances significativos en el desarrollo de circuitos integrados. Por otro lado, el desarrollo de partes micromecánicas representaba un desafío importante para los investigadores de la época debido a que, en ese entonces, no existían tecnologías mecánicas para desarrollar piezas y mecanismos tan pequeños como los requeridos. Los desarrollos de componentes mecánicos de ese entonces se manufacturaban con máquinas herramienta de tamaño convencional (por ejemplo un torno podía tener dimensiones de hasta 800x400x400 mm), con tales dimensiones de equipo, su falta de preparación para absorber errores inherentes al nuevo tamaño de piezas deseadas; y la carencia de herramental proporcional a las nuevas especificaciones, era complicado obtener nuevos productos. Por lo antes expuesto, fue necesario desarrollar tecnologías capaces de producir piezas con dimensiones de milímetros o menores.

Ejemplos de tecnologías desarrolladas para la fabricación de mecanismos micromecánicos 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 [4]. Sin embargo, las tecnologías antes mencionadas se basan substancialmente en técnicas empleadas para la construcción de circuitos integrados. En la figura 1.1 se presentan algunas imágenes de elementos fabricados con estas tecnologías.

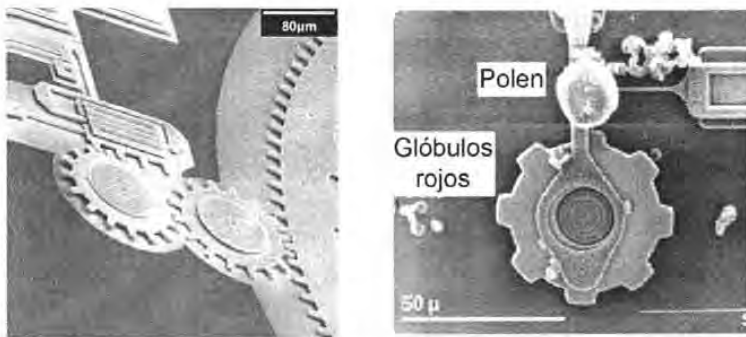


Figura 1.1 Imágenes de mecanismos desarrollados empleando tecnologías microelectrónicas.

MEMs

Como ya se ha mencionado, en la producción de dispositivos MicroElectroMecánicos (MEMs) se emplean tecnologías relacionadas con el área microelectrónica [2]. Una de estas tecnologías, que presenta un amplio rango de aplicación, está basada en procesos de fotolitografía como el mostrado en la figura 1.2. En la figura 1.2a es posible observar un sustrato plano cubierto por una película delgada de material, donde el objetivo es separar este material en diferentes regiones. En la figura 1.2b la película delgada es cubierta con un material fotosensible (llamado *fotoresist*) y alineada con una máscara que contiene patrones de las regiones que se desean generar. Una luz proyectada sobre la máscara brilla a través las zonas descubiertas de la misma, pero es bloqueada por las regiones con patrón. En la figura 1.2c se muestra el *fotoresist* afectado por la luz,

que es menos soluble a la sustancia reveladora que el de las áreas protegidas de la luz. En la figura 1.2d la película -delgada- que no está protegida por el *fotore sist* es eliminada mediante un ataque químico y, finalmente el *fotore sist* restante es eliminado mediante un proceso de lavado.

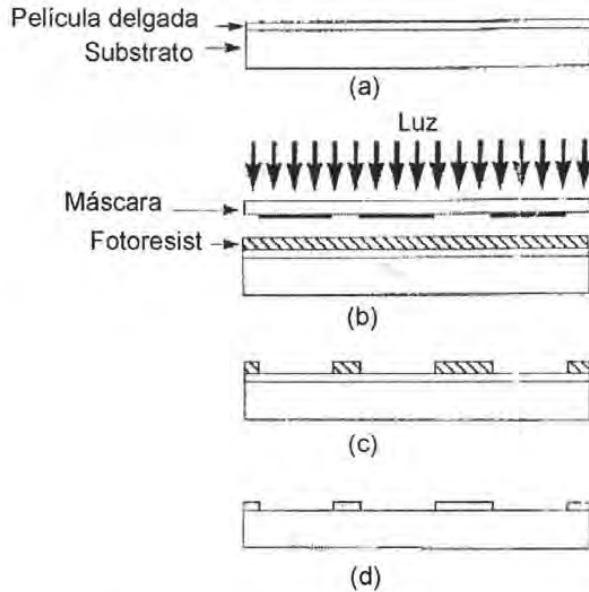


Figura 1.2 Proceso de fotolitografía[2]

Empleando los procesos descritos anteriormente se producen diferentes microdispositivos en superficies de silicio: micromotores, microacelerómetros, microsensores, microactuadores, microintercambiadores de calor, microválvulas para líquidos y gases, etc. En la figura 1.3 se muestra un micromotor electrostático desarrollado con tecnología de litografía. La figura 1.3a muestra el micromotor completo y la figura 1.3b muestra un acercamiento del rotor [Institute Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Alemania].

En la figura 1.4 se presenta la estructura de una microválvula para controlar flujo de líquidos o gases [45].

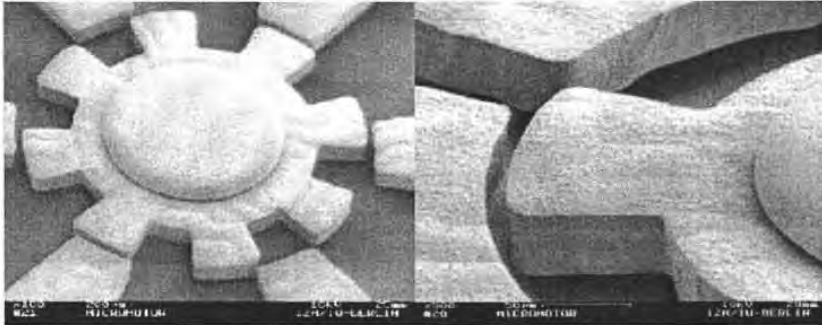


Figura 1.3. Micromotor electrostático

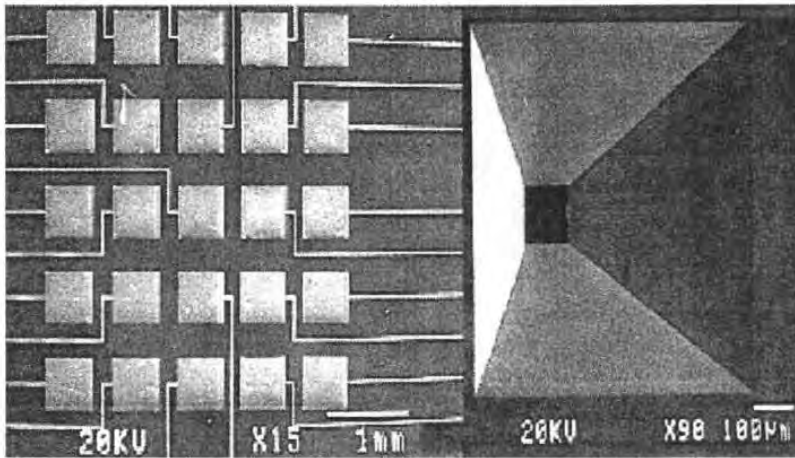


Figura 1.4. Microválvula.

En la Figura 1.5 se muestra un arreglo de microcantilevers que contienen una pista metálica entre dos capas de SiO_2 . Este dispositivo puede ser empleado como microactuador,

Los microacelerómetros son utilizados en varias aplicaciones dentro de la industria, en especial en la automotriz, donde estos dispositivos son empleados, entre otras cosas, para controlar la activación de sistemas de seguridad de los vehículos. Un esquema de microacelerómetro es mostrado en la figura 1.6 [California Institute of Technology].

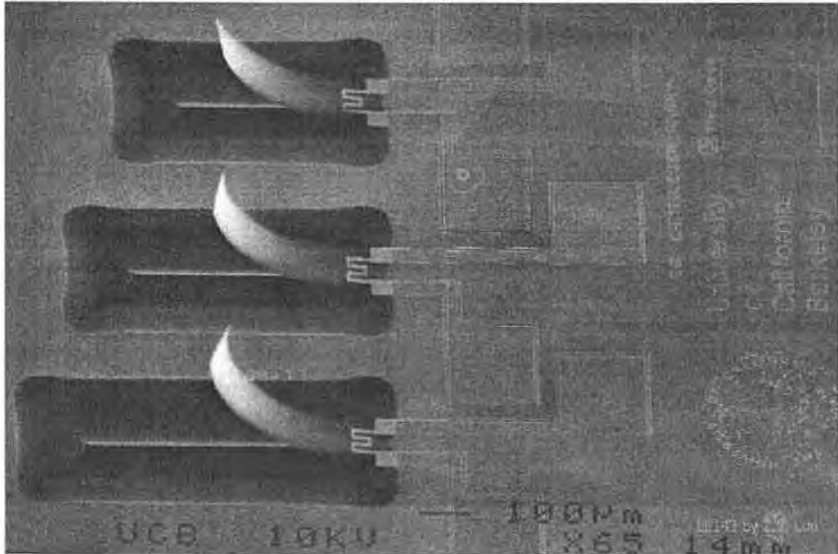


Figura 1.5. Arreglo de microactuador en cantilever [U. de Berkeley California]

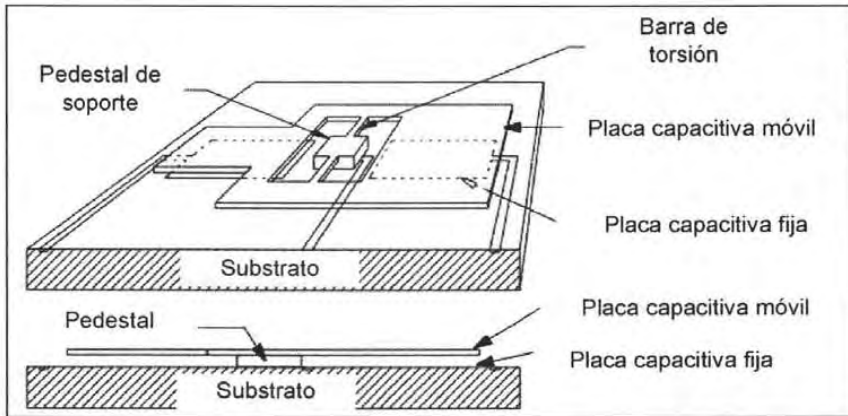


Figura 1.6. Microacelerómetro [California Institute of Technology]

Usando los procesos de microlitografía es posible preparar “dados” (moldes) para piezas micromecánicas en la superficie de obleas de silicio (proceso LIGA). Después, depositando material dentro de los dados, se forman micropiezas basadas en dichos moldes.

En la figura 1.7 se presenta un ejemplo del proceso LIGA. Usando un proceso de litografía con rayos X, se produce una estructura inicial de fotoresist (figura 1.7,a). Con esta estructura se hace un patrón metálico usando electrodeposición de Níquel en los espacios libres (figura 1.7b). Este patrón metálico se usa como molde y se le inyecta un polímero para formar un patrón secundario (figura 1.7c). El patrón secundario se emplea para producir el dispositivo metálico depositando Níquel sobre éste (figura 1.7d). El resultado de esta operación es el producto final. En este proceso, el dispositivo mostrado en la figura 1.7b se emplea en múltiples ocasiones como dado para producir un gran número de dispositivos. Específicamente, la ventaja de este proceso consiste en la posibilidad de producir dispositivos relativamente gruesos con paredes prácticamente verticales. La pendiente en las paredes del microdispositivo puede llegar a ser de 1/1000.

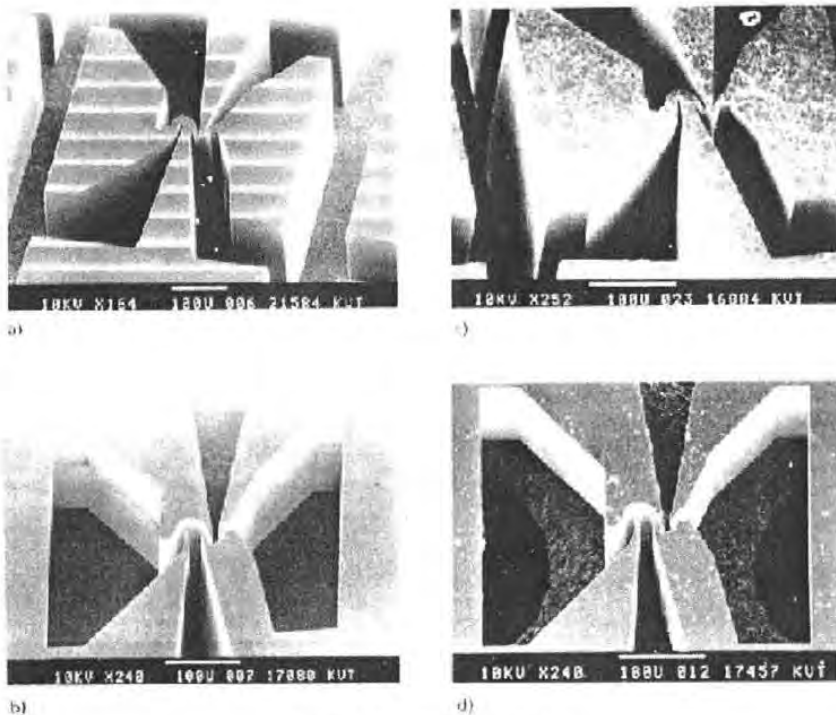


Figura 1.7. Proceso LIGA.

Las aplicaciones de dispositivos MEMS se pueden encontrar en áreas como la industria automotriz (acelerómetros), en la industria biotecnológica (biochips para detección de agentes biológicos), en la industria de computación (cabezas para impresoras de inyección de tinta), etc[5].

En general, las tecnologías para generar MEMS permiten producir microdispositivos bidimensionales. Estos procesos no permiten producir partes cónicas, tornillos, u otros componentes con formas tridimensionales complejas. La ausencia de partes cónicas dificulta mucho los procesos de microensamble, por ello, este tipo de microdispositivos se diseñan minimizando los ensambles en su desarrollo. Como consecuencia, no es posible utilizar diseños ya desarrollados en mecánica convencional para ser aplicados en MEMS. Para cada nuevo dispositivo es necesario desarrollar un nuevo diseño que evite ensambles. Además, frecuentemente es necesario desarrollar un proceso tecnológico específico para producir un nuevo microdispositivo, por lo que cada producto MEM requiere un estudio muy específico de su mercado potencial.

Otra desventaja de los MEMS consiste en que se requiere emplear materiales compatibles con las tecnologías de silicio. Estas tecnologías demandan procesos con altas temperaturas y no todos los materiales soportan dichas condiciones. La siguiente desventaja de los MEMS es el equipo microelectrónico superpreciso que se requiere, lo cual incrementa el costo de producción. Si se emplea este equipo para una producción masiva, el costo del equipo no es tan importante; pero si producimos microdispositivos en bajas cantidades, el costo del equipo microelectrónico repercute directamente en el precio comercial de los microdispositivos. Además, no todos los países cuentan con la tecnología microelectrónica necesaria para producir MEMS.

Por estas razones, los investigadores de muchos países buscan tecnologías alternativas para la producción de dispositivos micromecánicos. Estos métodos pueden ser catalogados dentro de dos grandes ramas: métodos *sin contacto*, también conocidos como métodos *sin uso de fuerza o energéticos* (procesos tales como *MicroEDM*, *MicroLaser Fabrication*, y *Focused Ion Beam*

Micromachining, etc. se incluyen en esta categoría); o bien métodos *con contacto*, también conocidos como *con uso de fuerza* que son procesos convencionales de manufactura por arranque de material. Dentro de estas dos grandes ramas es posible identificar que las primeras requieren de equipos tecnológicamente muy especializados para su producción, mientras que las segundas requieren de máquinas herramienta adaptadas para la producción de microdispositivos (herramientas especiales, soportes para absorber vibraciones, elementos mecánicos ex profesamente diseñados, etc.).

Otras tecnologías

Enfocándonos al uso de las tecnologías mecánicas convencionales para generar micromecanismos, cuando deseamos obtener las tolerancias requeridas en los dispositivos micromecánicos, se tienen dos alternativas: la primera consiste en emplear máquinas herramienta superprecisas [25], siendo ésta una buena opción para el desarrollo de investigaciones en laboratorio, pero no para desarrollar productos comerciales debido a que su costo es elevado. Un equipo de éste género y algunas de sus características son mostrados en las figura 1.8; La segunda alternativa consiste en disminuir el tamaño de las máquinas herramienta y manipuladores involucrados en el proceso de producción de microdispositivos. Con esta opción es posible lograr bajos costos en la producción de dispositivos comerciales.

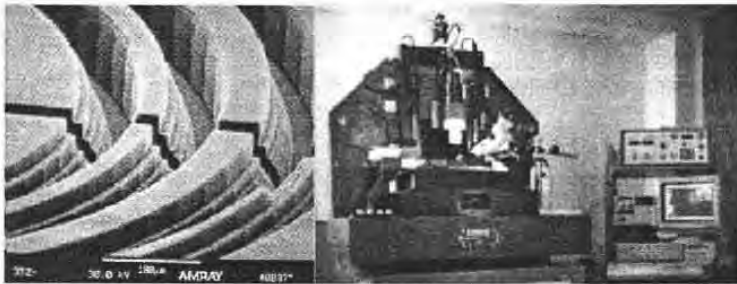


Figura 1.8. Microfresado realizado con una herramienta de $22\mu\text{m}$ de diámetro, la barra de escala es de $100\mu\text{m}$ -izquierda-; máquina con rodamientos neumáticos y ajuste de posición láser donde fue realizado el microfresado -derecha-.

De esta manera, en los años 90's se propone emplear sistemas micromecánicos basados en procesos de manufactura convencionales para generar micromecanismos mecánicos. Esta línea de investigación se comienza a desarrollar en Japón y Ucrania, posteriormente integrándose Alemania, Suiza y USA, siendo los principales objetivos: desarrollar herramientas de ayuda para la construcción de microdispositivos más complejos, como es el caso de manipuladores y robots de tamaño milimétrico donde las formas y movimientos de los mecanismos micromecánicos sean de tres dimensiones; se cuente con diseño para ensamble; y que los materiales para su fabricación sean diversos [4,6]

Bajo este contexto, la idea de microfábricas aparece de manera natural, las que por definición cuentan con unidades de proceso (conformadas por máquinas herramienta principalmente), ensamble, control de calidad, transporte, mantenimiento, entre otras. En la figura 1.9 se muestra la fotografía de una microfábrica. El desarrollo de microfábricas resulta un buen camino para la producción de pequeños dispositivos reduciendo el consumo de recursos, tales como energía, materiales y espacio de trabajo [7].



Figura 1.9. Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa.

Algunas de las aplicaciones de microdispositivos mecánicos, generados bajo esta tecnología se comentan a continuación.

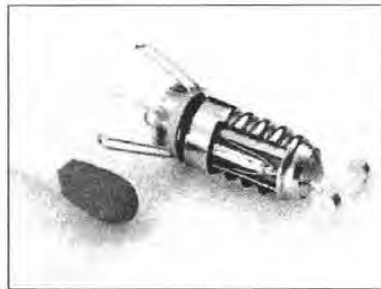
- En el campo de la medicina, la demanda de microequipos ha ido en aumento con aplicaciones en: Microscopia, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco invasivas, tratamientos, etc. La

reducción en el tamaño de los instrumentos permite inspeccionar órganos internos del cuerpo humano disminuyendo el riesgo de causar daños en el paciente.

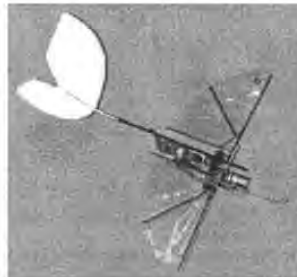
- ➔ En lo que respecta a inspección y mantenimiento de equipo industrial, los sistemas micromecánicos participan con un rol muy importante. En la actualidad existe interés en el desarrollo de pequeños robots de mantenimiento que inspeccionen y realicen reparaciones en lugares estrechos y/o inaccesibles. 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 1.10 se muestran: a) microrobot de inspección; b) micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy [7]; (c) microvehículo eléctrico de vuelo libre [12].



(a)



(b)



(c)

Figura 1.10. Ejemplos de microequipo.

- Otro campo importante que requiere de microequipo es la manufactura de pequeños productos industriales. En este caso, la energía consumida por este tipo de máquinas disminuye de forma considerable. Recientemente se emplean varias tecnologías para manufacturar componentes mecánicos de dimensiones pequeñas (decenas de micrómetros), como mecanismos y actuadores de baja escala. La integración de estos sistemas con fines de producción es llamada microfábrica o fábrica sobre mesa.

Siguiendo la línea de emplear mecánica convencional en la fabricación de microsistemas, en 1996 en el *Mechanical Engineering Laboratory* del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* en Japón, se desarrolló un microtorno con dimensiones de 30x30x30mm. [8], mostrado en la figura 1.11. Un año más tarde, en The International Research and Training Center of UNESCO/IIP of Information Technologies and Systems, National Academy of Sciences of Ukraine se desarrolló un prototipo de microcentro de maquinado cuya imagen es presentada en al figura 1.12 [9].

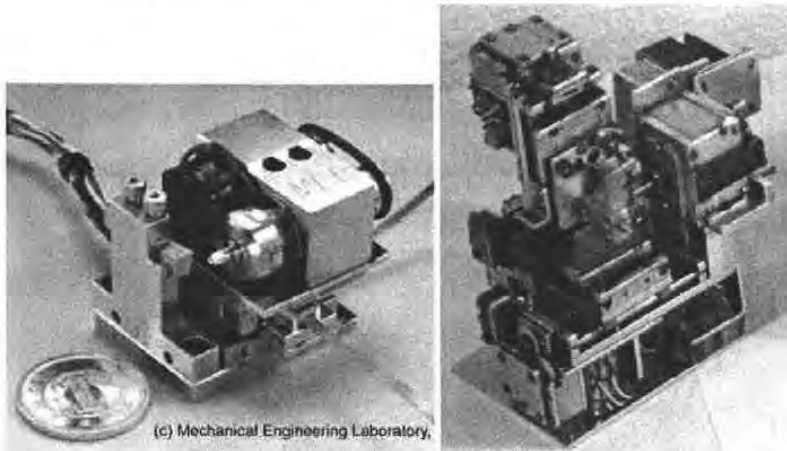


Figura 1.11. Microtorno Japonés (izquierda), Figura 1.12. Microcentro de maquinado Ucraniano de 100x100x130 mm. (derecha)

En los últimos años se han desarrollado, alrededor del mundo, varios prototipos de microequipo como: micromanipuladores, microfresadoras, microornos, etc. En la figuras 1.13 se presentan algunos ejemplos de éstos.

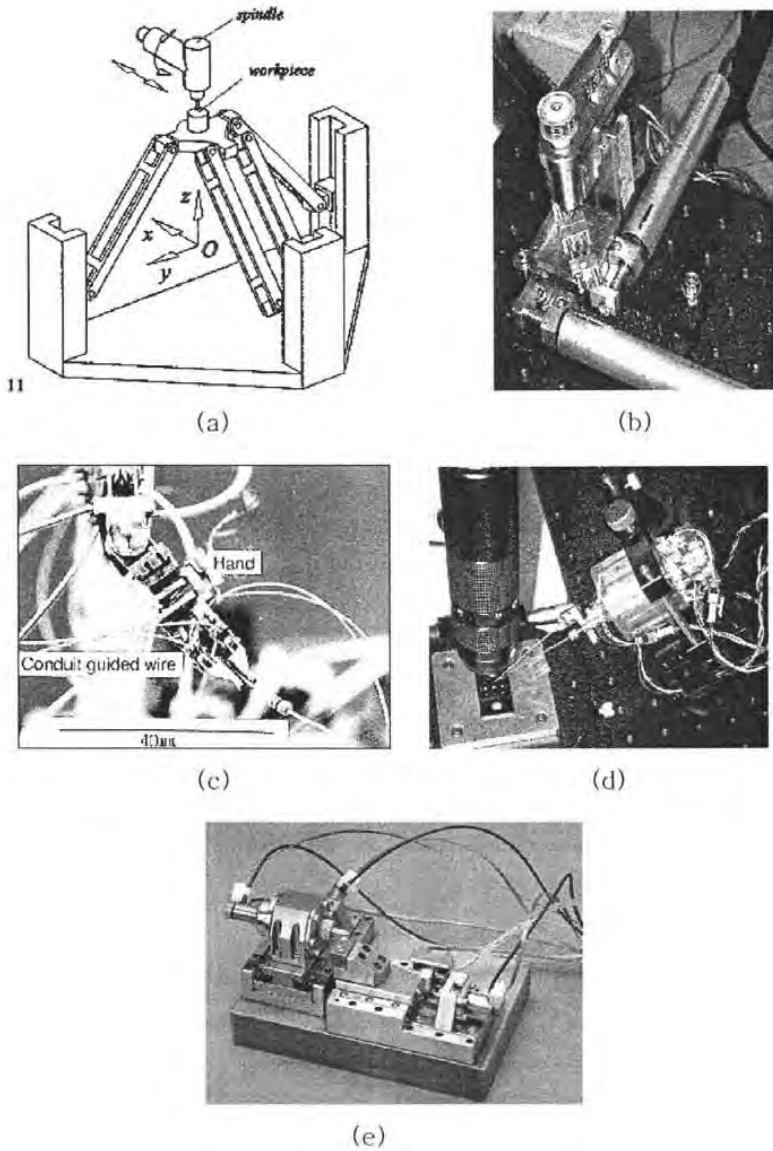


Figura 1.13. (a) Micromáquina basada en estructuras paralelas de 50x50x50 mm [26]; (b) Microfresadora de 119x119x102mm; (c) micromanipulador; (d) micromanipulador de dos dedos (48 mm de diámetro 65mm de altura) [10]; (e) microtorno (dimensiones de la base: 100x150 mm) [11].

La mayoría de estos desarrollos fueron creados como base para integrar microfábricas. En el año 2000, investigadores del *Mechanical Engineering Laboratory* del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* en Japón, presentaron, en el *2nd International Workshop on Microfactories* en Suiza, una microfábrica automatizada capaz de producir componentes de rodamientos miniatura. El ensamble de dicho rodamiento se desarrollaba dentro de la microfábrica en forma manual. Imágenes del rodamiento y la microfábrica son mostrados en la figura 1.14.

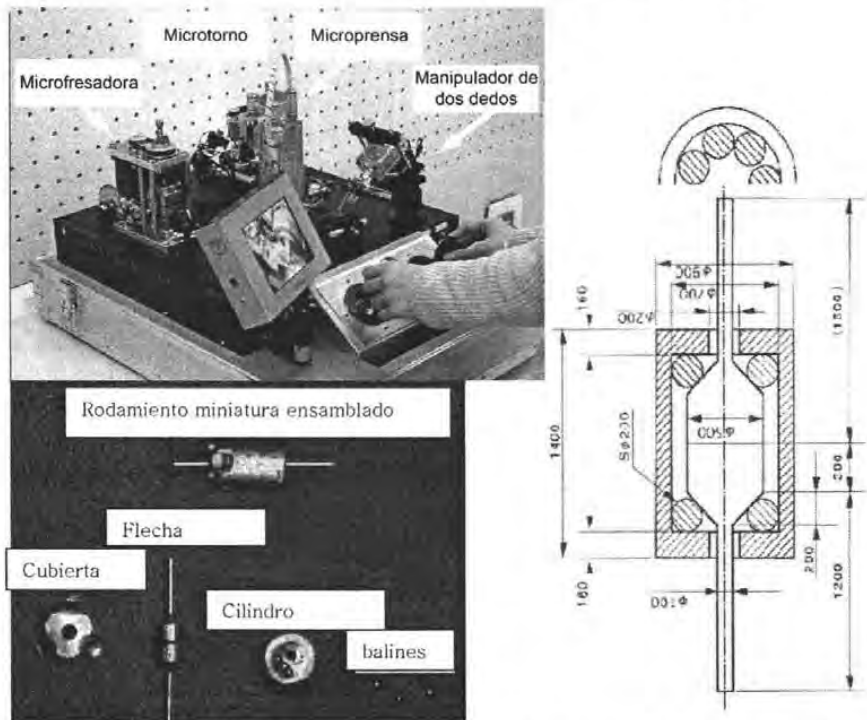


Figura 1.14. Primera microfábrica sobre mesa totalmente automatizada (arriba). Dispositivo micromecánico (rodamiento) desarrollado mediante un proceso automático en dicha microfábrica (abajo y derecha) [13].

Otro ejemplo de este tipo de equipos fue desarrollado por la empresa Olympus Optical Co., Ltd, donde se desarrolló un prototipo de microfábrica para resolver tareas de fabricación de productos con componentes microópticos, mostrada en la figura 1.15.

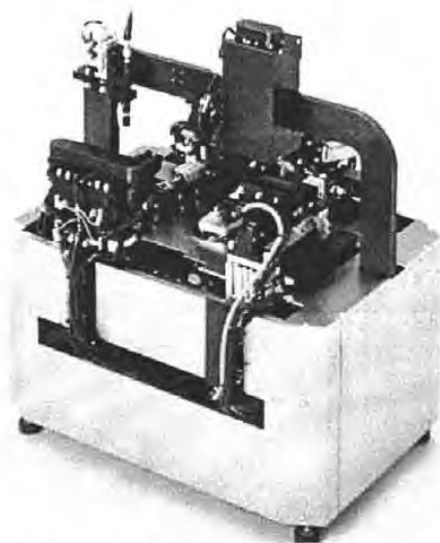


Figura 1.15. Microfábrica desarrollada por la empresa Olympus Optical Co., Ltd.[11]

Durante el Workshop on Microfactories, celebrado en Shanghai China en 2004, la compañía NanoWave (Nano Corporation), presentó un torno ultra compacto de CNC comercial. Dicho equipo cuenta con dimensiones de 100mm por 150mm en la base, una capacidad de 10mm de longitud para torneado y piezas con diámetro hasta de 5mm. Su eje rotacional opera a 10,000rpm y tiene una resolución de 200nm. Su costo es de \$35.000.00 usd. La figura 1.16 muestra dicho equipo [46].



Figura 1.16. Microtorno CNC comercial. Nano Corporation.

En el congreso 2004 de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME por sus siglas en inglés), fue presentado un centro de maquinado vertical con dimensiones de 350mm, 240mm y 320. Dicho equipo presenta una resolución de 4 a 10nm, y un volumen de trabajo definido por 25mm, 25mm, y 4mm en altura. El eje rotacional de este centro de maquinado gira a 60,000rpm. En la figura 1.17 se muestra una fotografía de dicho equipo [47].



Figura 1.17. Centro de maquinado miniaturizado (Georgia Tech Institute)

MICROMECAÁNICA EN MÉXICO

En México existe un grupo de investigadores que trabajan en éste campo del conocimiento. Dicho grupo es el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La principal línea de investigación de este laboratorio es: investigar y generar tecnología de punta para la fabricación de piezas con dimensiones inferiores al milímetro, para desarrollar tecnologías de producción totalmente automatizadas enfocadas al desarrollo de equipo e instrumentación de bajo costo y alta eficiencia.

Como parte del trabajo de tesis de maestría del autor [19], se desarrolló un prototipo manufacturado en su mayoría con herramientas de mano, o bien con máquinas herramienta convencionales. En el año 2000 dicho prototipo se presentó, en el

First International Conference on Mechatronics and Robotics en San Petersburgo (Rusia). El prototipo desarrollado fue el resultado más importante de ese trabajo.

Este equipo es el primer prototipo de micromáquina herramienta (microequipo), desarrollado en México. El costo en materiales fue de aproximadamente \$100usd, mientras que el tiempo efectivo de trabajo invertido por tres académicos fue de aproximadamente 1000 horas

Sus partes estructurales (bastidor), son en mayoría de placa de aluminio de 3.125 y 6.35mm ($\frac{1}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ " respectivamente), placa de latón de 3.125 y 6.35mm ($\frac{1}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ " respectivamente), realizando las uniones con tornillos de 2mm. El bastidor del microcentro de maquinado es mostrado en la figura 1.18.

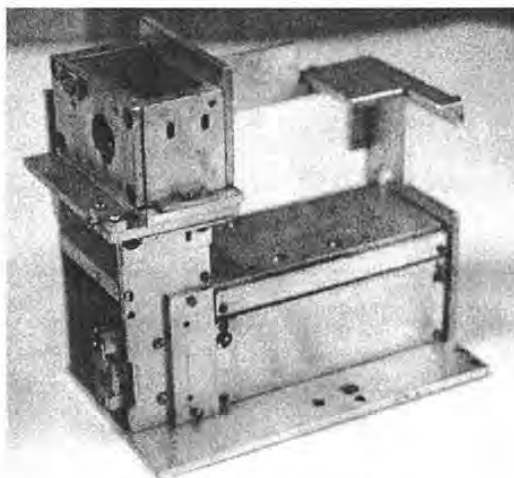


Figura 1.18. Bastidor.

Para los movimientos traslacionales (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 eléctrica de la máquina es con 12volts de corriente directa.

Los arreglos de ejes translacionales son mostrados en las figuras 1.19a y 1.19b.

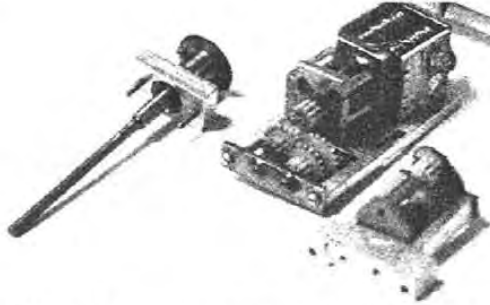


Figura 1.19a. Motor de pasos y transmisión para ejes translacionales.

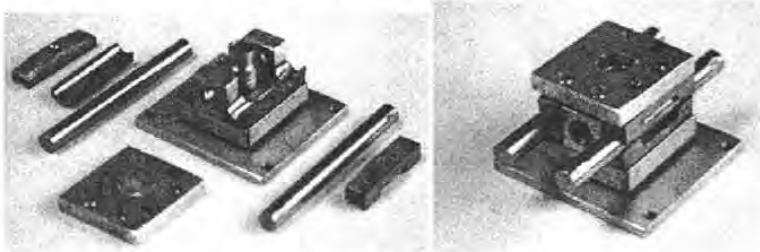


Figura 1.19b. Guías y carros.

El movimiento rotacional (cuarto eje), es conseguido con la ayuda de otro motor de pasos, que se encuentra acoplado a una reducción de 18 a 1. Este arreglo se muestra en la figura 1.20.

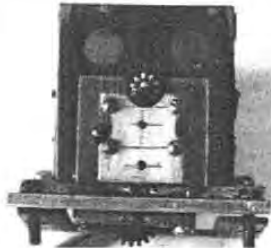


Figura 1.20. Motor de pasos y transmisión para eje rotacional (cuarto eje).

De esta manera se tienen 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 1.21. Ambos son fabricados en latón. El porta herramientas permite el acomodo de hasta cuatro herramientas o accesorios.



Figura 1.21. 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 ésta 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 tres 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 conductoras), mediante el cierre de un circuito eléctrico formado entre éstos 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 detectores. 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.

La descripción anterior corresponde a una micromáquina herramienta con configuración de microcentro de maquinado (figura 1.22), con dimensiones de 13×16×8.5cm, sin contar las etapas de potencia y la fuente de alimentación eléctrica.

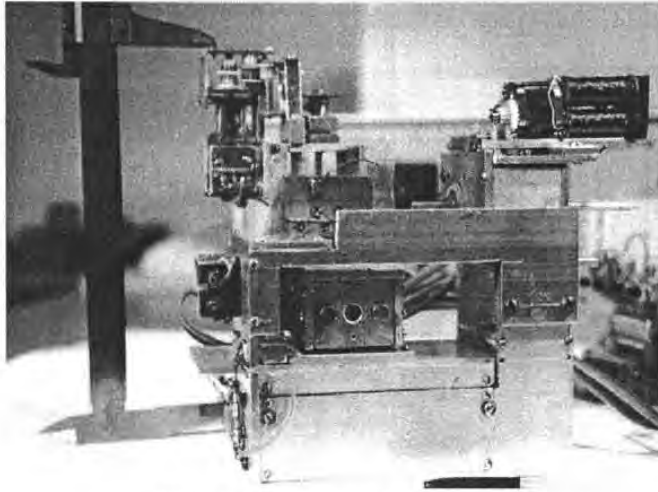


Figura 1.22 Prototipo completo.

BENEFICIOS DE HACER MICROEQUIPO PARA CÉLULAS DE MANUFACTURA

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. [4].

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. [16]

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 manufactura de una gran cantidad de dispositivos de manera simultánea, o bien de la diversificación por demanda de las producciones.

CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES DE PRODUCTOS MICROMAQUINADOS

En el LMM del CCADET, UNAM, se propuso una clasificación basada en la escala de los productos obtenidos con los centros de maquinado:

APLICACIONES DE ESCALA HUMANA

En este caso se utiliza el macroefecto (en proporción con el tamaño de los microcomponentes) que 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, estructuras, 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 (tecnologías MEMS). De esta manera, el microequipo generado con mecánica convencional incrementa el rango de aplicaciones *micro*.

Por su complejidad, potencial y aplicaciones inmediatas, se pueden 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 QUE SE ENCUENTRAN EN DESARROLLO EN EL ÁMBITO MUNDIAL

Dentro de las aplicaciones de micromecánica que requieren del desarrollo de microequipo, y en específico microcentros de maquinado se encuentran los siguientes ejemplos:

Microfiltros: Estos operan bajo el principio de una baja caída de presión, derivada de los cortos trayectos que tiene que recorrer un fluido en su proceso de filtrado. De esta manera es posible manufacturar y ensamblar una gran cantidad de elementos filtro, donde cada uno de éstos tiene definido un paso de partículas mediante ranuras realizadas en su base. Con esto es factible realizar procesos de filtrado de líquidos y gases de manera efectiva y controlada por el paso de las ranuras. [31].

Intercambiadores de calor compactos: Para el desarrollo de éstos, se plantea el uso de nuevas aleaciones, geometrías, y procesos de 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 diámetro pequeño [40].

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 [49].

Motores de pasos hidráulicos: El potencial de compactación de estos motores es mejor que el de los electromagnéticos, debido a que los componentes principales de estos motores son proporcionales al tamaño completo del motor, mientras que en los electromagnéticos es necesario desarrollar una importante cantidad

de elementos comparativamente menores que el tamaño total del motor. De manera adicional se conoce que los motores hidráulicos poseen un mayor par –aproximadamente dos órdenes de magnitud– comparados con electromagnéticos de iguales dimensiones [50].

Microfábricas: Actualmente se desarrollan y perfeccionan fábricas, o partes de ellas, que tienen las dimensiones necesarias para ser acomodadas sobre una mesa; dicha característica les ha otorgado el nombre de “fábricas sobre mesa” o “Microfábricas”. Dentro de los países que presentan un mayor avance en esta materia podemos identificar al grupo japonés del Dr. Okazaki. Las microfábricas ofrecen como principal ventaja, una escala proporcional al dispositivo que será producido en ella, un alto grado de automatización, y fuertes posibilidades de reconfiguración. [8]

MERCADO

En Japón se realizaron investigaciones sobre la estimación del mercado para microequipo. Dichas estimaciones se presentan en las tablas 1 y 2 [17]. Los valores están en millones de dólares anuales. Nuevas investigaciones relacionadas con el mercado potencial de la micromecánica continúan en proceso de desarrollo, siendo las principales interesadas las pequeñas empresas que buscan mercados alternativos [48]

Producto \ Año	2010	2015
Robots industriales	28	57
Maquinas herramienta	578	1174
Dispositivos para montaje LCD	1	1
Dispositivos para montaje esquemas integrados	320	353
Equipo de semiconductores	27	29
Total	954	1614

Tabla 1.1 Muestra el tamaño del mercado de productos que actualmente existen y que pueden ser sustituidos por equipo micromecánico.

Escenario	Año	2010	2015
Escenario pesimista		150	732
Escenario normal		357	1144
Escenario optimista		1688	1875

Tabla 1.2 Muestra el posible mercado de nuevos productos resultantes de la aplicación de microequipo en la industria.

De los datos presentados en este capítulo, se puede concluir que el desarrollo de microfábricas para la producción de dispositivos micromecánicos, es atractiva en la actualidad tanto para el sector académico de investigación, como también para el sector industrial.

CAPÍTULO

2

PROPUESTA PARA EL DESARROLLO

En este capítulo se describen el marco tecnológico y teórico planteado para el desarrollo de microequipo de bajo costo. También se definen el objetivo y metas de esta tesis.

MARCO TECNOLÓGICO

Teniendo como marco de referencia las tecnologías descritas en el primer capítulo de este trabajo, se describen los procedimientos propuestos para el desarrollo de microequipo de bajo costo.

¿CÓMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?

La propuesta para la manufactura de microdispositivos mecánicos de bajo costo se encuentra fundamentada 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, energía consumida, etc. 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 [4]:

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 apoyado en diseños simples pero funcionales, mediante la selección de técnicas de manufactura convencionales, y mediante el uso de una baja cantidad de materiales, tanto comunes como especializados.
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.

En este trabajo se considera que para desarrollar microequipo de bajo costo, se deben aplicar los puntos anteriores; siendo tema central en esta tesis el desarrollo de microequipo de bajo costo, mencionado en el apartado número 3, el cual sugiere que el bajo costo del microequipo se obtiene mediante: el empleo de máquinas herramienta convencionales para su manufactura; en medida de lo posible evitar el uso de elementos comerciales costosos; y planear procesos que no requieran de alta tecnología durante el desarrollo del equipo. También para fines de este trabajo se considera bajo costo, todo aquello cuyo costo de materiales y elementos que lo integren se encuentren por debajo de los empleados o reportados por entidades de investigación que desarrollen equipo semejante.

MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES

Es posible generar microequipo mediante una secuencia de generaciones; donde 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 nueva generación es manufacturada por las generaciones precedentes; y tiene dimensiones menores que las generaciones que la producen [4].

Se define como factor de compactación de generación (GDF), a la reducción que experimenta el 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, en la primera generación se consideran micromáquinas herramienta y micromanipuladores con tamaños entre los 100 y los 250mm. El microequipo contemplado en esta generación puede ser desarrollado con máquinas herramienta convencionales. La segunda generación se estima con micromáquinas herramienta y micromanipuladores con dimensiones entre los 50 y los 125mm, y puede ser hecha con el apoyo de equipos convencionales y microequipo de la primera generación.

Para producir una generación sucesiva con base en una generación previa, es necesario contar con los elementos suficientes de microequipo para realizar la producción de todos los componentes de la nueva generación. Por ejemplo, en la 5ª o 6ª generación de microequipo, los micromotores empleados estarán compuestos por estatores con dimensiones menores a 1 mm y bobinas con tamaños entre los 200 y 300 µm. Actualmente en el ámbito industrial no se producen componentes de este tamaño, por lo que es necesario desarrollar nuevos diseños y tecnologías de producción de motores de pasos que permitan su miniaturización hasta este tamaño o menor. Un esquema de la teoría de miniaturización por generaciones es mostrada en la figura 2.1.

Es conocido que las relaciones entre fuerzas y otros parámetros de los microdispositivos cambian con respecto a la disminución de

tamaños de los dispositivos mecánicos. Para crear la teoría de las generaciones de microequipo, es necesario realizar estudios de física y crear descripciones matemáticas del comportamiento de los microdispositivos.

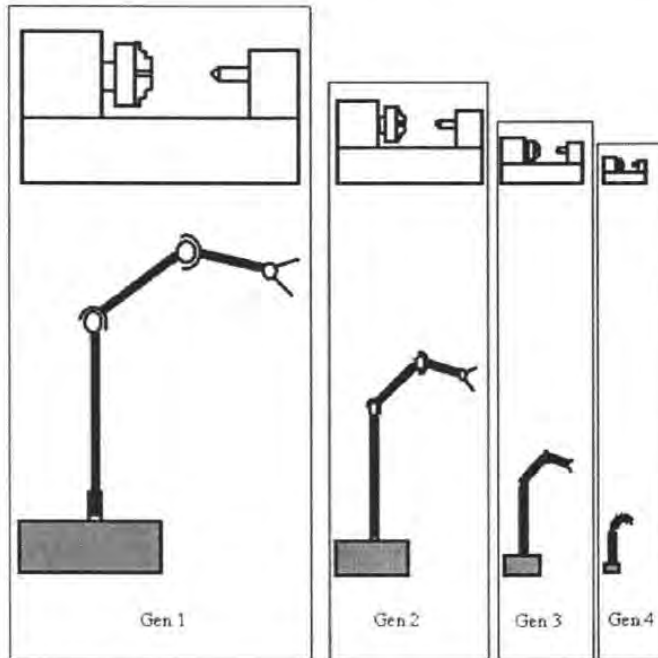


Figura 2.1. Esquema de de miniaturización por generaciones

Para desarrollar las generaciones de microequipo, y las microfábricas basadas en estas generaciones, es necesario estudiar los problemas de la automatización completa de microfábricas, e incluso, la automatización de alto nivel que demandan los métodos de inteligencia artificial y computación suave (*soft computing*).

Para predecir las propiedades de las generaciones de microequipo, es necesario investigar la correlación que existe entre la precisión y los tamaños de microequipo. Primeramente es posible establecer esta correlación sobre la base de un análisis teórico.

DEFINICIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO

Un centro de maquinado es una máquina herramienta que permite hacer un amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, maquinado de cuerdas, etc.), [42].

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 [42]:

- ⇒ *Control numérico [NC].*
- ⇒ *Carruseles con cambiadores automáticos de múltiples herramientas.*
- ⇒ *Ejes habilitados para trabajar en todos los lados de la pieza.*
- ⇒ *Cuando se encuentran en sistemas de manufactura flexible, se considera 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 [42].

Con lo mencionado anteriormente, en el LMM un **microcentro de maquinado** se define 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 productos tienen dimensiones globales inferiores a 15mm.**

DEFINICIÓN DE UNA CÉLULA DE MANUFACTURA

Una célula de manufactura es una máquina o conjunto de máquinas destinadas a realizar un determinado o determinados procesos dentro de una línea de producción. De esta manera es posible afirmar que una célula de manufactura debe contar con elementos o materiales de entrada y elementos o productos de salida. Durante diferentes procesos es posible identificar que los elementos de transporte juegan un papel muy importante en cada célula.

La configuración básica de una célula de manufactura es de una máquina realizando procesos de manufactura específicos para un determinado producto. Cuando hablamos de micromecánica en el LMM se afirma que es indispensable el uso de un manipulador, debido a los problemas que genera la visualización y el manejo de piezas pequeñas de manera manual.

MARCO TEÓRICO

Es conocido que las relaciones entre fuerzas y otros parámetros físicos cambian con respecto al tamaño de los dispositivos mecánicos. Para sustentar la teoría de múltiples generaciones de microequipo es necesario realizar estudios de fenómenos físicos y crear descripciones matemáticas del comportamiento de los microdispositivos, dichos estudios se encuentran fuera del alcance de este trabajo; también, para predecir las propiedades de las generaciones de microequipo, es necesario investigar la correlación que existe entre la precisión y los tamaños de microequipo.

Partiendo de lo anterior, se pueden identificar dos tipos de errores: los que decrecen con el tamaño del equipo; y los que no decrecen con respecto al tamaño. En este trabajo se mencionan algunos errores asociados al desarrollo de microequipo, únicamente como un marco teórico de referencia basado en casos conocidos de la mecánica clásica. Estos casos típicos requieren de un tratamiento y análisis más profundo y especializado de investigación -fuera de los objetivos de esta tesis- con el fin de definir los límites dimensionales y consideraciones especiales bajo los cuales son válidos.

ERRORES QUE DECRECEN CON EL TAMAÑO

Para este análisis se consideran dos dispositivos mecánicos (pueden ser microcentros de maquinado o microrobots), un dispositivo A y un dispositivo B . Los dos tienen el mismo diseño y están fabricados con los mismos materiales, pero el tamaño del dispositivo A y sus componentes es S veces más grande que el tamaño del dispositivo B y sus componentes. Por ejemplo, si el dispositivo B tiene una flecha de diámetro d_B , el dispositivo A tiene una flecha de diámetro d_A y se relacionan de la siguiente manera:

$$d_A = S \cdot d_B \quad (2.2)$$

Es de interés analizar las correlaciones entre los tamaños de los microdispositivos y sus parámetros mediante un caso general, por lo que en este apartado, se analizan estas correlaciones usando ejemplos comunes para dispositivos mecánicos.

Rigidez

La rigidez r está determinada por la relación que existe entre la fuerza F_z que afecta a un objeto y la deformación Δz de este objeto en dirección de la fuerza:

$$r = F_z / \Delta z \quad (2.3)$$

A continuación se presentan algunos ejemplos para estudiar este caso.

A) COMPRESIÓN (O EXTENSIÓN) DE UNA BARRA

Si una fuerza F_z comprime a una barra con sección q produce una deformación Δz (figura 2.2). En este caso se tiene:

$$\Delta z = (F_z \cdot L) / (q \cdot E), \quad (2.4)$$

donde E es módulo de elasticidad del material de la barra.

De las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene:

$$r = F_z / \Delta z = (q \cdot E) / L \quad (2.5)$$

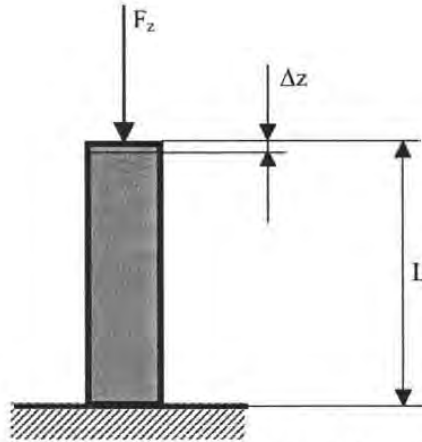


Figura. 2.2. Compresión o extensión de una barra

De acuerdo con la relación que existe entre los dispositivos *A* y *B*, se tiene:

$$L_A = S \cdot L_B, \quad (2.6)$$

$$q_A = S^2 \cdot q_B, \quad (2.7)$$

$$E_A = E_B, \quad (2.8)$$

Empleando las ecuaciones anteriores, se determina que la relación de rigidez entre el dispositivo *A* y *B* es:

$$r_A = \frac{q_A \cdot E_A}{L_A} = \frac{S^2 \cdot q_B \cdot E_B}{S \cdot L_B} = S \cdot r_B. \quad (2.9)$$

La ecuación (2.9) muestra que la rigidez de la barra *A* es *S* veces mayor que la rigidez de la barra *B*.

B) BARRA SOMETIDA A FLEXIÓN (CASO 1)

Una fuerza F_z afecta uno de los extremos de una barra de longitud *L*; el otro extremo de la barra está anclado, figura 2.3.

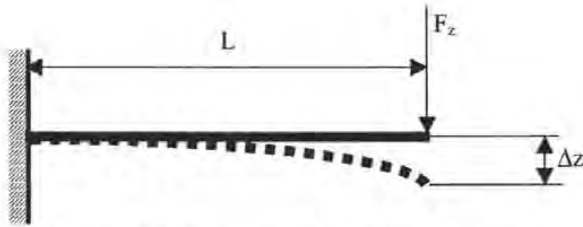


Figura 2.3. Barra sometida a flexión (caso 1)

La barra tiene una sección transversal constante con momento de inercia I . En este caso, la deflexión Δz al final de la barra está dada por:

$$\Delta z = \frac{F_z \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}, \quad (2.10)$$

y la rigidez r :

$$r = F_z / \Delta z = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3}. \quad (2.11)$$

Las relaciones de parámetros entre los dispositivos A y B son:

$$E_A = E_B,$$

$$L_A = S \cdot L_B, \quad (2.12)$$

$$I_A = S^4 \cdot I_B.$$

Sustituyendo (2.12) en (2.11) se obtiene:

$$r_A = \frac{3 \cdot E_A \cdot I_A}{L_A^3} = \frac{3 \cdot E_B \cdot S^4 \cdot I_B}{S^3 \cdot L_B^3} = S \cdot r_B. \quad (2.13)$$

De la ecuación (2.13) se concluye que disminuyendo S veces el tamaño, la rigidez se disminuye S veces también.

C) BARRA SOMETIDA A FLEXIÓN (CASO 2)

Una fuerza F_z afecta al centro de una barra de longitud L . Los dos extremos de la barra están fijos (Figura. 2.4.).

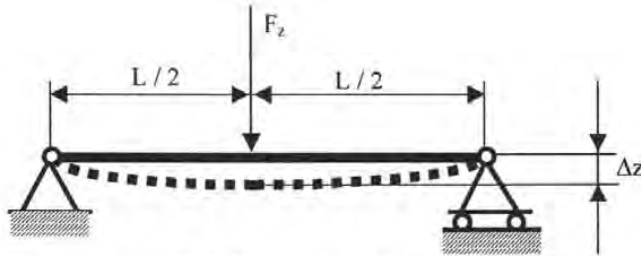


Figura. 2.4. Barra sometida a flexión (caso 2)

La sección de la barra tiene un momento de inercia I , para este caso la deflexión Δz está dada por:

$$\Delta z = \frac{F_z \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (2.14)$$

y la rigidez r :

$$r = F_z / \Delta z = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3}, \quad (2.15)$$

Sustituyendo (2.12) en (2.15) se obtiene:

$$r_A = \frac{48 \cdot E_A \cdot I_A}{L_A^3} = \frac{48 \cdot E_B \cdot S^4 \cdot I_B}{S^3 \cdot L_B^3} = S \cdot r_B \quad (2.16)$$

De la ecuación (2.16) se concluye que disminuyendo S veces el tamaño, se disminuye S veces la rigidez.

D) TORSIÓN DE UNA BARRA

Una barra con longitud L está anclada en un extremo (figura 2.5.). El otro extremo de esta barra está unido a otra barra con longitud L_1 en posición perpendicular. Las dos terminales de barra L_1 están afectadas por las fuerzas F_z que forman un par de fuerzas. Este par de fuerzas tuerce la barra L que tiene un momento de inercia polar I_p produciendo un desplazamiento Δz en las terminales de la barra L_1 . La barra L_1 se considera como un cuerpo rígido. El ángulo θ de torsión de la barra L se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{\varphi \cdot I_p} \quad (2.17)$$

donde T es el momento del par de fuerzas F_z , L es la longitud de la barra, φ es el módulo de desplazamiento e I_p es el momento de inercia polar.

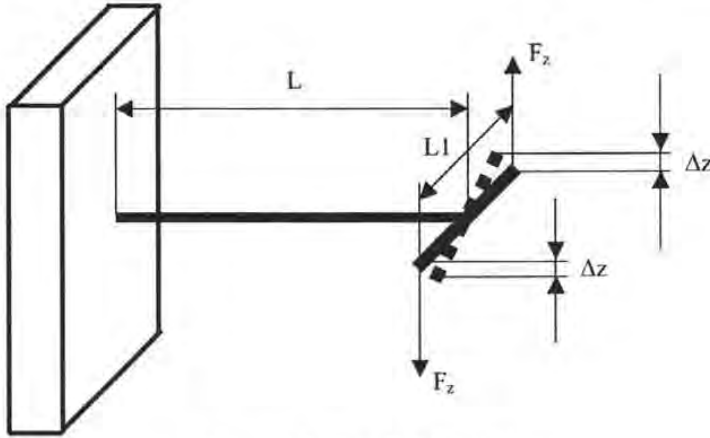


Figura 2.5. Torsión de una barra

El sistema está definido por las siguientes ecuaciones:

$$T = F_z \cdot L_1, \quad (2.18)$$

$$\Delta z = \theta \left(\frac{L_1}{2} \right) = \frac{F_z \cdot L_1 \cdot L}{\varphi \cdot I_p} \cdot \frac{L_1}{2} = \frac{F_z \cdot L_1^2 \cdot L}{2 \cdot \varphi \cdot I_p}, \quad (2.19)$$

$$r = \frac{F_z}{\Delta z} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot I_p}{L_1^2 \cdot L}. \quad (2.20)$$

Al igual que en los casos previos se tienen las siguientes relaciones:

$$L_A = S \cdot L_B,$$

$$L_{1A} = S \cdot L_{1B},$$

$$\varphi_A = \varphi_B \quad (2.21)$$

$$I_{PA} = S^4 \cdot I_{PB}.$$

Sustituyendo (2.21) en (2.20) se obtiene:

$$r_A = \frac{2 \cdot \varphi_A \cdot I_{PA}}{L_{1A}^2 \cdot L_A} = \frac{2 \cdot \varphi_B \cdot S^4 \cdot I_{PB}}{S^2 \cdot L_{1B}^2 \cdot S \cdot L_B} = S \cdot r_B \quad (2.22)$$

Los ejemplos (A), (B), (C) y (D) muestran que la rigidez del dispositivo A siempre es S veces más grande que la rigidez del dispositivo B. En otras palabras, la rigidez disminuye linealmente con respecto a la disminución de tamaño de los microdispositivos.

Masa

Para calcular la masa de un componente de los dispositivos A y B, es posible dividir todo el volumen que ocupa el dispositivo en paralelepípedos elementales de tamaño $dx \times dy \times dz$, de tal manera que cada paralelepípedo del dispositivo A tiene una correspondencia con un paralelepípedo del dispositivo B, dado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} dx_A &= S \cdot dx_B \\ dy_A &= S \cdot dy_B \\ dz_A &= S \cdot dz_B \end{aligned} \quad (2.23)$$

La masa de un componente es posible expresarla como:

$$m = \iiint \rho(x, y, z) \cdot dx \cdot dy \cdot dz, \quad (2.24)$$

donde $\rho(x, y, z)$ es la densidad de materia en un punto (x, y, z) . En este caso se dividieron los dispositivos A y B en paralelepípedos.

$$\rho_A(x_A, y_A, z_A) = \rho_B(x_B, y_B, z_B). \quad (2.25)$$

Con las ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25) se obtiene:

$$m_A = \iiint \rho_A(x, y, z) \cdot dx_A \cdot dy_A \cdot dz_A = \iiint \rho_B(x, y, z) \cdot S \cdot dx_B \cdot S \cdot dy_B \cdot S \cdot dz_B = S^3 \cdot m_B \quad (2.26)$$

Fuerza de inercia (movimiento lineal uniformemente acelerado)

Un componente con masa m se mueve de un punto 1 a un punto 2 con aceleración uniforme (Figura 2.6). La distancia entre el punto 1 y el punto 2 es L . La velocidad inicial del componente es V_1 y la velocidad final es V_2 .

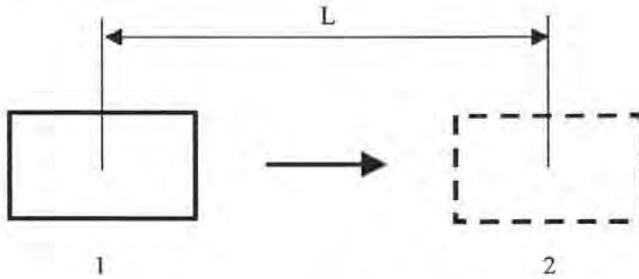


Figura 2.6. Fuerza de inercia

El tiempo que tarda en moverse el elemento del punto 1 al punto 2 está dado por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2 \cdot L}{V_1 + V_2} \quad (2.27)$$

Donde la aceleración se obtiene mediante:

$$A = \frac{V_2 - V_1}{t} = \frac{(V_2 - V_1)(V_2 + V_1)}{2 \cdot L} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot L} \quad (2.28)$$

Y la fuerza de inercia del elemento está dada por:

$$F = m \cdot A = \frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2 \cdot L} \quad (2.29)$$

Cuando la velocidad es la misma en las dos máquinas (A y B), la fuerza de inercia está dada por:

$$F_A = \frac{m_A \cdot (V_{2A}^2 - V_{1A}^2)}{2L_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot (V_{2B}^2 - V_{1B}^2)}{2 \cdot S \cdot L_B} = S^2 \cdot F_B \quad (2.30)$$

Cuando el tiempo es constante la fuerza de inercia está dada por

$$\bar{F}_A = \frac{m_A \cdot (V_{2A}^2 - V_{1A}^2)}{2L_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot (S^2 \cdot V_{2B}^2 - S^2 \cdot V_{1B}^2)}{2 \cdot S \cdot L_B} = S^4 \cdot \bar{F}_B \quad (2.31)$$

Fuerza centrífuga

Un disco de masa m gira con respecto a un eje con velocidad angular ω , figura 2.7. El disco está fijo en un eje con una excentricidad ΔR . La fuerza centrífuga en el disco está dada por:

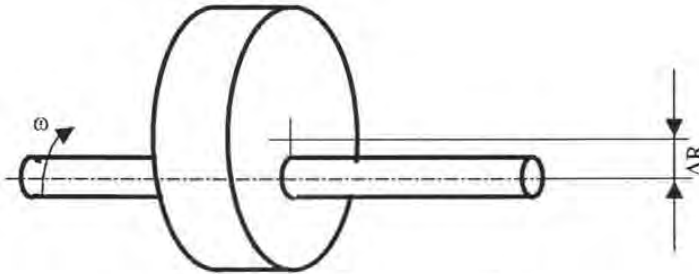


Figura 2.7. Fuerza centrífuga

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot \Delta R = \frac{m \cdot V^2}{\Delta R} \quad (2.32)$$

donde V es la velocidad lineal del centro del disco. Cuando la velocidad es constante la fuerza centrífuga está dada por:

$$F_A = \frac{m_A \cdot V_A^2}{\Delta R_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot V_B^2}{S \cdot \Delta R_B} = S^2 \cdot F_B \quad (2.33)$$

Cuando el tiempo es constante la fuerza centrífuga está dada por

$$\bar{F}_A = m_A \cdot \omega_A^2 \cdot \Delta R_A = S^3 \cdot m_B \cdot \omega_B^2 \cdot S \cdot \Delta R_B = S^4 \cdot \bar{F}_B \quad (2.34)$$

Fuerzas magnéticas

W.S.N. Trimmer [17] investigó el escalamiento de fuerzas magnéticas, electrostáticas, y de potencia generada y disipada. Para fuerzas magnéticas, hay diferentes consideraciones de escalamiento. Si por ejemplo, los dispositivos A y B son motores

electromagnéticos, y la densidad de corriente en las bobinas de estos motores es constante, las fuerzas en los motores A y B se escalan de la siguiente manera:

$$F_A = S^4 \cdot F_B. \quad (2.35)$$

Si estos motores están conformados por rotores de imán la relación es:

$$F_A = S^3 \cdot F_B. \quad (2.36)$$

Los motores pequeños tienen mejores condiciones para refrigeración, por lo que es posible incrementar la densidad de corriente en el motor de menores dimensiones hasta que la temperatura de las bobinas del motor B sea igual a la temperatura de las bobinas de motor A. Para este caso W.S.N Trimmer obtuvo la siguiente ecuación:

$$F_A = S^2 \cdot F_B. \quad (2.37)$$

Fuerzas electroestáticas

En mecánica convencional los actuadores electroestáticos, como es el caso de motores, no son empleados debido a que no producen fuerzas grandes. En [17] se muestra que el escalamiento de fuerzas estáticas depende de condiciones como el campo eléctrico. Si el campo eléctrico E es constante la fuerza es:

$$F_A = S^2 \cdot F_B. \quad (2.38)$$

Las propiedades de los materiales permiten aumentar el campo eléctrico, al reducir las dimensiones del mismo, de acuerdo a la siguiente ecuación [21]:

$$E_A = \frac{E_B}{\sqrt{S}}. \quad (2.39)$$

En este caso:

$$F_A = S \cdot F_B. \quad (2.40)$$

Trimmer analizó la posibilidad de usar las fuerzas magnéticas y electroestáticas para crear micromotores. El escalamiento de fuerzas electroestáticas (ecuación 2.40) permite aumentar la potencia volumétrica disminuyendo el tamaño del micromotor. Pero la experiencia de micromotores producidos mediante tecnologías MEMS muestra que en el rango micrométrico, los micromotores electroestáticos todavía no tienen suficiente potencia como para ser empleados en micromáquinas herramientas y micromanipuladores. En este sentido, estos micromotores no pueden competir con micromotores que basan su funcionamiento, por ejemplo, en fuerzas piezoeléctricas.

Es posible utilizar para micromotores, las fuerzas magnéticas escaladas de acuerdo con la ecuación (2.37), con el inconveniente de que la eficiencia η de micromotor disminuye de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\eta_A = S \cdot \eta_B \quad (2.41)$$

Si se emplean estos motores en microfábricas, el consumo de energía por unidad de volumen crecerá más que S veces con la disminución de tamaños en las micromáquinas herramientas. Por eso para realizar micromotores, es necesario buscar otras fuentes de energía.

En los MEMS se han probado diferentes principios de funcionamiento para micromotores, entre los que se encuentran los micromotores piezoeléctricos, micromotores térmicos, micromotores basados en "shape memory alloys" (SMA), micromotores neumáticos, micromotores hidráulicos, etc. Los micromotores piezoeléctricos tienen muchos problemas referentes al desgaste de sus componentes. Los micromotores térmicos y micromotores SMA tienen baja eficiencia η . Los micromotores neumáticos e hidráulicos tienen gran potencia volumétrica y pueden tener alta eficiencia, por ello es interesante considerar el escalamiento de fuerzas neumáticas e hidráulicas.

Fuerzas neumáticas e hidráulicas

CONDICIÓN 1

La diferencia de presiones Δp y la viscosidad μ del líquido o gas son constantes. La fuerza de presión está dada por la ecuación:

$$F_A = \Delta p_A \cdot A_A = \Delta p_B \cdot S^2 \cdot A_B = S^2 \cdot F_B, \quad (2.42)$$

donde A es el área de actuador (por ejemplo, un pistón) neumático o hidráulico y Δp es diferencia de presiones en el actuador.

El gasto Q del flujo neumático o hidráulico (Figura 2.8) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot L} \cdot (p_1 - p_2), \quad (2.43)$$

donde D y L son el diámetro y longitud del canal respectivamente, y p_1, p_2 son las presiones de entrada y salida del canal respectivamente, mientras que μ es la viscosidad.

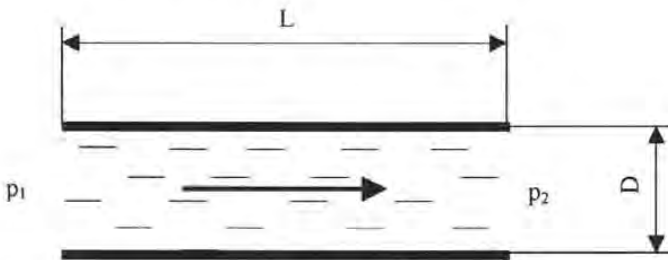


Figura 2.8. Diagrama para análisis de fuerzas en tiempo constante

De la ecuación (2.43) se obtiene,

$$Q_A = \frac{\pi \cdot D_A^4}{128 \cdot \mu_A \cdot L_A} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{\pi \cdot S^4 \cdot D_B^4}{128 \cdot \mu_B \cdot S \cdot L_B} \cdot (p_1 - p_2) = S^3 \cdot Q_B. \quad (2.44)$$

De la ecuación (2.44) se concluye que el gasto del flujo decrece en un orden cúbico con respecto a la disminución del tamaño de los dispositivos. En este caso, es posible calcular la velocidad del flujo en el canal mediante:

$$V_A = \frac{Q_A \cdot 4}{\pi \cdot D_A^2} = \frac{S^3 \cdot Q_B \cdot 4}{\pi \cdot S^2 \cdot D_B^2} = S \cdot V_B \quad (2.45)$$

La ecuación (2.45) es equivalente a una condición de tiempo constante.

CONDICIÓN 2

Para cuando se tienen condiciones de velocidad constante, es necesario disminuir el tamaño de los dispositivos y bajar la viscosidad del líquido o gas de acuerdo a la ecuación:

$$\mu_A = S \cdot \mu_B \quad (2.46)$$

En la mecánica de escala convencional, se emplea aceite para los motores hidráulicos con una viscosidad aproximada de 200 cP. Muchos otros líquidos como alcohol, keroseno, agua, etc., tienen una viscosidad aproximada de 1 cP. Si, por ejemplo, un motor o cilindro hidráulico convencional tiene un diámetro 100 mm y usa aceite como fluido de trabajo, empleando keroseno o alcohol es posible hacer un motor hidráulico de 500 μm de diámetro.

Para disminuir de manera secuencial el tamaño, es posible usar motores neumáticos. Los gases tienen una viscosidad aproximada de 0.02 cP que permite hacer micromotores de 10 μm de diámetro. Entonces, empleando micromotores hidráulicos y neumáticos en micromáquinas herramienta y micromanipuladores, es posible desarrollar todo un amplio espectro de dispositivos micromecánicos.

Fuerzas capilares

Una barra redonda de diámetro d toca una base (Figura 2.9.). El vapor de agua se condensa en el área de contacto, la tensión superficial produce una fuerza capilar F que une la barra a la base:

$$F = \sigma \cdot \pi \cdot d \quad (2.47)$$

donde σ es tensión superficial.

Resolviendo el escalamiento de fuerza se tiene que:

$$F_A = \sigma_s \cdot \pi \cdot d_s = S \cdot \sigma_n \cdot \pi \cdot d_n = S \cdot F_n. \quad (2.48)$$

Es posible estimar el orden de magnitud de la fuerza capilar para $d=1\mu\text{m}$ (es decir 10^{-6} m) y $\sigma = 7 \times 10^{-2}$ N/m,

$$F = \sigma \cdot \pi \cdot d = 7 \cdot 10^{-2} \cdot 3.14 \cdot 10^{-6} = 2.2 \cdot 10^{-7} \text{ N}. \quad (2.49)$$

Para hacer una comparación, se calcula la fuerza hidráulica F_h que afecta a un pistón del mismo diámetro con una diferencia de presión $\Delta p = 10^6$ Pa.

$$F_h = \frac{\Delta p \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{10^6 \cdot 3.14 \cdot 10^{-12}}{4} = 7.85 \cdot 10^{-7} \text{ N} \quad (2.50)$$

Se puede observar que la fuerza capilar es más baja que la fuerza hidráulica.

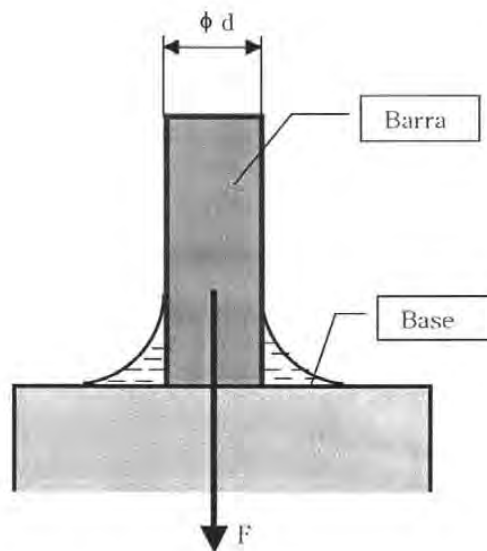


Figura 2.9. Esquema de fuerzas capilares

Fuerzas de corte

La formación de viruta que se tiene durante un proceso de corte, se muestra en la figura 2.10. En esta figura, un buril corta materia

prima y produce viruta que consiste de pedacitos de materia prima. En la Figura 2.10a un pedacito de viruta de la parte baja se despega de la materia prima y una fuerza de fricción F_f afecta al buril (Figura 2.11),

Cuando el buril se mueve (Figura 2.10b), aplasta la materia prima y la fuerza se incrementa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta F_b = C \cdot \sigma_T \cdot t_1 \cdot p, \quad (2.51)$$

donde C es una constante, σ_T es la resistencia en el punto de fluencia de la materia prima, t_1 es altura de área aplastada (Figura 2.10b) y p es la profundidad de corte (Figura 2.10a),

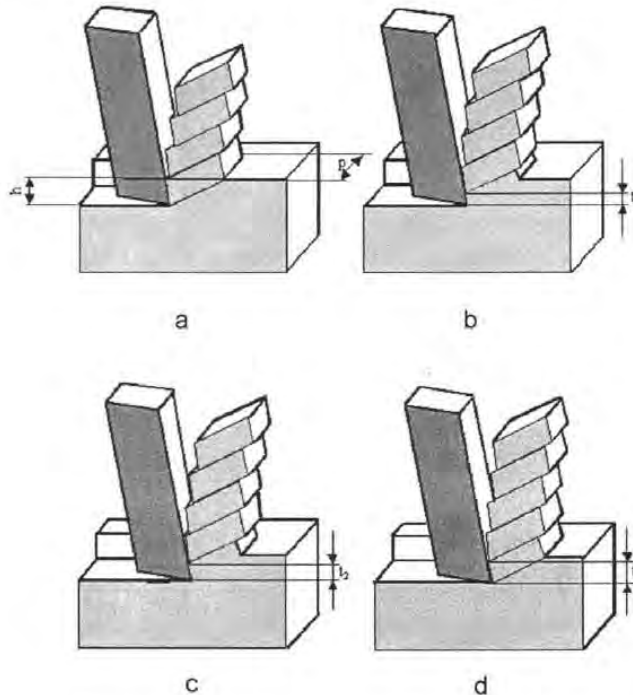


Figura 2.10. Esquema de producción de viruta

Cuando el buril continúa avanzando, la fuerza aumenta ΔF (Figura 2.10c) y alcanza un valor máximo en la posición mostrada en la figura 2.10d.

$$\Delta F = C \cdot \sigma_T \cdot t_3 \cdot p, \quad (2.52)$$

El escalamiento de esta fuerza se puede describir como:

$$\Delta F_s = C \cdot \sigma_T \cdot t_{3s} \cdot p_s = C \cdot \sigma_T \cdot (S \cdot t_{3s}) \cdot (S \cdot p_s) = S^2 \cdot \Delta F_s, \quad (2.53)$$

La figura 2.11 relaciona las fuerzas obtenidas durante los diferentes estados planteados en la figura 2.10.

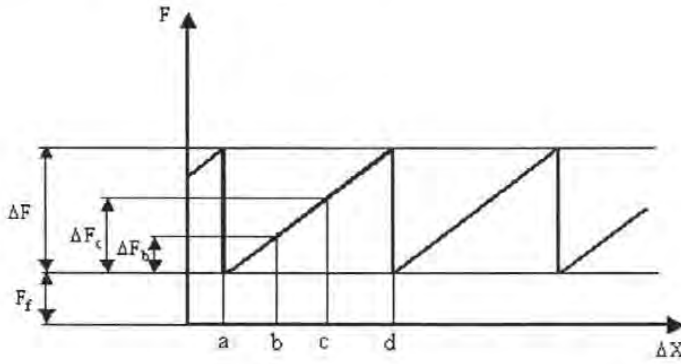


Figura 2.11 Fuerzas que afectan el proceso de corte.

Deformaciones elásticas

Las deformaciones elásticas presentan una de las más importantes causas de error en la producción de dispositivos mecánicos con máquinas herramienta. Con la ayuda de la ecuación (2.3) se obtiene la deformación elástica.

$$\Delta z = \frac{F}{r}, \quad (2.54)$$

donde r es la rigidez de la máquina herramienta, F es fuerza que afecta en la dirección Z . De las ecuaciones (2.9), (2.13), (2.16) y (2.22) tenemos:

$$r_A = S \cdot r_B, \quad (2.55)$$

Para los casos presentados con las ecuaciones (2.30), (2.33), (2.37), (2.38), (2.42) y (2.53) la fuerza está dada por:

$$F_A = S^2 \cdot F_B. \quad (2.56)$$

Para estos casos el escalamiento de deformación es:

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^2 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S \cdot \Delta z_B. \quad (2.57)$$

En otros casos (ecuaciones 2.31, 2.34 y 2.35) se tiene,

$$F_A = S^4 \cdot F_B \quad (2.58)$$

y

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^4 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S^3 \cdot \Delta z_B \quad (2.59)$$

Para el caso (2.36) se tiene

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^3 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S^2 \cdot \Delta z_B. \quad (2.60)$$

A partir de los ejemplos considerados, es posible concluir que los errores producidos por la deformación elástica disminuyen al menos S veces con respecto a la disminución de tamaño en las micromáquinas herramienta. Se tienen dos excepciones, las cuales surgen de las ecuaciones (2.40), (2.48) donde

$$F_A = S \cdot F_B \quad (2.61)$$

y

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S \cdot F_B}{S \cdot r_B} = \Delta z_B. \quad (2.62)$$

Estos casos corresponden a la fuerza electroestática y a la fuerza capilar. Sin embargo estas fuerzas son casi un orden de magnitud

menores que otras fuerzas hasta el tamaño de 1 μm , por eso es posible no considerarlas como de influencia.

Vibraciones

Las ecuaciones presentadas en los párrafos anteriores se relacionan con las deformaciones estáticas. Cuando la fuerza afecta periódicamente puede causar una resonancia en el sistema. La amplitud de una deformación resonante $\Delta z^{(R)}$ está dada por:

$$\Delta z^{(R)} = q \cdot \Delta z, \quad (2.63)$$

donde Δz es la deformación estática y q es el factor de calidad del sistema mecánico.

Se considera que las dos fuerzas periódicas que tienen mayor influencia en la amplitud de vibración son: la fuerza centrífuga y la fuerza de corte. Las dos fuerzas corresponden a la ecuación (2.57). Si se considera que el factor de calidad q de las máquinas herramienta A y B es el mismo, se obtiene:

$$\Delta z_A^{(R)} = q_A \cdot \Delta z_A = q_B \cdot S \cdot \Delta z_B = S \cdot \Delta z_B^{(R)}, \quad (2.64)$$

La influencia de la viscosidad del ambiente afecta más a dispositivos pequeños que a dispositivos grandes, por tal razón,

$$q_A > q_B. \quad (2.65)$$

tomando en cuenta la ecuación (2.65) y aplicándola en la ecuación (2.64) se tiene:

$$\Delta z_A^{(R)} > S \cdot \Delta z_B^{(R)}. \quad (2.66)$$

Con la reducción de tamaños en microdispositivos, se podría esperar que las deformaciones por vibraciones disminuyan más que S veces.

Expansiones térmicas

La expansión térmica de un componente con longitud L , se puede presentar como:

$$\Delta L = a \cdot L \cdot \Delta T, \tag{2.67}$$

donde ΔL es la deformación térmica, a es el coeficiente de la expansión térmica y ΔT es la diferencia de temperatura.

El parámetro a es igual en la máquina herramienta A y B porque depende solamente del material del componente; la longitud de un componente B es S veces más pequeño que la longitud de un componente A :

$$L_A = S \cdot L_B. \tag{2.68}$$

La diferencia de temperatura ΔT consiste en las dos componentes: ΔT_i - diferencia interna de temperatura, y ΔT_e - diferencia externa de temperatura. La máquina herramienta B requiere un volumen más pequeño que el de la máquina herramienta A . Es más fácil mantener una temperatura constante en un volumen pequeño que en uno más grande, por lo tanto podemos escribir:

$$\Delta T_{e_A} \geq \Delta T_{e_B}. \tag{2.69}$$

Para comparar la diferencia entre la temperatura interna y externa se puede considerar un esquema simplificado como el mostrado en la figura 2.12.



Figura 2.12. Esquema que explica el origen de la diferencia de temperatura en máquinas de diferente tamaño.

En la figura 2.12 se observa que la temperatura T_2 en el sumidero de calor (HS) es constante. La energía producida por el generador de calor (HG) es W . Con la información anterior, la diferencia de temperatura se puede obtener de la siguiente manera:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{W \cdot L_{HT}}{\lambda \cdot S_{HT}}, \quad (2.70)$$

donde L_{HT} es la longitud del elemento conductor térmico (HT), S_{HT} es el área de la sección del elemento HT, λ - coeficiente de conductividad térmica.

El parámetro A es igual para las máquinas herramienta A y B , por lo que las relaciones para L_{HT} y S_{HT} quedan:

$$L_{HT_A} = S \cdot L_{HT_B}, \quad (2.71)$$

$$S_{HT_A} = S^2 \cdot S_{HT_B} \quad (2.72)$$

La estimación del parámetro W se obtiene de la siguiente ecuación:

$$W = w \cdot V_{H\phi}, \quad (2.73)$$

donde $V_{H\phi}$ es el volumen del generador de calor y w es la energía volumétrica producida por una unidad de volumen del generador del calor.

Para este problema se consideran dos casos. En el primer caso el parámetro w es igual en las máquinas herramienta A y B . Para este caso:

$$W_A = S^3 \cdot W_B \quad (2.74)$$

Esto se debe a que $V_A = S^3 \cdot V_B$.

Tomando como base las ecuaciones (2.70), (2.71), (2.72) y (2.74), obtenemos:

$$\Delta T_A = \frac{W_A \cdot L_{HT_A}}{\lambda \cdot S_{HT_A}} = \frac{S^3 \cdot W_B \cdot S \cdot L_{HT_B}}{\lambda \cdot S^2 \cdot S_{HT_B}} = S^2 \cdot \Delta T_B \quad (2.75)$$

En el segundo caso que se analiza en este apartado, se considera que la energía volumétrica aumenta con la disminución de los tamaños de la máquina herramienta, por lo que para este caso:

$$w_A = \frac{w_B}{S} \quad (2.76)$$

Por lo tanto,

$$W_A = S^2 \cdot W_B \quad (2.77)$$

y

$$\Delta T_A = \frac{W_A \cdot L_{HTA}}{\lambda \cdot S_{HTA}} = \frac{S^2 \cdot W_B \cdot S \cdot L_{HTB}}{\lambda \cdot S^2 \cdot S_{HTB}} = S \cdot \Delta T_B \quad (2.78)$$

Ambos casos demuestran que la diferencia de temperatura interna en la máquina herramienta *B* es más pequeña que en la máquina herramienta *A*.

Utilizando la ecuación (2.67) es posible obtener:

$$\Delta L_A = a \cdot L_A \cdot \Delta T_A \geq a \cdot S \cdot L_B \cdot \Delta T_B = S \cdot \Delta L_B \quad (2.79)$$

Esto significa que las deformaciones térmicas disminuyen linealmente (o más rápido) con la disminución de tamaño en máquinas herramienta.

Errores excepcionales (que no decrecen con el tamaño)

En la sección anterior se muestra una serie de características y propiedades que se ven aminoradas conforme se disminuyen las dimensiones del equipo, sin embargo existe un tipo especial de errores que no siguen esta regla. Por ejemplo, si se produce un tornillo sinfín para un microtorno *B*, usando un microtorno de una generación previa *A*, y el tornillo sinfín del microtorno *A* tiene errores de paso Δx_A como resultado, el tornillo sinfín de microtorno *B* puede tener los mismos errores que el tornillo del microtorno *A*:

$$\Delta x_B = \Delta x_A \quad (2.80)$$

Este mismo fenómeno se presenta en desviaciones de forma circular, en la forma de dientes de engranes, etc. Con el fin de disminuir estas fuentes de error, es necesario proponer métodos adicionales que permitan hacer estos errores escalables, tal como los errores de la sección anterior.

Métodos de autocorrección para errores excepcionales

En mecánica de escala convencional existen muchos métodos de autocorrección para compensar formas y tamaños en piezas manufacturadas. Por ejemplo, para corregir la forma y el paso de los dientes de un engrane se emplea un dispositivo donde dos engranes con diferente número de dientes se ponen en contacto y se giran agregando polvo abrasivo entre los dientes con el fin de que todos los dientes adquieran una forma óptima y las distancias entre dientes se compensen.

Para corregir la forma de cilindros y conos se usan métodos de "super finish", por ejemplo, tratamiento de tipo "honing". Para corregir la forma de tornillos sinfin se usa una tuerca ranurada de gran longitud, figura 2.13. En esta figura, la tuerca (2) está colocada en el tornillo sinfin (3) y es apretada con el tornillo (4). El tornillo (3) es rotado periódicamente en diferentes sentidos y como consecuencia, la tuerca se mueve sobre el tornillo periódicamente a la izquierda y a la derecha. A través de (1), una mezcla de líquido con polvo abrasivo se agrega al área de contacto entre la tuerca y el tornillo sinfin. Después de muchos ciclos, la forma de la cuerda del tornillo sinfin y los pasos entre dientes de la tuerca se nivelan automáticamente.

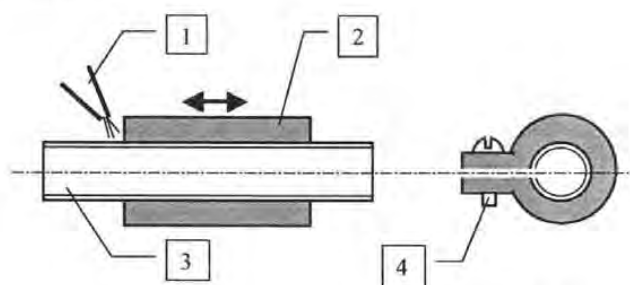


Figura 2.13. Auto corrección de tornillo sinfin

Estos y otros métodos derivados de la mecánica convencional permiten disminuir los errores excepcionales. La desventaja de estos métodos es la baja productividad y el gran desgaste de herramientas que generan. Por eso, en este trabajo se proponen otros métodos que permiten disminuir los errores excepcionales.

Método de palanca

En la figura 2.14 se presenta un esquema del método de palanca, el cual consiste en un carro que se mueve linealmente sobre una mesa con la ayuda de una palanca. Un extremo de esta palanca está conectado a la mesa y otro está conectado a una tuerca que se desplaza sobre un tornillo sinfín. Todos los errores del tornillo sinfín se disminuyen con un factor de L_2/L_1 , cuando el movimiento se transfiere de la tuerca al carro. Este esquema permite disminuir los errores del tornillo sinfín cuando se fabrican componentes de generaciones más pequeñas de microequipo. Por ejemplo, si colocamos en el carro un porta herramienta con un buril para producir un tornillo sinfín para la siguiente generación de microequipo, el producto terminado tendrá asociados a él errores semejantes al del tornillo sinfín grande, pero aminorados tantas veces como la relación entre L_2 y L_1 . Este método puede emplearse, tanto en micromáquinas herramienta, como en micromanipuladores.

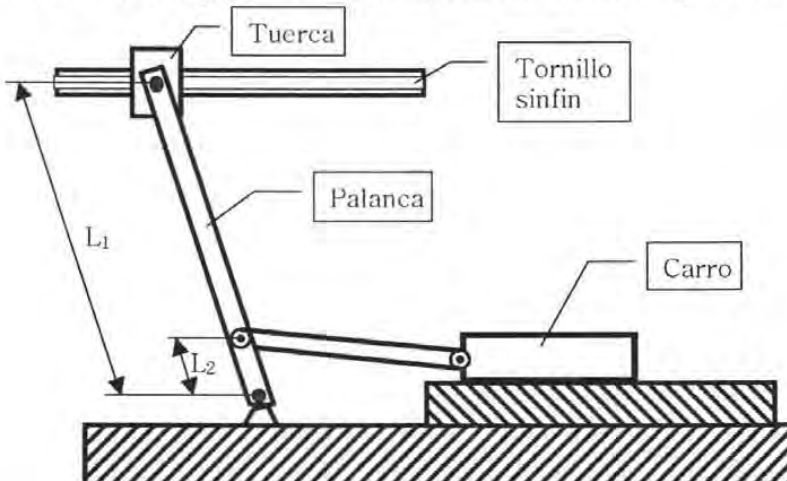


Figura 2.14. Método de palanca.

Microcentros de maquinado basados en paralelogramos.

En el laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET UNAM se desarrollan, entre otras cosas, microcentros de maquinado desde el año 2000. Por la razón anterior, y para probar la eficiencia del método de palanca, se inició el desarrollo de una micromáquina herramienta basada en paralelogramos con propulsión de palanca.

OBJETIVO

Contribuir al campo de la Micromecánica demostrando que es posible emplear mecanismos de palancas y paralelogramos para el desarrollo de microequipo de bajo costo para células de manufactura.

METAS

- Demostrar si la aplicación de palancas y paralelogramos proporciona la resolución adecuada en micromáquinas de bajo costo.
- Proponer un diseño de micromáquina basado en la configuración de palancas y paralelogramos propuesta.
- Establecer recomendaciones de diseño en base a la experiencia.
- Construir un prototipo.

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCEDIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo, DESARROLLO DE MICROEQUIPO PARA CÉLULAS DE MANUFACTURA, se establecieron los siguientes pasos:

↳ **Investigación del estado del arte en micromáquinas herramientas.** *En esta primera etapa del proyecto se propone*

investigar la información reportada referente a micromáquinas herramientas, microfábricas sobre mesa, sus configuraciones y la manera de operar de las mismas. La información resultante se encuentra en el capítulo 1.

↳ **Propuesta para el desarrollo de microequipo de bajo costo.** *Aquí se investigan y proponen los fundamentos tecnológicos para la creación de microequipo de bajo costo. También se proponen el objetivo y las metas de este trabajo, capítulo 2.*

↳ **Desarrollo.** *En esta etapa se diseña y construye un caso de estudio, un microcentro de maquinado. Así mismo, se realiza el análisis de movimientos de cada eje que conforma el prototipo. También se propone un sistema de control para el equipo desarrollado. Capítulo 3*

↳ **Evaluación.** *Se plantea, tras la construcción de este nuevo microcentro de maquinado, que se realicen pruebas apoyadas en software de reconocimiento de imágenes. Capítulo 4*

CAPÍTULO
3

DESARROLLO DE UN CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se describen las actividades realizadas para el desarrollo de un prototipo de microequipo para células de producción.

PLANTEAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO

Se propone diseñar y construir el sistema de movimientos translacionales de un microcentro de maquinado, que permita la generación de micropiezas en 3D, inferiores a 5mm. Este caso de estudio deberá ser de bajo costo, así mismo deberá presentar características de operación que le permitan obtener resoluciones inferiores a una micra empleando mecanismos de palancas y paralelogramos.

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.*

- ↳ *Aplicando métodos de autocorrección de errores.*
- ↳ *Multifuncional. El microcentro 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 lo posible, evitar el uso de sistemas comerciales de alto costo, y disminuir la dependencia tecnológica.*
- ↳ *Sistema de control automatizado, que facilite su uso y disminuya la cantidad de mano de obra requerida durante la operación.*

ESPECIFICACIONES

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

- ↳ *Capacidad para producir piezas dentro del rango de 50 micrómetros y hasta 5 milímetros.*
- ↳ *Resolución mínima de un micrómetro 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 de cómputo convencional.*

RECURSOS

Para el desarrollo de este trabajo se considera importante mencionar los recursos con los que se contaba, a fin de establecer el marco que se tenía para realizarlo y establecer que efectivamente se desarrolló a bajo costo comparativamente con otras instituciones en el mundo que desarrollan microequipo.

Este trabajo fue desarrollado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico UNAM, a través de sus Laboratorios, en especial el de Micromecánica y Mecatrónica.

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

- ✓ *Taller mecánico con máquinas herramientas convencionales y dos máquinas de control numérico de uso ligero de la compañía Sherline: modelo 2010 para la fresadora y 4410 para el torno.*
- ✓ *Apoyo de instrumental convencional de medición geométrica y Máquina de Medición por Coordenadas del Laboratorio de Metrología del mismo CCADET UNAM.*
- ✓ *Equipo de cómputo y software modelador de Sólidos (SolidWorks)*

Evaluación de la propuesta

La propuesta de emplear una configuración de palancas y paralelogramos para microcentros de maquinado fue evaluada con los criterios presentados en [19]. Esta evaluación se realizó con el fin de determinar si este sistema contaba con la habilidad de mejorar las cualidades obtenidas por el primer prototipo de microcentro de maquinado desarrollado en México.

Para comparar las diferentes posibles soluciones planteadas, se asignaron valores a diferentes objetivos. Los valores asignados se justifican con los recursos con los que se contaba para realizarlos, con la experiencia previa, y con el costo asociado a materiales y manufactura. El procedimiento para la evaluación de estas soluciones fue:

- ☞ *Listar los requerimientos planteados.*
- ☞ *Ordenar los requerimientos de manera jerárquica, con base en criterios orientados a las especificaciones y los recursos.*



- ↻ *Asignar valores relativos a cada objetivo.*
- ↻ *Establecer parámetros de rendimiento para cada propuesta en cada objetivo. Este valor se coloca con base en la experiencia.*
- ↻ *Calcular y comparar diseños en función de resultados.*

De esta manera se consideraron los objetivos y sus valores en la tabla 2.1.

Objetivo	Valor relativo
Facilidad de Manufactura	3
Rendimiento	3
Bajo costo	2
Facilidad para miniaturizar	2

Tabla 2.1. Objetivos y sus valores

De esta manera se define que para 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. Haciendo un cuadro comparativo entre diferentes alternativas se presenta la tabla 2.2.

Guías	
Solución 1	Cola de Milano 
Solución 2	Bolas 


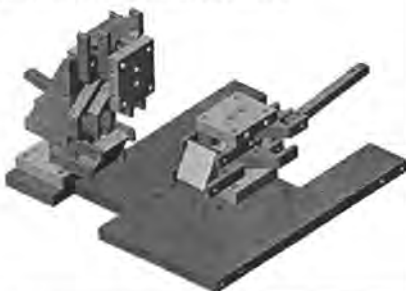
Solución 3	Barras paralelas 
Solución 4	Palancas, esferas y paralelogramos 

Tabla 2.2 Tabla comparativa entre diferentes soluciones de guías

Los resultados del proceso de evaluación son mostrados en la tabla 2.3. Como resultado de la evaluación, se identifica que el desarrollo de un equipo con la configuración antes mostrada, contaba con sustento para ser realizado. Adicionalmente se encontró que es un equipo novedoso, por configuración, en el desarrollo de microequipo.

Solución	Manufactura (3)	Rendimiento (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
Palancas, esferas y paralelogramos	9	8	8	8	83

Tabla 2.3. Proceso de evaluación de alternativas para guías.

Bases para el diseño

Con base en la experiencia obtenida en el desarrollo del primer prototipo mexicano (mostrado en el capítulo 1), se propusieron algunas recomendaciones de diseño para el desarrollo de microequipo de bajo costo, que principalmente buscan la sencillez del diseño. La sencillez, entendida como la integración y manufactura de componentes que no requieran tecnologías fuera de los recursos con los que se cuenta para desarrollar el microequipo, es uno de los factores más importantes para reducir el costo de desarrollo, así como también el generar piezas que tengan diferentes aplicaciones dentro de la máquina. El uso de sistemas asistidos por computadora (diseño y manufactura), son de gran ayuda para reducir los tiempos de desarrollo y contar con un plan de manufactura. Así mismo se recomienda el uso, en medida de lo posible, del mismo material en la máquina para evitar problemas asociados con diferentes expansiones térmicas.

Con el objetivo de reducir el tiempo invertido al desarrollo de futuras generaciones de microequipo, se propone incluir durante el proceso de diseño, elementos que puedan ser escalados, y que tengan una aplicación general dentro de la máquina, recomendando utilizar elementos simples para obtener desplazamientos suaves (sin discontinuidades), que requieren de especial atención durante los procesos de ensamble y de reducción de tamaño.

Las ideas antes mencionadas se pueden sintetizar en las siguientes recomendaciones de diseño [20,21]:

1. Uso de sistemas CAD.
2. Uso de materiales con coeficientes de dilatación térmica semejantes.
3. Diseñar piezas que puedan ser utilizadas en diferentes puntos de las configuraciones planeadas.
4. Diseñar pensando siempre en los procesos de mantenimiento y ensamble.

5. Aplicación de elementos que permitan desplazamientos suaves (como esferas y barras cilíndricas).
6. Uso de elementos para reducir juego mecánico (backlash).
7. En medida de lo posible resolver problemas de exactitud y precisión con software y no con hardware.
8. Desarrollar subsistemas que permitan la ejecución de funciones específicas: Módulos.

Partiendo de la lista anterior, se inició el desarrollo de un nuevo prototipo de microcentro de maquinado.

Consideraciones especiales

Los principales puntos a considerar en este nuevo prototipo son:

- Problemas de ensamble y desensamble.
- Procurar movimientos suaves y continuos.
- Problemas por diferencia de materiales.
- Disminuir el número y tipo de piezas empleadas.
- Mejorar la resolución de la máquina.
- Facilitar la producción de la segunda generación.

Desarrollo

Propuesta

Una de las metas propuestas para este proyecto es el aplicar mecanismos de palancas y paralelogramos para obtener los movimientos de translación de un microcentro de maquinado, por lo que se propone el desarrollo de un nuevo prototipo de micromáquina

herramienta. Este nuevo prototipo está desarrollado bajo especificaciones semejantes a las aplicadas en el primer prototipo mexicano (capítulo 1), pero complementadas con la experiencia en el diseño y caracterización de dicho prototipo.

La idea principal consiste en emplear una palanca articulada en un extremo y con diferentes puntos de anclaje a lo largo de la misma palanca. Con esto, es posible utilizar a la palanca como un convertidor a baja velocidad y alto torque. En la figura 3.1, se muestra un esquema general del mecanismo. Los puntos de anclaje en la palanca que se encuentran más alejados del punto de rotación tienen un mayor desplazamiento tangencial que los puntos que se encuentran cercanos al mismo. De esta manera al generar un desplazamiento angular de la palanca, los puntos cercanos al centro de rotación presentan desplazamientos tangenciales menores, y por consiguiente una menor velocidad tangencial.

Aprovechando tales características, se propone generar el movimiento angular de la palanca, en su parte más alejada del centro de rotación, mientras que se pretende obtener una salida de movimiento de dicha palanca en un punto más cercana a dicho eje de rotación.

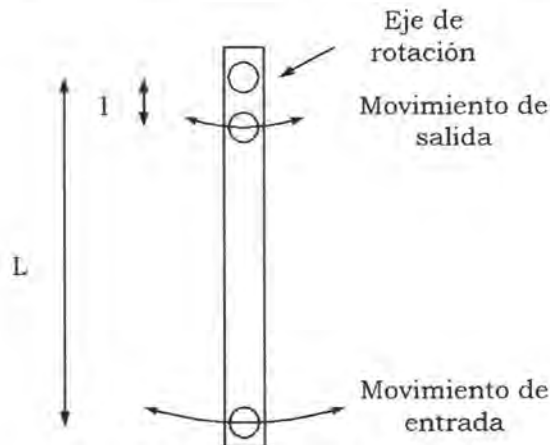


Figura 3.1. Mecanismo de palanca.

Finalmente, en el punto de salida antes mencionado, se debe colocar un elemento que conecte con un mecanismo de paralelogramo. En la

figura 3.2 se muestra un esquema del mecanismo de paralelogramo propuesto. En el lado izquierdo está una vista lateral del diseño del paralelogramo, mientras que del lado derecho se encuentra la representación de ese mismo paralelogramo mediante barras y puntos de articulación.

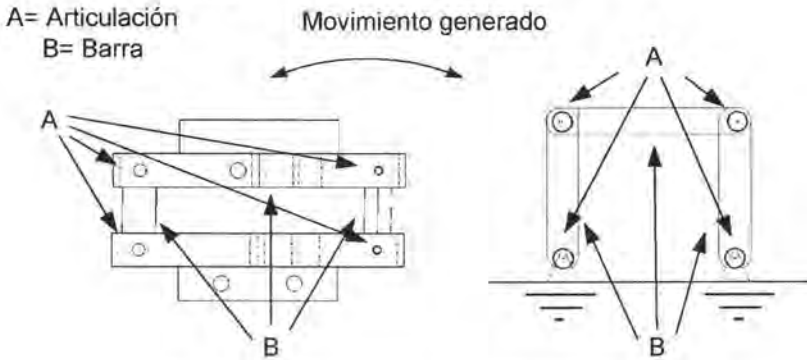


Figura 3.2. Mecanismo de paralelogramo.

Consideraciones de movimiento

Para el desarrollo de un microcentro de maquinado, se define el arreglo mostrado en la figura 3.3 para realizar movimientos tridimensionales.

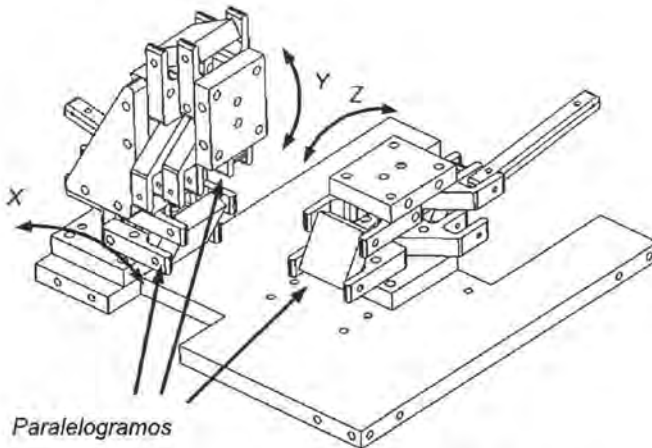


Figura 3.3. Configuración propuesta para los ejes.

En la configuración mostrada en la figura 3.3, se aprecia que la propuesta incluye un eje Z , que se desplaza de manera independiente, mientras que los ejes X y Y , se encuentran colocados de manera serial.

Es sencillo visualizar que el movimiento de los ejes propuestos es en planos ortogonales con desplazamientos no lineales, dado que cada mecanismo genera trayectorias en forma de casquetes circulares debido a la configuración de paralelogramo. Un esquema general del movimiento de dos ejes encadenados es mostrado en la figura 3.4.

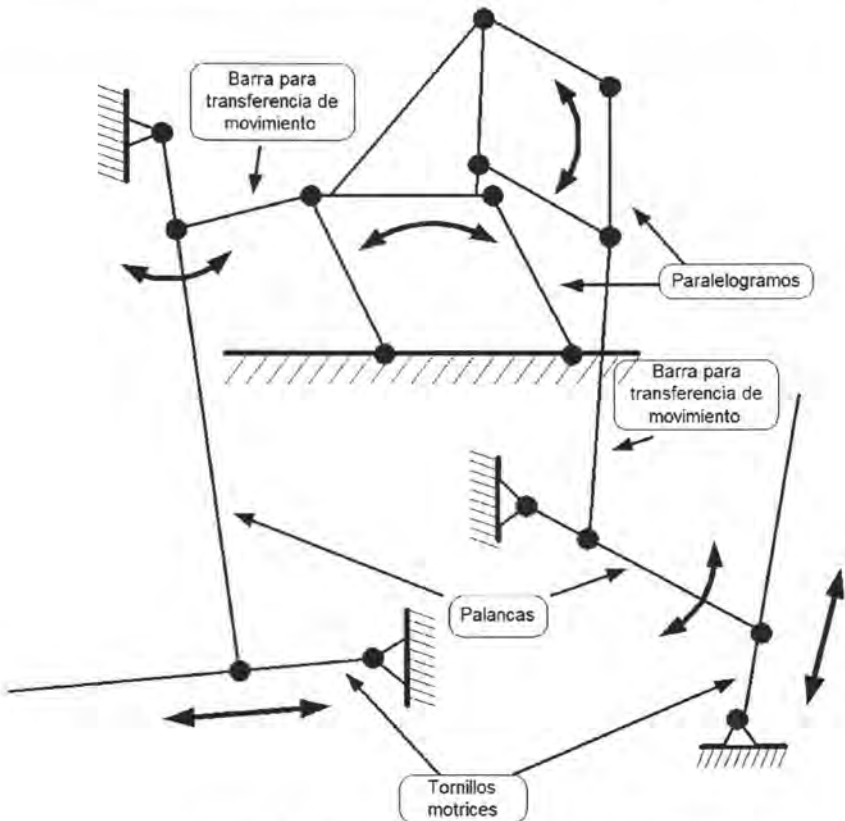


Figura 3.4. Esquema general de movimientos

Para determinar la posición de un punto dado, colocado al final de dos eslabones de tipo palancas, esferas y paralelogramos, se hará

referencia a la figura 3.5, en la que se identifican diferentes puntos del mecanismo, se trazan líneas auxiliares marcadas de manera discontinua, y se señalan ángulos formados entre elementos físicos y auxiliares.

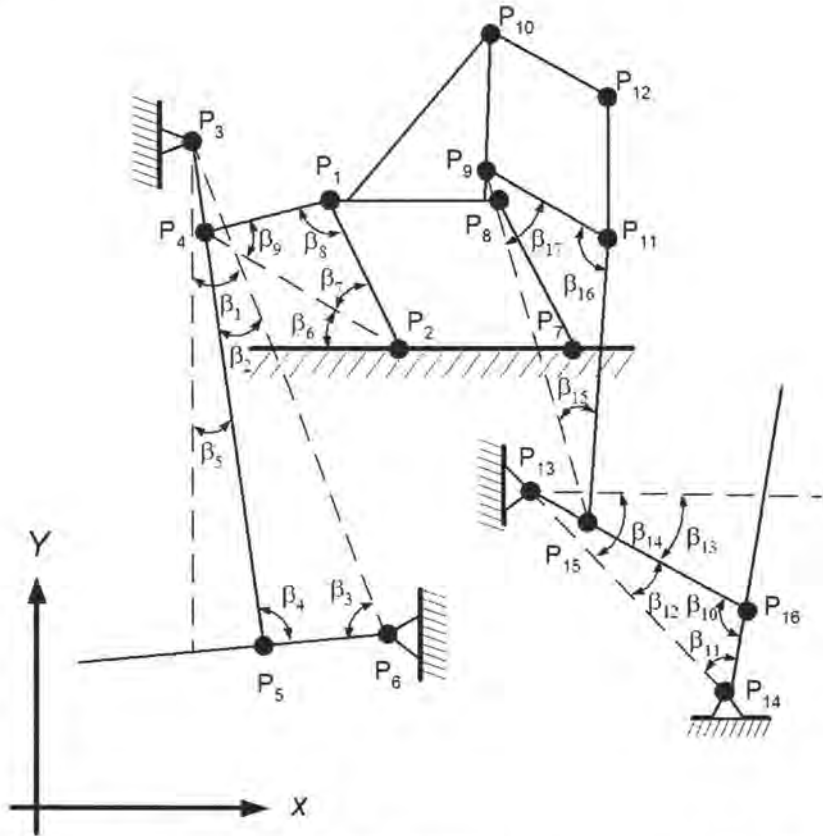


Figura 3.5. Esquema de apoyo para determinar la posición de un punto en el plano XY

Como puede apreciarse, entre los elementos de este mecanismo y trazos auxiliares, es posible formar arreglos de triángulos. Por tal motivo podemos apoyarnos en la ley de senos y en la suma de los ángulos internos para obtener los valores faltantes dentro de dichos arreglos. En el caso del arreglo mostrado en la figura 3.5, se puede

apreciar que tenemos movimiento dentro de un plano XY , de tal suerte que para cada punto dado P , existen sus componentes (x,y) .

Partiendo de la ley de senos:

$$\frac{A}{\text{sen } \beta_A} = \frac{B}{\text{sen } \beta_B} = \frac{C}{\text{sen } \beta_C} \quad 3.1$$

de la ecuación para determinar la distancia entre dos puntos:

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad 3.2$$

y de la relación de la suma de los ángulos internos de un triángulo:

$$\alpha + \beta + \phi = \pi \quad 3.3$$

es posible generar el siguiente sistema de ecuaciones:

$$D_{36} \cdot \text{sen } \beta_4 = D_{36} \cdot \text{sen } \beta_2 \quad 3.4$$

$$D_{35} \cdot \text{sen } \beta_4 = D_{36} \cdot \text{sen } \beta_3 \quad 3.5$$

$$\beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = \pi \quad 3.6$$

y con las relaciones:

$$\text{sen } \beta_1 = \frac{x_6 - x_3}{D_{36}} \quad 3.7$$

$$\beta_5 = \beta_1 - \beta_2 \quad 3.8$$

es posible determinar el valor para el punto $P_4(x_4, y_4)$, dado por:

$$x_4 = x_3 + D_{34} \cdot \text{sen } \beta_5 \quad 3.9$$

$$y_4 = y_3 - D_{34} \cdot \text{cos } \beta_5 \quad 3.10$$

Una vez establecido el valor del punto $P_4(x_4, y_4)$, con 3.9 y 3.10, es posible aplicar el mismo procedimiento para encontrar el valor del punto $P_1(x_1, y_1)$.

Partiendo de:

$$\text{sen } \beta_6 = \frac{y_4 - y_2}{D_{24}} \quad 3.11$$

y apoyado en 3.1, 3.2, y 3.3, se obtiene:

$$D_{12} \cdot \text{sen } \beta_7 = D_{14} \cdot \text{sen } \beta_9 \quad 3.12$$

$$D_{12} \cdot \text{sen } \beta_8 = D_{24} \cdot \text{sen } \beta_9 \quad 3.13$$

$$\beta_7 + \beta_8 + \beta_9 = \pi \quad 3.14$$

con lo que es posible solucionar los valores para el punto $P_1(x_1, y_1)$ dados por:

$$x_1 = x_2 - D_{12} \cdot \cos(\beta_6 + \beta_7) \quad 3.15$$

$$y_1 = y_2 + D_{12} \cdot \text{sen}(\beta_6 + \beta_7) \quad 4.16$$

Hasta este punto se tiene la solución de un eje trabajando de manera independiente. Continuando con el desarrollo para cuando tenemos dos ejes montados uno sobre el otro (configuración serial), tenemos:

$$D_{1416} \cdot \text{sen } \beta_{10} = D_{1314} \cdot \text{sen } \beta_{12} \quad 3.17$$

$$D_{1316} \cdot \text{sen } \beta_{10} = D_{1314} \cdot \text{sen } \beta_{11} \quad 3.18$$

$$\beta_{10} + \beta_{11} + \beta_{12} = \pi \quad 3.19$$

que con las relaciones:

$$\operatorname{sen} \beta_{13} = \frac{y_{16} - y_{13}}{D_{1316}} \quad 3.20$$

$$\beta_{14} = \beta_{12} - \beta_{13} \quad 3.21$$

es posible determinar el valor para el punto $P_{15}(x_{15}, y_{15})$, dado por:

$$x_{15} = x_{13} + D_{1315} \cdot \cos \beta_{13} \quad 3.22$$

$$y_{15} = y_{13} - D_{1315} \cdot \operatorname{sen} \beta_{13} \quad 3.23$$

Una vez determinados los valores para el punto $P_{15}(x_{15}, y_{15})$, y con el apoyo de:

$$\operatorname{sen} \beta_{18} = \frac{y_9 - y_{15}}{D_{915}} \quad 3.24$$

y del siguiente sistema:

$$D_{911} \cdot \operatorname{sen} \beta_{17} = D_{1115} \cdot \operatorname{sen} \beta_{15} \quad 3.25$$

$$D_{915} \cdot \operatorname{sen} \beta_{17} = D_{1115} \cdot \operatorname{sen} \beta_{16} \quad 3.26$$

$$\beta_{15} + \beta_{16} + \beta_{17} = \pi \quad 3.27$$

es posible solucionar los valores para el punto $P_{11}(x_{11}, y_{11})$:

$$x_{11} = x_9 + D_{911} \cdot \operatorname{sen} (\beta_{17} + \beta_{18}) \quad 3.28$$

$$y_{11} = y_9 - D_{911} \cdot \cos (\beta_{17} + \beta_{18}) \quad 3.29$$

donde:

$$x_9 = x_1 + Dx_{19} \quad 3.30$$

$$y_9 = y_1 + Dy_{19} \quad 3.31$$

El desarrollo matemático anterior es la base para determinar la posición de cualquier punto contenido en el área de trabajo del plano XY . Ahora bien, apoyado en la figura 3.6, es posible determinar la posición del tercer eje, que comprende movimientos dentro del plano YZ .

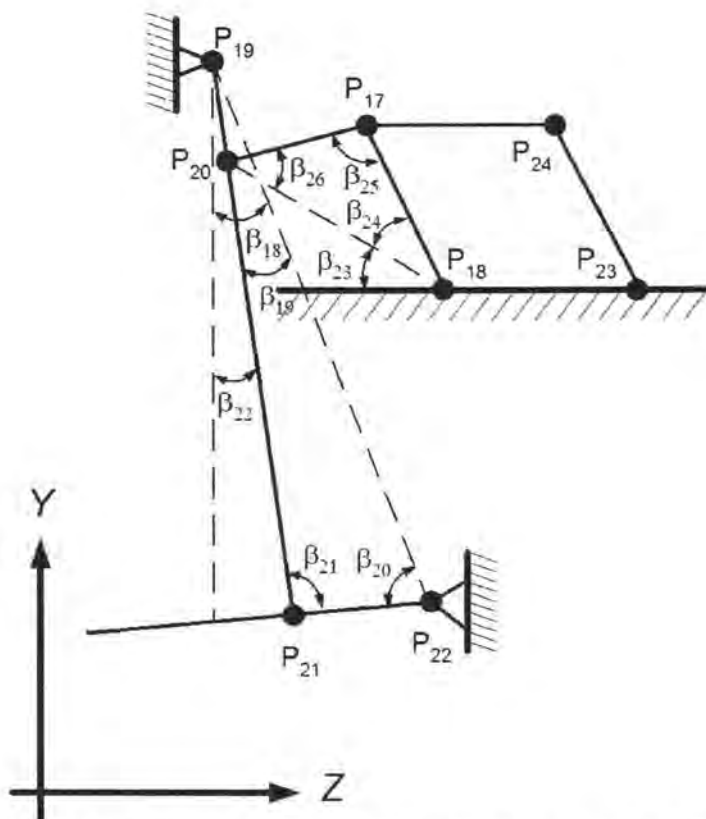


Figura 3.6. Esquema para determinar la posición de un punto en el plano YZ

De la figura 3.6, y de las ecuaciones de la 3.1 a la 3.3, es posible determinar el siguiente sistema:

$$D_{2122} \cdot \text{sen } \beta_{21} = D_{1922} \cdot \text{sen } \beta_{19} \quad 3.32$$

$$D_{1921} \cdot \text{sen } \beta_{21} = D_{1922} \cdot \text{sen } \beta_{20} \quad 3.33$$

$$\beta_{19} + \beta_{20} + \beta_{21} = \pi \quad 3.34$$

y con las relaciones:

$$\text{sen } \beta_{18} = \frac{z_{22} - z_{19}}{D_{1922}} \quad 3.35$$

$$\beta_{22} = \beta_{18} - \beta_{19} \quad 3.36$$

es posible determinar el valor para el punto $P_{20}(y_{20}, z_{20})$, dado por:

$$y_{20} = y_{19} - D_{1920} \cdot \cos \beta_{22} \quad 3.37$$

$$z_{20} = z_{19} + D_{1920} \cdot \text{sen } \beta_{22} \quad 3.38$$

Una vez establecido el valor del punto $P_{20}(y_{20}, z_{20})$, con 3.37 y 3.38, es posible aplicar el mismo procedimiento para encontrar el valor del punto $P_{17}(y_{17}, z_{17})$.

Partiendo de:

$$\text{sen } \beta_{23} = \frac{y_{20} - y_{18}}{D_{1820}} \quad 3.39$$

y apoyado en 3.1, 3.2, y 3.3, se obtiene:

$$D_{1718} \cdot \text{sen } \beta_{24} = D_{1720} \cdot \text{sen } \beta_{26} \quad 3.40$$

$$D_{1718} \cdot \text{sen } \beta_{25} = D_{1820} \cdot \text{sen } \beta_{26} \quad 3.41$$

$$\beta_{24} + \beta_{25} + \beta_{26} = \pi \quad 3.42$$

con lo que es posible solucionar los valores para el punto $P_{17}(y_{17}, z_{17})$ dados por:

$$y_{17} = y_{18} + D_{1718} \cdot \text{sen } (\beta_{23} + \beta_{24}) \quad 3.43$$

$$\bar{z}_{17} = \bar{z}_{18} - D_{1718} \cdot \cos(\beta_{23} + \beta_{24}) \quad 3.44$$

Aplicación de las recomendaciones de diseño

Partiendo de la experiencia previa en el desarrollo de microequipo, se consideró que el empleo de sistemas CAD, como el modelador de sólidos SolidWorks™, era indispensable para aminorar los tiempos de desarrollo y para incrementar la certeza del diseño.

Con el objeto de aminorar las diferencias de dilatación térmica originadas por el empleo de diversos materiales, en medida de lo posible se propone el uso de latón, dado que dicho material es económico, es posible obtenerlo en diferentes presentaciones, y la facilidad para ser maquinado es semejante a la de algunos aceros.

Adicionalmente se propone utilizar piezas que puedan ser empleadas en diferentes lugares dentro de la nueva máquina. En específico se propone que los elementos que conforman los sistemas de palancas, esferas y paralelogramos, sean elementos de fácil intercambio entre los diferentes ejes donde serán colocados.

Para facilitar los procesos de ensamble y mantenimiento, se propone diseñar un sistema abierto, que permita retirar ejes de manera independiente, o bien que permita realizar la mayor cantidad de ajustes con un mínimo de piezas removidas.

Para obtener desplazamientos suaves y continuos, se propone la incorporación de balines de acero entre las uniones que transmitan movimiento. Este arreglo permite que, con el uso, los elementos de acero realicen un acople perfecto sobre los elementos de latón que serán la base. Cabe aclarar que los balines comerciales presentan buenos niveles de redondez sin involucrar altos costos (orden de fracciones de micrómetros).

Con el fin de disminuir el juego mecánico entre los elementos de palancas, balines y paralelogramos, es importante considerar elementos de ajuste entre estas uniones a manera de prever el posible desgaste que generará el balín de acero sobre el soporte de latón.

Finalmente y como puede apreciarse en las consideraciones de movimiento, las ventajas que se aprecian en la manufactura y la operación del sistema, se ven relacionadas con algoritmos de control complejos que logren determinar la posición de un punto tridimensional cartesiano, determinado por movimientos tridimensionales de casquetes circulares. Esto permite establecer que con el fin de no emplear componentes costosos, es necesario desarrollar e implementar sistemas de control que compensen las desventajas de sistemas mecánicos simples.

Diseño

Descomposición modular

La configuración modular permite diseñar, de manera sistemática, elementos mecánicos que satisfarán las múltiples funciones de las MMH. La capacidad del microequipo para integrar funciones por medio de módulos, es lo que podemos definir como la modularidad. Algunas características de la modularidad en las MMH son [20]:

- Permite interpretar los módulos como unidades en sí.
- Permite acotar el efecto de alguna falla al ámbito de un módulo y por consiguiente es posible corregirla de una manera más eficiente y rápida.
- Da independencia funcional pero integración cuando los módulos son acoplados al equipo, facilitando los cambios y flexibilizando las operaciones de las MMH.
- Los módulos pueden interactuar con otros módulos aunque se busca minimizar el colocarlos en serie para evitar el efecto de propagación o multiplicación de fallas o errores.

Debido a lo anterior, se decidió separar el desarrollo del caso de estudio en sistemas y módulos, los cuales a su vez pueden dividirse en pequeñas unidades que se encuentran formadas por elementos. Los sistemas y módulos de este microequipo son:

➤ Sistema Rotacional

↳ *Módulo de sujeción de material*

➤ Sistema Translacional.

↳ *Módulo de paralelogramos*

↳ *Módulo de palancas*

↳ *Módulo de actuación*

➤ Sistema de Estructura

La división anterior corresponde con sistemas que de manera independiente cumplen una función específica dentro del equipo, o bien que por características propias de ensamble o manufactura, son considerados como contenedores de módulos independientes.

El sistema de rotación involucra el módulo para generar el movimiento del eje rotacional, el cual es el encargado de generar los movimientos relativos entre la herramienta y la materia prima. Para tales efectos se considera un motor a pasos, un tren de engranes, y los elementos de sujeción de materia prima o herramienta. Cabe aclarar que cada uno de los sistemas puede incrementar la cantidad de módulos utilizados en virtud de nuevas especificaciones, o bien disminuir la cantidad de los mismos conforme se evoluciona en los procesos de diseño.

El sistema de translación es considerado como el conjunto de módulos que incluye al de palanca, paralelogramo y actuación, que están formados por elementos como motores, unidades de detección de posición, y la transmisión del sistema. Se propone que dichos módulos sean iguales para aplicarlos a cualquiera de los ejes translacionales, con el fin de facilitar los procesos de manufactura y ensamble.

Finalmente, el sistema de estructura es conformado por elementos que dan soporte o cabida al resto de los sistemas, y sus módulos, que en su conjunto generan a la micromáquina propuesta.

Para fines prácticos se analizarán únicamente los elementos principales de acople de la máquina, su configuración, y el tren motriz.

Elementos

Como elementos fundamentales para el caso de estudio propuesto, se proponen piezas que permiten la unión entre palancas y plataformas mediante esferas, de tal suerte que se idearon piezas simples que giran sobre uno de sus apoyos para dar cabida a elementos esféricos (balines), y que poseen un tornillo de ajuste que mantiene dichos balines contra otra de las piezas que se mantiene firmemente anclada, esto con el fin de compensar las posibles variaciones y desgastes que ocurran entre elementos. En las figuras 3.7a y 3.7b es posible apreciar la configuración descrita anteriormente.

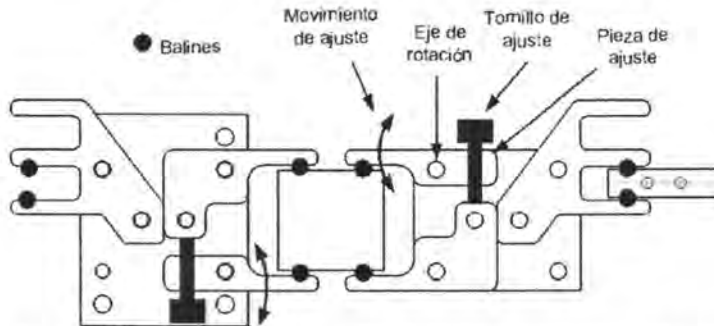


Figura 3.7a. Sistema de unión de elementos con balines abierto.

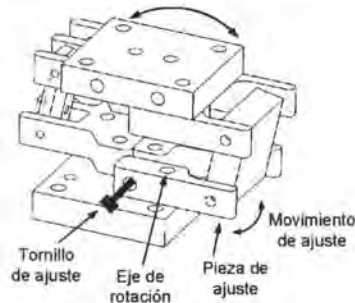


Figura 3.7b. Sistema de unión de elementos con balines cerrado.

Este sistema de sujeción, se encuentra acoplado a una plataforma que lo soporta, y que en su otro extremo cuenta con un elemento que da cabida a una palanca de rotación. Esta configuración genera paralelogramos articulados para el movimiento. Los elementos básicos para el movimiento son las piezas de soporte para las esferas y placas. Estos elementos son intercambiables para cada uno de los ejes, simplificando de manera considerable los problemas asociados con la producción de diferentes tipos de piezas mecánicas.

Configuración

La configuración básica de la máquina se resume a tres ejes de movimientos no lineales, que se desplazan en planos ortogonales. Esta configuración da como resultado un espacio de trabajo no convencional para máquinas herramientas, debido a la falta de linealidad en el desplazamiento de cada eje. Una de las principales ventajas de esta configuración es el permitir insertar elementos esféricos, mientras que su principal inconveniente es la necesidad de sistemas de control más avanzados para obtener las trayectorias directas e inversas de la micromáquina. Una representación del volumen de trabajo que genera esta configuración es mostrada en la figura 3.8.

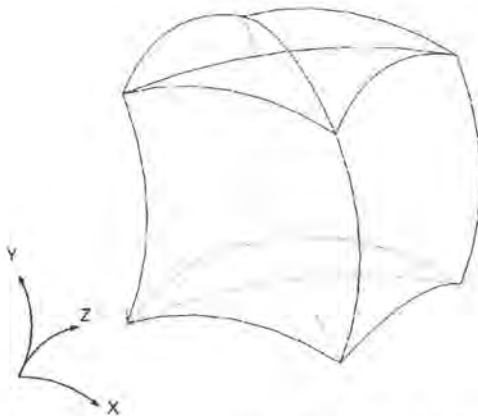


Figura 3.8. Representación del espacio de trabajo.

Tren motriz

El tren motriz es, después de los elementos que configuran el movimiento, el sistema más importante de una micromáquina herramienta. Es el conjunto de partes que se encuentra conformada por la unión de actuadores y elementos de transmisión. Para que el caso de estudio presentado logre cumplir con las especificaciones de diseño planteadas, se consideró crear módulos que se encuentran colocados fuera de la micromáquina herramienta, consiguiendo con esto la posibilidad de escalamiento de esta máquina permitiendo la misma configuración mecánica y manteniendo los módulos de trenes motrices fuera de un factor de escalamiento, al menos para la siguiente generación.

Los actuadores empleados son nuevamente motores de cuatro pasos que se encuentran colocados sobre bases acopladas a trenes de engranes, que a su vez se conectan a un tornillo sin fin, que trasfiere movimiento a una palanca mediante una tuerca montada sobre una configuración de cardán. El sin fin se encuentra montado sobre una esfera con el fin de absorber las desviaciones generadas por el movimiento. Todo este arreglo, mostrado en la figura 3.9, permite obtener una reducción de 39 a 1 en la transmisión con cuatro pares de engranes, que aunado al mecanismo de palanca que proporciona una relación de 6 a 1, y el tornillo sin fin que tiene un paso de 0.5mm, se obtiene como resultado una relación de 468 a 1, lo cual al ser aplicado en conjunto con el motor de cuatro pasos, proporciona una resolución teórica de 534 nanómetros por revolución.

Manufactura

El proceso de manufactura se realizó con el apoyo de equipo de control numérico, de aplicación no industrial, el cual pese a sus limitantes, permitió agilizar dicho proceso, al producir una importante cantidad de piezas semejantes y de aplicación indistinta para cada uno de los ejes de la micromáquina de este caso de estudio.

EL proceso de manufactura consistió en generar archivos con extensión DXF, obtenidos del modelador de sólidos, y transferirlos a

código G mediante un convertidor específico incluido con las pequeñas máquinas de control numérico.

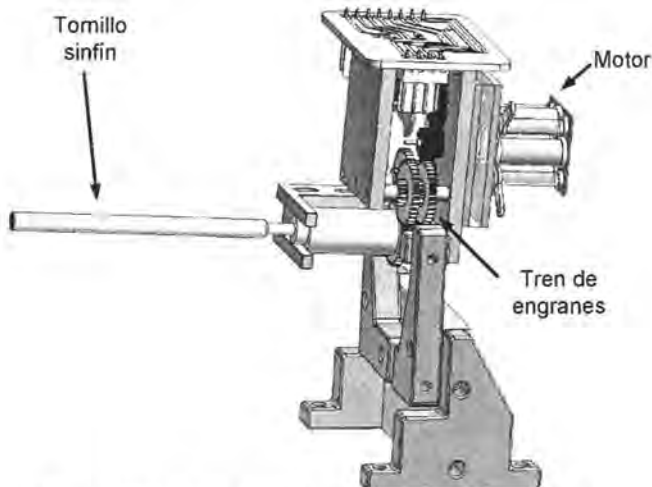


Figura 3.9. Arreglo y componentes del tren motriz.

Este proceso de manufactura permitió dar acomodo en diferentes "placas" a muchas piezas, las cuales, dependiendo de las necesidades para el armado, podrían ser de un mismo tipo o de tipo diferente, figura 3.10. Tras contabilizar el número de piezas empleadas para el armado de la máquina, y el número de diferentes tipos de piezas involucradas, podemos observar que la máquina requiere de 516 piezas totales, las cuales pertenecen a alguna de las 64 piezas diferentes que la integran, incluyendo tornillos y balines.

Control

El sistema de control propuesto para este nuevo prototipo de micromáquina herramienta, consiste en emplear un sistema apoyado en un PIC y software realizado en Visual Basic, los cuales permiten emplear menos puertos dedicados al control e incrementar la capacidad de grados de libertad, y por ende máquinas controladas por este sistema.



Figura 3.10. Proceso de manufactura.

Básicamente se tiene una conexión con la computadora como enlace inicial. Desde ahí es posible ejecutar acciones relacionadas con cada motor, regulando sentido, avance y velocidad. Este sistema permite una retroalimentación, mediante un detector colocado a cada motor. Dicho detector abre la posibilidad de operar cada motor de pasos en dos modos diferentes [22]. El primer modo es a lazo cerrado, en el cual la retroalimentación recibida del detector nos permite contar con información de sincronía, la cual es empleada para operar los motores a altas velocidades de giro, aproximadamente 22,000 rpm. Posteriormente, una vez que nos encontramos en una zona cercana al "punto objetivo", se puede cambiar el modo de operación a lazo abierto, con lo cual el motor se comporta y controla a pasos. En este modo es posible concluir la trayectoria a baja velocidad, un máximo de 4500rpm. Esta nueva manera de operar los motores fue una necesidad derivada de las altas reducciones mecánicas utilizadas en la máquina, las cuales, requieren de tiempos mayores para realizar desplazamientos largos.

Con esta configuración es posible establecer las acciones a realizar por un conjunto de motores, y descargar las instrucciones al PIC, con lo cual se pueden ejecutar rutinas repetitivas sin la necesidad de una conexión de tiempo completo con la computadora, lo cual permitiría trabajar en otras aplicaciones de manera simultánea. El PIC empleado es el PIC18F8720 de la compañía Microchip. En la

figura 3.11 se muestran los circuitos que conforman el sistema de control.

El número máximo de motores que es posible controlar con este nuevo sistema de control es de ocho, duplicando la capacidad de control con una sola PC, y disminuyendo la cantidad de puertos utilizados a solamente uno, con lo que en un futuro podrá controlarse más de una micromáquina herramienta, o bien una micromáquina herramienta y equipos de apoyo, como manipuladores, equipos de transporte, etc. Este conjunto de equipos será denominado como célula de manufactura conformada de microequipo. En la figura 3.12 se muestran imágenes de las pantallas de control.

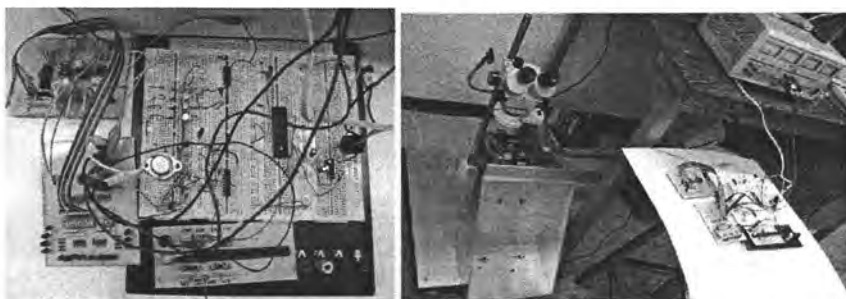


Figura 3.11 Imágenes del sistema de control

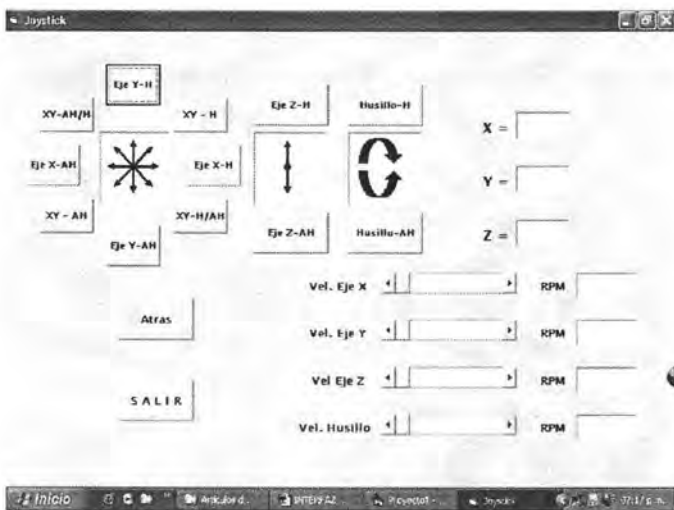


Figura 3.12 Pantalla de control

CAPÍTULO

4

PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los productos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Se muestran imágenes del equipo desarrollado, y también se presentan resultados sobre el comportamiento del mismo.

Descripción del prototipo

El prototipo desarrollado como caso de estudio corresponde a un microcentro de maquinado de primera generación con configuración de palancas y paralelogramos, figura 4.1. Las dimensiones del prototipo son de 236×257×240 mm. sin embargo estas dimensiones pueden reducirse a 180×210×135 mm dado que el prototipo mostrado tiene colocados sus trenes motrices (1) por la parte externa para facilitar tareas de ensamble y desensamble necesarias durante el desarrollo de nuevos prototipos. Principalmente el prototipo se encuentra realizado en latón, y emplea una configuración de paralelogramos (2) para el desplazamiento de sus ejes. Estas configuraciones proporcionan movimientos semicirculares. Para el accionamiento de dichos paralelogramos se emplea un conjunto de tren motriz que consiste en palancas (3), uniones esféricas (4), un cardán (5), un tornillo sinfín (6), un arreglo

de engranes (7) y un motor de pasos (8). Todos los elementos anteriores se repiten en cada uno de los ejes de desplazamiento (X , Y , Z).

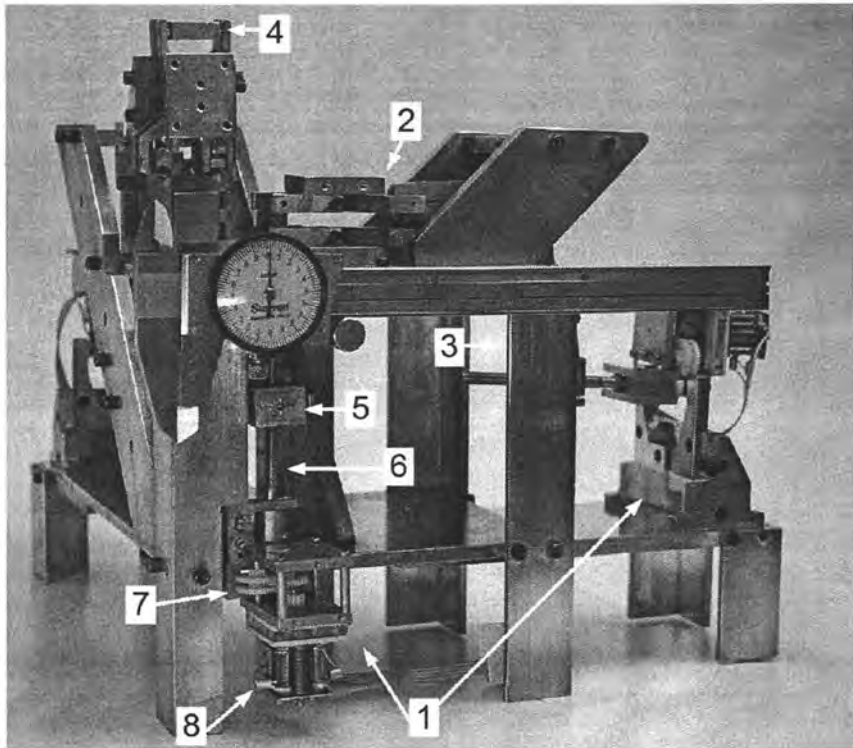


Figura 4.1. Prototipo manufacturado

Pruebas propuestas

Prueba teórica

Con el fin de tener una estimación del posible comportamiento de la micromáquina herramienta, se desarrolló un programa sobre la plataforma de Borland C++ Builder, en el cual se escribieron y solucionaron por métodos numéricos las ecuaciones relacionadas con las trayectorias de los casquetes semicirculares planteadas en las ecuaciones 3.1 a 3.44. Dicho programa arrojó resultados que

servirán para generar tablas de solución en los sistemas de control. El programa básicamente consiste en solucionar las ecuaciones asociadas a los diferentes triángulos formados entre elementos y líneas de referencia (figuras 3.5 y 3.6), mediante la comprobación de errores cuadráticos. Se estiman como condiciones iniciales para el cálculo, aproximaciones de las variables angulares, con las que se comprueban las ecuaciones: al obtener un valor diferente de la comprobación, suma de errores cuadráticos igual a cero, se inicia un proceso de iteraciones en las cuales se varía el valor de únicamente uno de los ángulos, hasta que éste arroja un valor mínimo; una vez que este valor mínimo es hallado, se varía otra de las variables angulares hasta que se encuentre su mínimo, y así de manera sucesiva. Una vez terminado este proceso, se realiza un nuevo ciclo con el fin de afinar los valores obtenidos en las primeras corridas. Un diagrama de flujo para la solución de cada uno de los triángulos contenidos en los diagramas antes mencionados es mostrado en la figura 4.2. Los resultados obtenidos de la aplicación de dicho programa son mostrados en las figuras 4.3a, 4.3b y 4.3c.

El ejecutar este programa nos permitió identificar la importancia de las dimensiones de los elementos mecánicos de unión entre los paralelogramos y las palancas para aprovechar los rangos centrales de movimiento. Los desplazamientos obtenidos a lo largo de las gráficas antes mencionadas, proporcionan información referente al desplazamiento máximo posible, empleando las máximas capacidades que dependen del número de vueltas y de la longitud del tornillo sinfín. Sin embargo es importante aclarar que, por cuestiones de operación y de las dimensiones esperadas en las piezas a manufacturar en esta máquina, emplearemos únicamente las zonas centrales del movimiento, lo cual involucra piezas no superiores a la especificación, 5mm. La información obtenida de estas gráficas permitirá construir tablas de control a fin de linealizar los movimientos generados por los elementos mecánicos, previa comprobación con datos obtenidos de movimientos reales de la máquina. La construcción de estas tablas consiste en determinar posiciones específicas dentro del volumen de trabajo, y asociarlas con posiciones angulares de cada una de las barras.

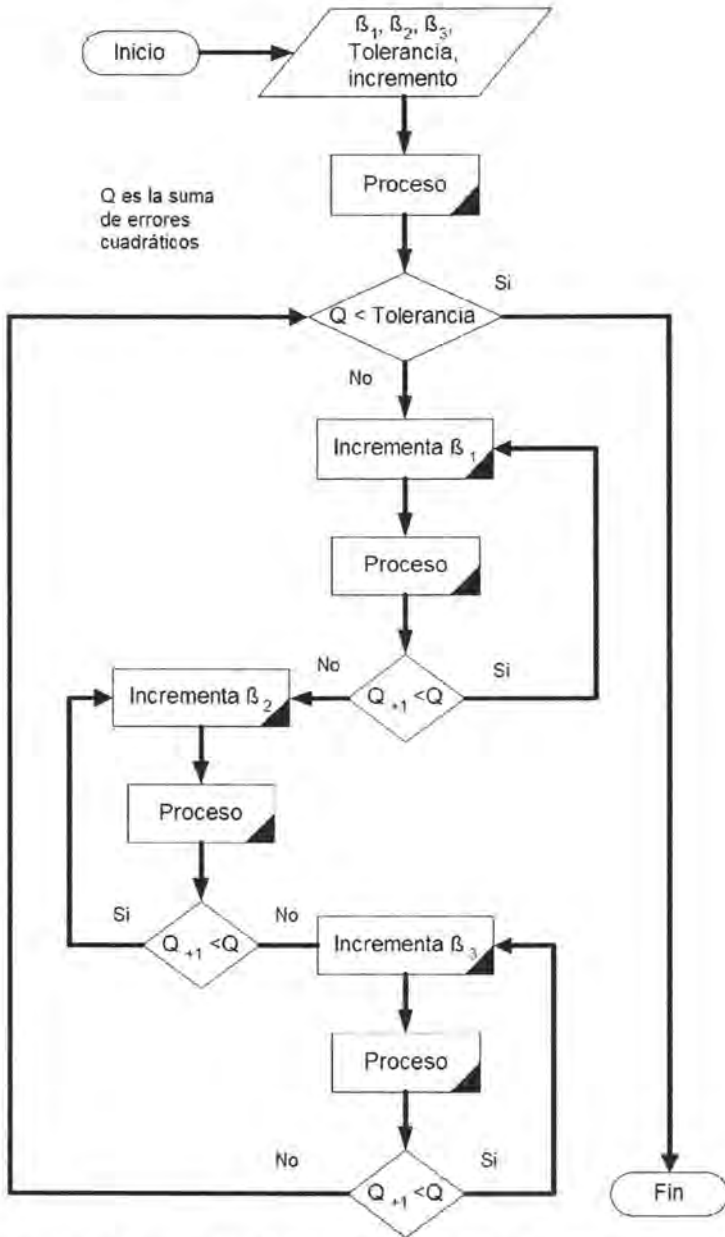
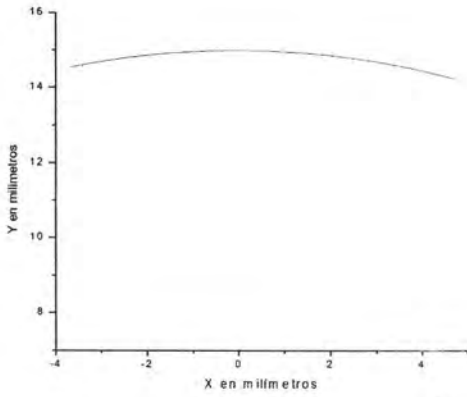
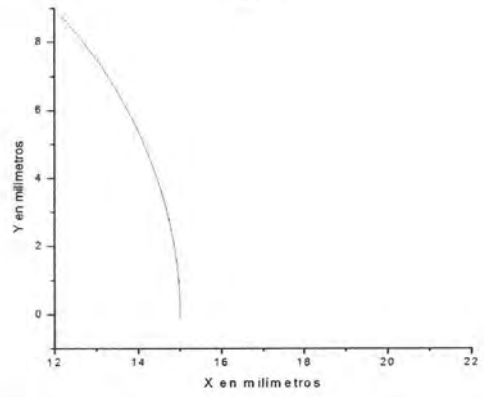


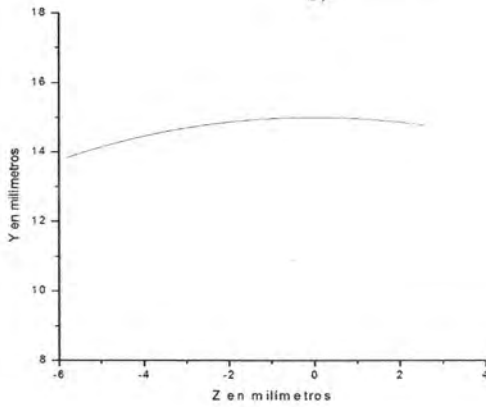
Figura 4.2. Diagrama de flujo del programa de solución de casquetes circulares.



a)



b)



c)

Figura 4.3. Curvas obtenidas con el programa de solución de casquetes circulares.

Pruebas experimentales

Para realizar una primera evaluación del comportamiento de la máquina, se implementó un arreglo, figura 4.4, que consiste en una plataforma de soporte (1), una cabeza de microscopio óptico (2), un sistema de iluminación (3), y una cámara (4). Adicionalmente y sobre la máquina, se construyó un dispositivo de posicionamiento basado en un barreno con dimensiones conocidas (5) que permite su identificación mediante el alto contraste.

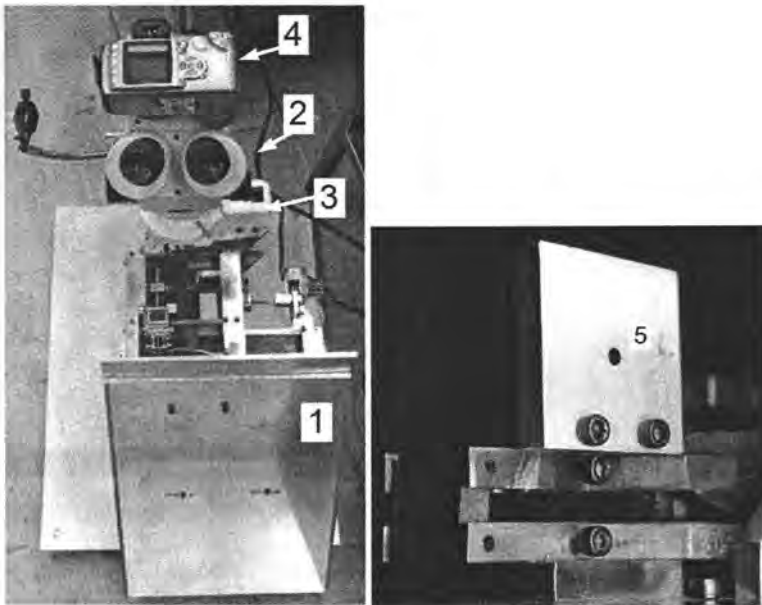


Figura 4.4. Arreglo del sistema de evaluación.

El proceso de medición consiste en aplicar una fuente de luz desde la parte superior, sobre un barreno de dimensiones conocidas que cuenta con una caja negra tras de él. Con la ayuda de una cámara montada en la cabeza del microscopio, es posible magnificar y capturar dicho barreno en imágenes, asociadas a diferentes posiciones de los mecanismos que describen el movimiento esperado de los desplazamientos del barreno antes descrito. Posteriormente y dado el alto contraste planteado en el dispositivo, barreno negro sobre superficie clara, es posible procesar las imágenes con el fin de obtener el centro del barreno con lo cual, entre una imagen y otra se

puede calcular los desplazamientos que existe en relación de píxeles entre los centros del barreno en diferentes posiciones.

El procesamiento de la imagen consiste básicamente en calcular el centro del área definida por el barreno mediante los valores de brillo y contraste que se obtienen como información de los píxeles que conforman la imagen. Un diagrama de flujo del algoritmo para el tratamiento de las imágenes es mostrado en la figura 4.5.

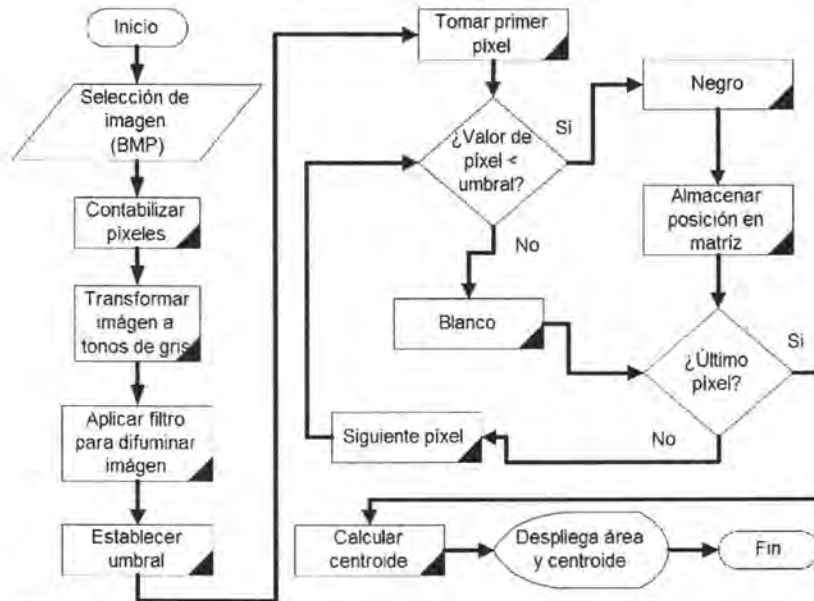


Figura 4.5. Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento de imágenes.

Para el posicionamiento de la máquina en estas pruebas, fue necesario diseñar una plataforma de soporte que permite tener una visión de los movimientos de los carros sin que se aprecien las variaciones generadas por altura, debido al movimiento de los casquetes circulares. Para hacer esto se decidió colocar de manera vertical la adquisición de imágenes, con el objetivo de no alterar la apreciación del barreno debido a la altura. El sistema propuesto puede verse en la figura 4.4. Este dispositivo de sujeción permite rotar la máquina de manera que no es necesario desmontarla para hacer las evaluaciones de los ejes X , Y y Z .

El proceso de análisis consiste en hacer avanzar diferentes cantidades de pasos un eje. Los desplazamientos conseguidos con dichos avances, en diferentes zonas de ese eje, nos permite estimar una resolución promedio de la máquina. Adicionalmente se propone hacer avanzar y regresar un número fijo de pasos al eje antes mencionado, lo anterior con la finalidad de aproximar un valor de juego mecánico.

Resultados

Caracterización

Para conocer el valor de desplazamiento asociado con cada pixel, fue necesario realizar algunas pruebas previas de caracterización. Estas pruebas relacionan valores dimensionales del barreno con píxeles. En el laboratorio de Metrología del CCADET, con la ayuda de un proyector de perfiles, se realizaron siete mediciones relacionadas al diámetro del barreno. En la figura 4.6 se muestra el barreno de referencia, fotografiado con la ayuda de un estereoscopio y una cámara reflex de fotografía digital marca Canon de 6.0 Megapíxeles.



Figura 4.6 Vista de un barreno de referencia en aluminio.

Evaluación de resultados

Con los resultados obtenidos de medir en diferentes ocasiones el diámetro de un barreno de referencia, y con la ayuda de un programa desarrollado, fue posible relacionar valores dimensionales (micrómetros), con valores de imagen (pixel) relativos al sistema

óptico y fotográfico. Una vez conocido el valor geométrico del diámetro del barreno de referencia, se empleó el programa para obtener un valor de área en píxeles, de este valor se calculó el diámetro en píxeles. El valor obtenido de dicha relación es de 1.862 micrómetros por píxel, con este valor fue posible calcular los desplazamientos obtenidos en virtud de las variaciones en píxeles de la posición del centroide.

El ejercicio de medición realizado, incluyó una serie de pruebas en las cuales se ejecutaban desplazamientos específicos –en pasos de motor–, se fotografiaba el barreno de referencia, se calculaba la posición del centroide, se estimaba la distancia en píxeles entre la posición anterior y nueva del centroide, y con ayuda de la relación micrómetros por píxel y el número de pasos; se obtenía la resolución. Los resultados son mostrados en la tabla 4.1.

Punto	Pasos de Motor	Desplazamiento en Píxeles	Desplazamiento en Micrómetros	Resolución Micrómetros por paso	Promedio Micrómetros por paso
P0	0				0.596
P1	100	30.308	55.805	0.558	
P2	100	34.837	64.168	0.642	
P3	100	31.067	57.250	0.572	
P4	33	9.939	18.319	0.555	
P5	100	30.827	56.844	0.568	
P6	100	32.856	60.595	0.606	
P7	100	32.400	59.733	0.597	
P8	33	10.865	20.040	0.607	
P9	100	31.574	58.240	0.582	
P10	100	31.300	57.779	0.578	
P11	100	31.293	57.785	0.578	
P12	33	10.307	19.037	0.577	
P13	100	32.695	60.367	0.604	
P14	100	31.607	58.344	0.583	
P15	100	33.775	62.358	0.624	
P16	200	63.535	117.354	0.587	
P17	200	66.445	122.693	0.613	
P18	200	66.264	122.275	0.611	
P19	250	85.922	158.443	0.634	
P20	250	82.715	152.435	0.610	
P21	250	85.306	156.937	0.628	

Tabla 4.1 Resultados de desplazamiento.

Con lo anterior es posible intuir una resolución dada por cada paso de avance del motor. La resolución promedio fue de 0.596 micrómetros, que comparada con el valor teórico de 0.534 micrómetros nos proporciona una variación aproximada del 11%.

Se realizó también una prueba para estimar el valor de juego mecánico, realizando avances en diferentes sentidos de una misma dirección, con esta prueba se detectó que la máquina pierde valores cercanos a los 20 μ m en cambios de sentido que pueden ser atribuibles principalmente al *backlash*.

Con una serie de pruebas ejecutadas, se generó la curva mostrada en la figura 4.7, esta curva contiene puntos descritos por la trayectoria del barreno de referencia montado sobre uno de los ejes. Dichos puntos son los marcados en la tabla 4.1.

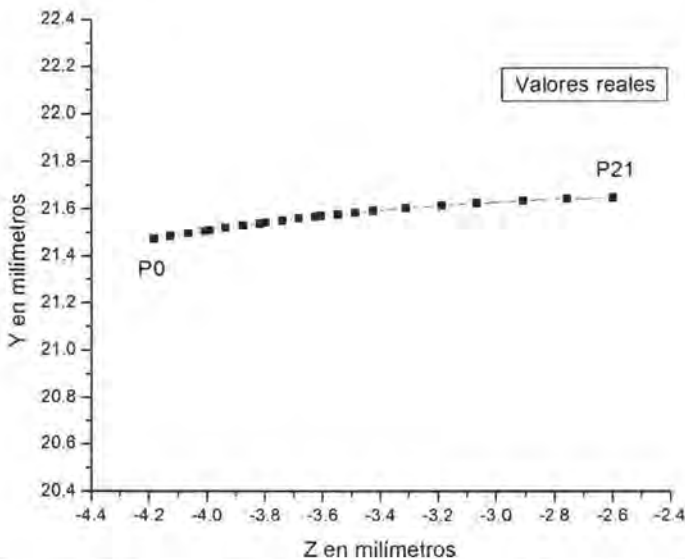


Figura 4.7. Trayectoria formada con puntos reales del prototipo.

De lo anterior, y tras obtener el centro de la circunferencia descrita por estos puntos, se puede concluir que el prototipo presenta trayectorias circulares como las supuestas en el modelo matemático planteado. Las diferencias obtenidas en las gráficas, radican en que el modelo matemático hacía referencia a un punto colocado sobre

una de las barras, figura 3.5, mientras que los resultados mostrados en la figura 4.7 son de un barreno colocado como se muestra en la figura 4.8. Puede concluirse que en ambos casos se forman los casquetes circulares.

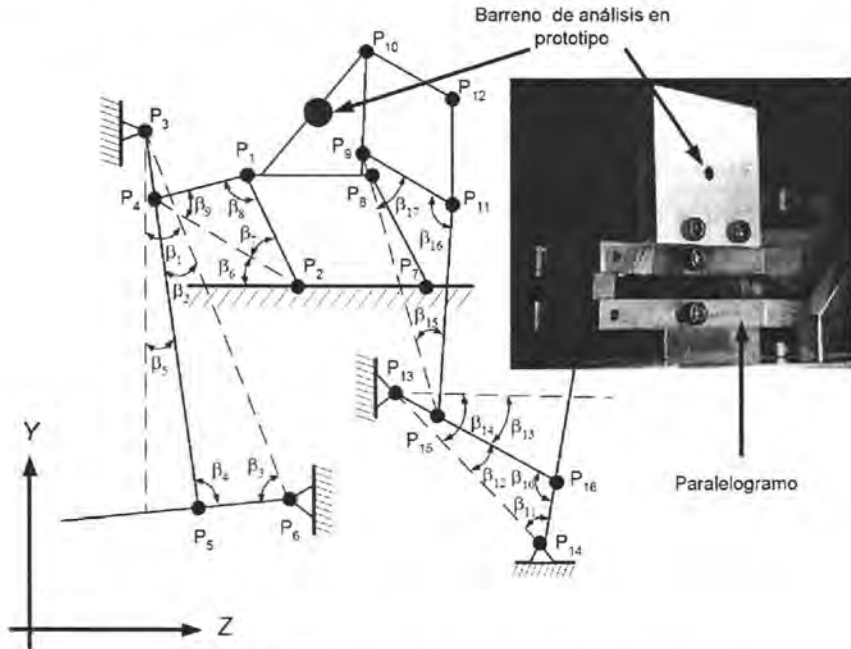


Figura 4.8. Posición del barreno en el prototipo.

Ventajas y desventajas del sistema

Mecanismo

Este mecanismo presenta importantes ventajas relacionadas con la facilidad de manufactura, ensamble y posibilidades de compactación para el desarrollo de microequipo. Adicionalmente conserva la ventaja de mantener un bajo costo relacionado con el uso de materiales y procesos de fabricación. Se encuentra también una importante flexibilidad asociada con el uso de elementos que absorben variaciones generadas con los procesos de manufactura empleados. La posibilidad de aminorar los problemas mecánicos

obtenidos antes del elemento palanca, y escalarlos al momento de transmitirlos hacia los elementos paralelogramos, figura como la principal ventaja. Cabe destacar la importancia que presenta el manejar únicamente 64 piezas diferentes para crear una micromáquina herramienta, sin incluir el eje rotacional.

Como desventaja principal del sistema puede mencionarse que la configuración y diseño utilizados emplean una gran cantidad de elementos de unión (esferas y tornillos), lo cual puede generar problemas por debilitamiento entre partes tras algún tiempo de uso. Este problema es resuelto mediante la incorporación de elementos de ajuste. Adicionalmente, los problemas asociados con el control y posicionamiento de sistemas con desplazamientos en forma de casquetes circulares requieren de un mayor tiempo de investigación y desarrollo.

En resumen, se presenta un sistema novedoso dentro del campo de las micromáquinas herramienta, que es no convencional en sistemas de mayores dimensiones, que presenta facilidad de escalamiento y la posibilidad de manejar resoluciones inferiores a una micra sin mayores dificultades. En contraparte, los elementos de control y cuidado de ensamble de elementos deben ser atendidos con mayor detalle.

Sistema de evaluación

Para el sistema de evaluación propuesto se destaca la importancia que presenta su simplicidad de manejo, su facilidad de adaptación, la posibilidad de trabajar con resoluciones submicrométricas al manejar fracciones de pixel, así como su capacidad de incrementar el número de píxeles asociados con cada referencia en virtud del sistema de adquisición de imágenes y de la óptica empleada que es muy útil cuando se habla de escalar el sistema de evaluación en conjunto con las generaciones de microequipo planteadas.

Como desventaja para el sistema de evaluación se puede reconocer la variabilidad que el sistema puede mostrar ante irregularidades de superficie o iluminación. Es posible realizar correcciones a estos problemas mediante el desarrollo de filtros especializados que

pueden discriminar dichas alteraciones; sin embargo los problemas asociados con la óptica, a fin de obtener imágenes de buen tamaño y calidad requieren de especial atención y tratamiento. El crecimiento del tamaño de la imagen analizada aminora los problemas asociados con defectos por captura.

En resumen se presenta un sistema de evaluación de posición novedoso dentro del campo de la micromecánica, en el que es posible mejorar y robustecer mediante la inversión en tiempo de programación y realizando mejoras al sistema óptico, de iluminación y de adquisición. Este sistema mantiene la línea de trabajo de bajo costo, en comparación con sistemas comerciales que pueden medir con resoluciones inferiores a la micra en desplazamientos de 6mm, a un costo de \$2000 usd por eje.

Costo

El costo en materiales del microcentro de maquinado basado en palancas y paralelogramos, presentado en este trabajo, es de \$110usd.

Al momento de presentar este trabajo existen diferentes opciones de máquinas para micromaquinados tridimensionales, algunas de las cuales ya se encuentran en el mercado.

Dos de las cuales son:

CNC High Precision Micro Milling and Drilling Machine, Kern 2522. Este equipo cuenta con 250mm de desplazamiento por eje, tres ejes de movimiento, una resolución de 100nm, y un costo de €120,000. Para su instalación se requiere de un área aproximada de 4 metros cuadrados y dos metros de altura. Figura 4.9.

Ultra Small CNC Precision Lathe, MTS2, NanoWave, Nano Corporation. Este equipo cuenta con un tamaño de 150mm por 100mm, una longitud máxima de torneado de 10mm y una resolución de 200nm. El costo del equipo es de \$35,000 usd, Figura 1.16 del capítulo 1.



Figura 4.9. Equipo para micromaquinado de la compañía Kern.

Como puede apreciarse, el costo de dichos equipos excede en varios órdenes de magnitud el costo en materiales del prototipo presentado. Es de suponerse que únicamente en producciones muy grandes el costo en materiales puede representar el costo final de venta, sin embargo la selección de procesos convencionales de manufactura y el uso de sistemas económicos para el control y evaluación, permite estimar que el costo final de venta del producto pudiera verse incrementado en un orden de magnitud, con lo que en comparación con el par de ejemplos citados, representa la opción que ofrece la mejor relación costo beneficio.



CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

Aquí se analizan los resultados obtenidos y se propone trabajo a futuro dentro de esta línea de investigación.

Conclusiones

Se presenta el estado del arte en el desarrollo de microequipo al momento de presentar este trabajo. Se menciona el marco tecnológico y se enumeran algunos casos relacionados con mecánica clásica aplicados a microequipo. Con dicho marco es posible estimar que el desarrollo de microequipo de bajo costo es viable. Con base en la experiencia que se tiene en el desarrollo de microequipo, se propusieron algunas recomendaciones de diseño que son la base para el desarrollo de nuevos productos dentro del ámbito de la micromecánica de bajo costo. Adicionalmente, se desarrolló un caso de estudio de microcentro de maquinado de bajo costo apoyado en un sistema de palancas y paralelogramos. El costo en materiales de dicho equipo es de \$110usd. Este equipo posee una resolución teórica de medio micrómetro, y un volumen de trabajo definido por casquetes circulares en virtud de la configuración. Para realizar una evaluación del comportamiento de la máquina se desarrolló un programa basado en el reconocimiento de centroides en patrones de

imágenes tomadas a un barrenó de referencia en la micromáquina herramienta. Con ayuda de este programa se realizaron rutinas de movimiento en la máquina con el fin de conocer su resolución. Los resultados obtenidos con este programa arrojan que la micromáquina basada en la configuración de paralelogramos y palancas presenta una resolución de 0.596 micrómetros con lo que se concluye que cumple de manera satisfactoria con las especificaciones de diseño de la misma.

Las aportaciones específicas de esta tesis son:

- Propone un marco de referencia para el desarrollo de microequipo de bajo costo.
- Propone recomendaciones de diseño relacionadas con el desarrollo de microequipo de bajo costo.
- Presenta la viabilidad de desarrollar microequipo como una secuencia de generaciones.
- Propone un mecanismo con buena resolución basado en sistemas de barras y paralelogramos.
- Aplica una metodología desarrollada en el laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica para la evaluación de microequipo de bajo costo.
- Realiza una evaluación de las ventajas y desventajas del sistema.

Recomendaciones

Apoyado en los resultados obtenidos y presentados en este trabajo de tesis, se recomienda continuar con las investigaciones relacionadas con microequipo de bajo costo. Se considera un campo tecnológico en que México se encuentra a la par en relación con países tecnológicamente más avanzados. Se recomienda aplicar esfuerzos en las áreas de diseño especializado, procesos de manufactura adecuados, técnicas de caracterización, y teoría de control.

Se propone realizar cambios en elementos que no se encuentran dentro de los estándares de manufactura del resto de los componentes, específicamente hablando de los tornillos sinfin, los

cuales no se desarrollaron con las máquinas, ni con las herramientas deseadas por lo que presentan un maquinado mejorable. Adicionalmente se recomienda realizar pruebas incluyendo resortes entre la palanca y el sinfín, con el fin de aminorar las mediciones de juego entre partes encontradas en estas primeras pruebas.

En lo referente al sistema de medición, se recomienda realizar profundas pruebas de calibración y obtener las variaciones generadas por el sistema de iluminación y se sugiere explorar su aplicación a la caracterización de vibraciones

Trabajo a futuro

Una vez realizadas las pruebas aquí mostradas, se observó la necesidad de trabajar sobre un proceso de caracterización mucho más profundo, el cual incluya: un análisis del comportamiento de cada eje, el desplazamiento de ejes de manera simultánea, análisis de la rigidez de la máquina, y del comportamiento de la ortogonalidad de los ejes. Esta caracterización será la base para sistemas de control mucho más avanzados y especializados al tipo de movimiento que es generado por la máquina,

Adicionalmente, el desarrollo de nuevos módulos, como es el sistema de sujeción de materia prima automatizado, se percibe como un desarrollo necesario. El eje rotacional para este prototipo, inicialmente se propuso como una copia del prototipo del año 2000. Sin embargo actualmente se trabaja en un nuevo sistema que incluye elementos que permiten la alimentación automática de materia prima,

Finalmente la interconexión entre diferentes equipos se aprecia como una característica deseable, para obtener la primer microfábrica mexicana. Trabajos relacionados con manipuladores para servicio a micromecánica, desarrollados en el propio laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica, se manufacturan mientras este trabajo es presentado, por lo que pronto se mostrarán resultados en esta área también.

Teniendo como meta la continuidad, se propusieron los elementos del tren motriz como módulos. Esta alternativa permite que dicha

propuesta se aplique en diferentes dispositivos desarrollados en el laboratorio, y en un futuro próximo se presente este mismo diseño de micromáquina herramienta pero perteneciente a la segunda generación. Para este nuevo prototipo será posible implementar los mismos módulos de tren motriz a un prototipo de menores dimensiones, evitando así el desarrollo de un módulo especial para dimensiones más pequeñas.



REFERENCIAS

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

- [1] Trimmer, W. S.; Micromechanics and MEMS, Classic and Seminal Papers to 1990; IEEE; 1997.
- [2] Handbook of Sensors and Actuators, Micro Mechanical Systems. Principles and technology. Ed. by T. Fukuda, W.Menz, ELSEVIER, 1998.
- [3] Ishikawa Yu., Kitahara T. Present and Future of Micromechatronics. 1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.13-20.
- [4] E Kussul, D Rachkovskij, T Baidyk and S Talayev 1996 Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment J. Micromech. Microeng. 6 410-425.
- [5] <http://www.mems-exchange.org/MEMS/applications.html>.
- [6] Takayuki Hirano, Future Prospect of Micromachine, Marina Congress Center, Helsinki, Finland, 1997.
- [7] MicroMachine Center, Application of Micromachine Technology (II), MicroMachine Magazine, varios números, Japón (<http://www.nmmc.or.jp/magazine.htm>).

[8] Okazaki, Kitahara: Micro-machine tool to machine micro-parts, Proc. ASPE Annual meeting 2000.

[9] E.M.Kussul, L.M.Kasatkina. Los problemas de desarrollo de máquinas herramientas controladas con computadora para fábricas micro mecánicas sobre mesa. // Sistemas de control y computadoras, 1998, N5, V.28, pp.32-39.

[10] Nozomu Mishima, Microfactory Project, M4 Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing, May 16 - 17, 2000, NORTHWESTERN UNIVERSITY Evanston, IL, USA.(<http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Mishima/index.htm>).

[11] Ito, S.; Iijima, D.; Hayashi, A. , Aoyama, H. , and Yamanaka, M. ,Micro Turning System: A Super Small CNC Precision Lathe for Microfactories, proceedings of ASPE's (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting, pp295-298, USA,2002.

[12] Yu-Chong Tai, MEMS Manufacturing at The Caltech Micromachining Lab, M4 Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing, May 16 - 17, 2000, NORTHWESTERN UNIVERSITY Evanston, IL, USA.(<http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Tai/index.htm>).

[13] M.Tanaka, Development of desktop machining microfactory, RIKEN REVIEW, No. 34, April 2001, japan.

[14] <http://www.olympus.co.jp/Special/OTF80/mifaE.html>

[15] Alberto Caballero Ruiz. Caracterización de un microcentro de maquinado de bajo costo, División de estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería. 2000. Maestría. Ingeniería mecánica.

[16] Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina L., Baydyk T. CNC Machine Tools for Low Cost Micro Devices Manufacturing,- Proc. of First Int. Conf. on Mechatronics and Robotics (M&R'2000), Saint-Petersburg, May 29-June 2, 2000, Vol.1. - pp. 98-103.

- [17] Trimmer W.S.N. Microrobots and micromachanical systems. In: Sensors and Actuators. 19 (1989), p.267-287.
- [18] Feynman, Richard P. There's Plenty Of Room At The Bottom. (California Inst of Technol, Pasadena, CA, USA) Source: *Journal of Microelectromechanical Systems*, v 1, n 1, Mar. 1992. p 60-66.
- [19] Leopoldo Ruiz Huerta. Diseño y Construcción de un microcentro de bajo costo. División de estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, 2000. Maestría. Ingeniería mecánica.
- [20] RUIZ, L., KUSSUL, E., CABALLERO, A., (2002) GUIDE LINES FOR LOW COST MICROMECHANICS. En ASPE XVII ANNUAL MEETING, (Eds.), St. Louis, Missouri. pp.228-233
- [21] Marín-Aguilar, E.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Kussul, E.; LA CONFIGURACIÓN MODULAR COMO UNA APORTACIÓN AL DESARROLLO DE MICROMÁQUINAS HERRAMIENTA DE BAJO COSTO, Revista Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, 2004, México.
- [22] Carlos Alberto Muñoz Leines, César Augusto Santos Carrasco, "EMPLEO DE FPGA's PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE MOTORES DE PASOS BIMODALES EN MICROMECAÁNICA", Tesis de Licenciatura, Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2003.
- [23] Caprari G., Balmer P., Piguert R., Siegart R. The Autonomous Micro Robot "Alice": a Platform for Scientific and Commercial Applications. //International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998, pp. 231-235.
- [24] Cross, N; Engineering Design Methods; John Wiley & Sons; 1994
- [25] 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.
- [26] Fujita H. Microactuators and Micromachines. // Proceedings of the IEEE, VOL.86, 1998, N8, pp 1721-1732.

- [27] Fukuda, T.; Micro Mechanical Systems, Principles and Technology; ELSEVIER; 1998.
- [28] Hayashi I., Iwatsuki N. Micro Moving Robotics. //International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998, pp. 41-50.
- [29] Ishihara H., Arai F., Fukuda T. Micro Mechatronics and Micro Actuators. //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996, V.1, pp68-79.
- [30] ISO Standard Handbook 5, Machine Tools; ISO; 1987.
- [31] 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.
- [32] E. Kussul, T. Baydyk, L. Ruiz, A. Caballero, G. Velasco, L.Kasatkina. DEVELOPMENT OF MICROMACHINE TOOL PROTOTYPE FOR MICROFACTORIES, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 12 No. 6, año 2002, pp. 795-812, UK.
- [33] Kussul E.M. Micromechanics as a New Area of Neural Network Applications. //EUFIT'97, 1997, vol.1, pp 521-523.
- [34] Kussul E.M., Bajdyk T.N., Rachkovskij D.A., Talayev S.A. The Method of Micro Devices Manufacturing. //Russian Patent N 2105652.
- [35] 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.
- [36] 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

- [37] Mazuzawa T. An Approach to Micromachining through Machine Tool Technology. //Proc. 2nd Int. Symp. Micro Machine and Human Science (Nagoya, Japan), 1991, pp 47-52.
- [38] P.Rai-Choundhury; Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication; SPIE Press, 1997.
- [39] Plauger, P.J.; Standard C; Microsoft Press; 1989.
- [40] 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.
- [41] Some Micro Machine Activities in Japan. //Report ATIP96.021, 1996.
- [42] Weck, Manfred; Handbook of Machine Tools; Vol. 1, 2 y 3; John Wiley & Sons; 1984.
- [43] 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.
- [44] Yamagata Y. and Higuchi T. Four Axis Ultra Precision Machine Tool and Fabrication of Micro Parts by Precision Cutting Technique. //Proc. 8th Int. Precision Engineering Seminar (Compiègne, France) 1995, pp.467-470.
- [45] Nelsimar Vandelli, Donald Wroblewski, Margo Velonis, and Thomas Bifano, Development of a MEMS Microvalve Array for Fluid Flow Control, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 7, NO. 4, DECEMBER 1998, pp 395-403
- [46] Iijima D., Ito S., Hayashi A., Aoyama H., Yamanaka M., MICRO TURNING SYSTEM 3 (MTS3): A PRACTICAL CNC LATHE FOR MICROFACTORIES, IWMF04 International Workshop on Microfactories 2004, Shanghai, China, Vol. 1, pp 50-55.
- [47] Daniel Cox, Glynn Newby, Hyung Wook Park, Steven Y. Liang. PERFORMANCE EVALUATION OF A MINIATURIZED MACHINING CENTER FOR PRECISION MANUFACTURING. IMECE2004-60431.

Proceedings of IMECE040, 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 13-20, 2004, Anaheim, California USA.

[48] Micromachine Magazine, Micromachining Center, No. 41, agosto 2003, Japón.

[49] Nicoud J-D, Microengineering: When is small too small?, Nanoengineering: when is large too large?, Proceedings 6th Symposium Micromachine and Human Science, Nagoya, Japón, 1995.

[50] Guckel H, Skrobis K J, Chistenson T R, Klein J, Han S, Choi B, Lovell EG and Chapman T W, Fabrication and testing of the planar magnetic micromotor, Journal of Micromechanics and Microengineering, 1991



ANEXOS

Aquí se coloca una relación de publicaciones generadas como resultado de este trabajo de doctorado

Artículos en revistas con arbitraje de circulación internacional

ENVIADOS PARA SU ARBITRAJE

1. L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Ascanio, T. Baidyk, E. Kussul, A PARALLELOGRAM MICROMACHINE FOR LOW-COST MICROMECHANICS, enviado al Journal of Micromechanics and Microengineering, UK.
2. Alberto Caballero-Ruiz, Leopoldo Ruiz-Huerta, Tatyana Baidyk, Graciela Velasco-Herrera, Ernst Kussul, METHOD TO DETERMINE GEOMETRICAL ERRORS IN A CNC MICROMACHINE TOOL, enviado al Journal of Micromechanics and Microengineering, UK.

PUBLICADOS

1. T. Baydyk, E. Kussul, E. Makeyev, L. Ruiz, A. Caballero, G. Carrera, G. Velasco, FLAT IMAGE RECOGNITION IN THE PROCESS OF MICRODEVICE ASSEMBLY, Journal of Pattern Recognition Letters, Vol. 25 No. 1, año 2004, pp. 107-118, UK.

2. E. Kussul, T. Baydyk, L. Ruiz, A. Caballero, G. Velasco, L. Kasatkina, DEVELOPMENT OF MICROMACHINE TOOL PROTOTYPE FOR MICROFACTORIES, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 12 No. 6, año 2002, pp. 795-812, UK.

Artículos en revistas con arbitraje de circulación nacional

1. Marín-Aguilar, E.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Kussul E., La Configuración Modular como una Aportación al Desarrollo de Micromáquinas Herramienta de Bajo Costo, Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, INGENIERÍA MECÁNICA, TECNOLOGÍA y DESARROLLO, Vol 1, num 5 año 3, septiembre 2004, pp 182-187.
2. KUSSUL, E., RUIZ, L., CABALLERO, A., BAYDYK, T., VELASCO, G., Kasatkin, O., Kasatkina, L., CNC Machine Tools for Low Cost Microdevices Manufacturing. Journal of Applied Research and Technology, Vol 2, Número 1, April 2004 pp 76-91.

Capítulos en libros especializados

1. Felipe Lara-Rosano, Ernst Kussul, Tatiana Baidyk, Leopoldo Ruiz, Alberto Caballero, and Graciela Velasco, 2004, Artificial Intelligent Systems in Micromechanics, Artificial Intelligent Applications and Innovations, Kluwer Academic Publishers, USA, pp.1-10.
2. Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., Velasco G., 2002, CNC Micromachine Tool: Design & Metrology Problems, in: Advances in Systems Theory, Mathematical Methods and Applications, A.Zemliak, N.Mastorakis (ed.). Greece, WSEAS Press, pp. 93-97.

Memorias en extenso arbitradas en congresos internacionales

1. L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, E. Marín-Aguilar, G. Velasco, T. Baydyk and E. Kussul Parallelogram Micromachine For Low Cost Micromechanics, aceptado para publicarse en el ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, 2004, a celebrarse del 13 al 19 de noviembre en Anaheim, California, USA. IMECE2004-62186.
2. L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Ascanio, T. Baydyk and E Kussul, IN THE WAY TO THE SECOND GENERATION OF MICROEQUIPMENT, aceptado para publicarse en el IWMF04 4th International Workshop on Microfactories, Shangai, China, 15-17 octubre 2004. pp. 86-91.
3. Caballero-Ruiz A., Ruiz-Huerta L., T. Baidyk1, Ascanio G., Heredia F, Alvarez F., Kussul E.1, IN AN APPLICATION OF MICROMECHANICS: MICRODRIVE TO AUTOMATE EXTRACELLULAR STUDIES OF NEURAL RESPONSE IN RATS, aceptado para publicarse en el IWMF04 4th International Workshop on Microfactories, Shangai, China, 15-17 octubre 2004.
4. KUSSUL, E., BAYDYK , T., RUIZ, L., CABALLERO, A., VELASCO, G., (2002) Development of Lowcost Microequipment. En 2002 IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya Municipal Industrial Research Institute (Eds.), Nagoya, Japan. pp.125-134.
5. RUIZ, L., KUSSUL, E., CABALLERO, A., (2002) GUIDE LINES FOR LOW COST MICROMECHANICS. En ASPE XVII ANNUAL MEETING, (Eds.), St. Louis, Missouri. pp.228-233.
6. CABALLERO, A., RUIZ, L., KUSSUL, E., BAYDYK , T., VELASCO, G., (2002) MICROMACHINE TOOL: MEASUREMENT AND CONTROL. En 17TH Annual Meeting ASPE (American Society for Precision Engineering , (Eds.), St. Louis, Missouri, USA. pp.377-382., 2002

7. L. Ruíz-Huerta: BASIS FOR MICRO-FACTORY: CNC MICRO-MACHINE TOOLS: ASPE (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting; Criytal City, Virginia, Washintong DC, USA; pp. 513-516; ISBN 1-887706-27-5, 2001

Memorias en extenso arbitradas en congresos nacionales

1. H. Silva, A. Caballero, L. Ruíz, E. Kussul, 2004, SISTEMA DE CONTROL PARA MICROMAQUINAS HERRAMIENTA BASADO EN UN MICROCONTROLADOR PIC, Congreso SOMI XIX, Pachuca Hidalgo., México, 25-29 octubre.
2. Kussul E., Baydyk T., RUIZ, L., Caballero A., Velasco G., "Correlaciones entre el tamaño de microequipo y su precisión". En SOMI XVIII Congreso Nacional de Instrumentación, (Eds.), México, D.F., México., 2003
3. Kussul E., Velasco G., Baydyk T., RUIZ, L., Caballero A., "Cinemática de un microcentro de maquinado". En SOMI XVIII Congreso Nacional de Instrumentación, (Eds.), México, D.F., México., 2003
4. RUIZ, L., Kussul E., Caballero A., "Herramienta de diseño para micromecánica". En SOMI XVIII Congreso Nacional de Instrumentación, (Eds.), México, D.F., México, 2003.
5. RUIZ, L., "Desarrollo de Microequipo Mecánico para Células de Manufactura". En SOMI XVII Congreso Nacional de Instrumentación, (Eds.), Mérida, Yucatán, México, pp.17LRH143, 2002.
6. RUIZ, L., KUSSUL, E., CABALLERO, A., SANTOS, C., MUÑOZ, C., "DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR FUERZAS DE ADHERENCIA EN MICROPIEZAS", En SOMI XVII Congreso Nacional de Intrumentación, (Eds.), Mérida, Yucatán, México, pp.17LRH141, 2002.

7. L. Ruiz-Huerta, E. Kussul, "DISEÑO DE UN MANIPULADOR PARA MICROMECAÁNICA, Memoria en CD, SOMI XVI, MEC 4-1. 2001.