

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



T E S I S

CARACTERIZACIÓN DE UN
MICROCENTRO DE MAQUINADO
DE BAJO COSTO

PRESENTADA POR:

ALBERTO CABALLERO RUIZ, ING.

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA
(ÁREA MECÁNICA)

DIRIGIDA POR:

DR. ERNST KUSSUL
DR. SAUL SANTILLÁN GUTIÉRREZ

283072

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE, 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Este trabajo se desarrolló en el Centro de Instrumentos UNAM con la tutoría del Dr. Ernst Kussul, con aportaciones de Ing. Leopoldo Ruiz Huerta y del Dr. Saúl Santillán (Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de ingeniería UNAM). El trabajo fue apoyado por la DGAPA, proyecto IN-118799.

A mis padres Guadalupe y
Margarito

por continuar brindándome su
apoyo incondicional que ha
contribuido en mi desarrollo
personal.

A mis hermanos Víctor y Leonor
por su apoyo y consejos.

A Mayte
por todo.....

A Leopoldo
por su amistad y por su apoyo
durante la realización de este
proyecto.

A Gabriel Ascanio
por su valiosa amistad y su
apoyo en todo momento.... gracias
Doc.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Ernst Kussul por su amistad, asesoría y apoyo que han dado como fruto este trabajo.

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

Agradezco la Dra. Graciela Velasco por ser como es, por su amistad y apoyo incondicional.

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

Al Dr Saúl Santillán por su asesoría, supervisión y tiempo dedicado a este trabajo.

A todos mis amigos que me han acompañado en las buenas y en las malas, y sobre todo, siempre han alimentado mi vida con buenos consejos.

A mis compañeros y amigos del Centro de Instrumentos, que con su apoyo han hecho fructífera mi estancia en este lugar.

A mis sinodales: Marcelo López, Vicente Borja, Ernst Kussul, Saúl Santillán y Leopoldo González por sus comentarios y aportaciones.

A mis maestros de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por transmitirme su valioso conocimiento.

Y por supuesto, a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
Técnicas usadas para el desarrollo de micromecánica	5
Desarrollo en el mundo.....	7
OBJETIVOS Y ALCANCES	14
Objetivo	14
Alcances	14
DESARROLLO	15
Técnicas de caracterización para máquinas herramientas convencionales	15
Técnicas de caracterización para micromáquinas	20
CASO DE ESTUDIO	25
Microcentro de maquinado de bajo costo.....	27
PROPUESTA PARA CARACTERIZAR EL MICROCENTRO DE MAQUINADO DE BAJO COSTO	32
Diseño de pruebas	42
Desarrollo de las piezas de prueba	45
Programa de fabricación de probetas para determinar <i>backlash</i> y resolución máxima de desplazamiento	46
Programa de fabricación de probetas para realizar el análisis geométrico	48
Descripción del equipo utilizado para la realización de pruebas	50
PRUEBAS Y RESULTADOS	51
Resolución real de desplazamiento por paso de motor	52
Backlash	56

Análisis Geométrico	59
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	69
APÉNDICES	73
A. Programa para fabricar probetas	73
B. Datos de lecturas medidas y gráficas	95

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa [varios, Micromachine magazine, 1997].	10
Figura 1.2. Micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy.	10
Figura 1.3. Microrobot de inspección (izquierda); Ejemplo de robot solar de exploración de pequeñas dimensiones (derecha).	11
Figura 1.4. Microgenerador de corriente (izquierda); Microactuador con tres grados de libertad(derecha).	11
Figura 1.5. Micromanipulador [Varios, Micromachine magazine, 1995].	12
Figura 1.6. Microtorno Japonés.	12
Figura 3.1. Características de máquinas herramientas en general.	16
Figura 3.2. Objetivos y métodos para la examinación y evaluación de una máquina herramienta de uso general.	16
Figura 3.3. Procedimiento para la valoración de las características de una máquina herramienta.	17
Figura 3.4. Requerimientos básicos de técnicas para la valoración del desempeño de una máquina.	18
Figura 3.5.Barreno de una unión sin uso (izquierda) y barreno de una juntura con desgaste natural por uso (derecha).	22
Figura 4.1 Vista frontal del microcentro de maquinado desarrollado en el Centro de Instrumentos UNAM.	28
Figura 4.2. Vista posterior del microdentro de maquinado desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM.	29
Figura 4.3. Sistema de control del microcentro de maquinado de bajo costo.	30
Figura 5.1. Esfera para medir posición de inicio del microcentro de maquinado.	35
Figura 5.2. Diagrama de flujo para pruebas de posición inicial.	35
Figura 5.3. Máquina de Medición por coordenadas empleada para las pruebas de posición de origen.	36
Figura 5.4. Palpador haciendo contacto con esfera para medir posición de origen.	37
Figura 5.5. Gráfica de las lecturas de la posición de origen en los tres ejes (X,Y,Z).	38
Figura 5.6. Medición de la magnitud de desplazamiento en la base de la esfera al ocurrir el impacto del palpador con sobre la esfera.	39
Figura 5.7. Imprecisiones de trabajo de una máquina herramienta (factores que influyen de acuerdo a la norma VDI/DGQ 3441).	41
Figura 5.8. Desviaciones en la forma de una pieza cilíndrica.	41
Figura 5.9. Probeta empleada para determinar características posicionales del microcentro de maquinado.	43
Figura 5.10. Microfiltro mecánico.	44
Figura 5.11. Probetas para realizar la inspección geométrica.	44
Figura 5.12. Porta herramientas del microcentro de maquinado.	45
Figura 5.13. Diagrama de flujo para realizar probeta para medir backlash y resolución máxima de máquina.	47
Figura 5.14. Diagrama de flujo del programa para la fabricación de microanillos.	49

Figura 5.15. Comparador óptico NIKON.....	50
Figura 6.1. Probeta empleada para la medición de resolución de desplazamiento.....	52
Figura 6.2. Distancia entre marcas maquinadas en la probeta de latón.	53
Figura 6.3. Desplazamiento por paso de motor.	56
Figura 6.4. Grafica de longitudes para la medición del backlash.	57
Figura 6.5. Medición del diámetro exterior de la base del microanillo.	61
Figura 6.6. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro exterior del micro anillo en su base.....	61
Figura 6.7. Mediciones del diámetro exterior de la parte superior del microanillo.....	62
Figura 6.8. Medición de diámetro del vértice de la superficie cónica del microanillo.....	62
Figura 6.9. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro exterior del micro anillo en su parte superior.	63
Figura 6.10. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro del vértice de la superficie cónica.....	63
Figura 6.11. Medición de la altura de la parte plana del cilindro y de la parte cónica.	64

Índice de tablas

Tabla 1.1 Procesos para la creación de microsistemas y sus características	6
Tabla 1.2. Aplicación de tecnología de sistemas micromecánicos en la medicina [Micromachine Magazine, 1996]	8
Tabla 3.1. Glosario de pruebas aceptadas	19
Tabla 5.1. Mediciones realizadas en la prueba de posición de origen.	37
Tabla 6.1. Resolución de desplazamiento por paso de motor.	53
Tabla 6.2. Desplazamiento por paso de motor.	55
Tabla 6.3. Longitudes para la determinación del backlash.	57
Tabla 6.4. Backlash presentado en el eje “Y” del microcentro de maquinado de bajo costo.....	58
Tabla 6.5 Tabla de mediciones realizadas a las probetas para realizar el análisis geométrico	60
Tabla 6.6. Mediciones promedio obtenidas del análisis geométrico a piezas fabricadas en un microcentro de maquinado.	65
Tabla 6.7. Error por tipo de maquinado.	66

Introducción

Los microsistemas se han convertido en un foco de la investigación a nivel mundial. Los alcances que pueden tener estas investigaciones son de gran valor para el desarrollo de la humanidad debido los usos que se les pueden dar.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la comunidad científica que se dedica al desarrollo de estos sistemas es cómo producir y evaluar este tipo de dispositivos.

En este trabajo se propone un método para evaluar un microcentro de maquinado de bajo costo. El trabajo consta de 5 capítulos.

En el primer capítulo se dan los antecedentes donde se mencionan algunas definiciones que han surgido alrededor de los sistemas micromecánicos, cuales es su estado a nivel mundial, las distintas métodos empleados para su producción y las aplicaciones de estos microdispositivos.

Como siguiente paso se establece el objetivo y los alcances esperados de este trabajo.

En el capítulo dos se mencionan los métodos empleados para la caracterización de máquinas herramientas de tamaño convencional, mencionándose los parámetros que es importante conocer de estos. Como segunda parte de este capítulo se mencionan métodos empleados para caracterizar microdispositivos en general, debido a que no existen métodos estandarizados para este fin.

En el tercer capítulo se da una breve descripción del caso de estudio al cual se le aplicó la caracterización, el cual es un prototipo de microcentro de maquinado de bajo costo.

En el capítulo cuatro se establece la propuesta para la caracterización del microcentro de maquinado de bajo costo, reportando el diseño de pruebas y haciendo una descripción del equipo empleado para la realización de las pruebas.

El capítulo cinco reporta las pruebas y los resultados obtenidos por medio de tablas y graficas. Asimismo se muestra la discusión de los resultados.

Finalmente, en las conclusiones se dan las observaciones de cuáles fueron los resultados alcanzados en este trabajo y las propuestas para futuros trabajos que ayuden al desarrollo de esta línea de trabajo.

Capítulo

1

Antecedentes

Como base del proceso evolutivo de productos, se menciona la compactación. Dentro de esta, se distingue claramente la necesidad de técnicas de producción y maquinaria que se desenvuelva acorde con las nuevas necesidades.

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

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

El desarrollo de sistemas micromecánicos complejos como *MicroMachine Tools* (MMT), micromanipuladores y microrobots, requieren de estructuras mecánicas con las siguientes características:

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

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

Cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales extremadamente pequeñas en un rango de tamaño de 1 a 5mm es llamado micromáquina (Iwao Fijimasa, 1997).

Partiendo de las definiciones anteriores, es claro que éstas no solo están basadas en el tamaño de la máquina, sino también en el tamaño

de sus componentes y, ampliando la definición, en el tamaño de las piezas fabricadas en esta.

Técnicas usadas para el desarrollo de micromecánica

Varias tecnologías emergieron durante el desarrollo de los MEMS, MST y los MMT, siendo estas agrupadas dentro de dos rangos: el primero de ellos se refiere a procesos aplicados de manera individual, y las segundas se refieren a procesos aplicados a lotes o por volumen.

El trabajo de manera individual incluye técnicas como: oxidación térmica, depósito por vapores químicos, evaporación y Sputtering, fotolitografía, etc.. Mientras que las técnicas por lotes o volumen involucran procesos de depósito de material como: LIGA, micromaquinados de superficie, contorneado anódico, etc.. En la tabla 1.1 se ilustran diferentes procesos para la creación de microsistemas.

Todas las técnicas mencionadas en la tabla relacionadas con lotes o volumen son actualmente utilizadas para la fabricación de sistemas electrónicos compactos, tales como circuitos CMOS.

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

TIPO DE PROCESO	CARACTERÍSTICAS
Procesos de Silicio	<ul style="list-style-type: none"> • Combina la litografía y la deposición. • Permite la producción en masa con subensambles. • Sólo permite producir dispositivos en dos dimensiones • Se utiliza para principalmente en fabricación de circuitos integrados, así como también en la miniaturización de partes mecánicas como sensores de presión y de aceleración
Proceso LIGA (Litographie- Galvanoformung- Abformung)	<ul style="list-style-type: none"> • Combina la litografía con rayos "X" suaves, la electrodeposición de películas delgadas y el moldeado. • Permite la manufactura de partes con alta calidad de acabado y producción en masa • Su costo es muy elevado • No permite realizar formas libres en tres dimensiones • Se utiliza en la fabricación de elementos ópticos, filtros y sensores de Aceleración
Proceso Maquinado por Láser	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinado directo o asistido por haz de Láser de electrones o de iones. • Permite maquinados en tres dimensiones.
Proceso EDM (Electro discharge machining)	<ul style="list-style-type: none"> • Combina el molido de cable por electrodescarga y el maquinado por electrodescarga • Permite maquinados en metales con formas en tres dimensiones. • No utiliza contacto para maquinar • Únicamente trabaja con materiales conductores, sin embargo semiconductores como el Silicio pueden ser procesados dependiendo de su conductividad
Fototornado	<ul style="list-style-type: none"> • Polimeriza localmente resina líquida mediante un haz de láser • Permite producir formas en tres dimensiones • No se tiene producción en serie
Inyección de moldes	<ul style="list-style-type: none"> • Inyecta resina líquida o metal y polvo mezclados en moldes • Permite la manufactura y la producción en masa de componentes con formas tridimensionales
Maquinado convencional	<ul style="list-style-type: none"> • Se basa en la remoción mecánica mediante cortadores. • Permite manufacturar piezas en tres dimensiones.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinado electro-químico • Implantación de iones • Maquinado STM, etc.

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

Considerando lo anterior, se utilizó la experiencia de la Ingeniería Mecánica para el desarrollo de técnicas individuales, que vencieran las restricciones antes mencionadas para desarrollar sistemas micromecánicos. Sin embargo, las nuevas técnicas propuestas debían cumplir con una limitante más: su costo de producción.

Es conocido que los sistemas o procesos realizados de forma individual, ofrecen mayores costos asociados con tiempos y movimientos, que todos aquellos procesos que pueden realizarse en grandes volúmenes y en pocos pasos.

Desarrollo en el mundo

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

En el campo de la medicina, la demanda de microequipos a ido en aumento con aplicaciones en: microscopia, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco agresivas, tratamientos, etc.. La reducción en el tamaño de los instrumentos permite inspeccionar las partes internas del cuerpo humano disminuyendo el riesgo de causar daños en este. Así mismo, eleva la precisión y la eficiencia en diagnósticos. Algunos de los dispositivos generados con estas tecnologías se muestran en la tabla 1.2.

Aplicación	Productos
Sensado	<ul style="list-style-type: none"> • Microsensores de presión táctil • Microsensores de presión y flujo sanguíneo • Sensores para análisis sanguíneos • Biosensores
Observación	<ul style="list-style-type: none"> • Microcámaras de CCD • Dispositivos de diagnóstico por ultrasonido
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Micromanipuladores de alta precisión • Microactuadores • Tecnología de teleoperación • Tecnología de control.
Transporte de medicamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de micronyección e infusión • Microequipo de muestreo de sangre • Microbombas • Microválvulas • Sistema de cápsula para el traslado de medicamentos
Estímulos eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaces nerviosas • retina artificial
Sistematización	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología de montaje de alta densidad • tecnología de sistematización

Tabla 1.2. Aplicación de tecnología de sistemas micromecánicos en la medicina
(Micromachine Magazine, 1996)

Otro campo de aplicación importante es la manufactura de pequeños productos industriales. En estos casos la energía consumida con este tipo de máquinas disminuye de forma considerable. Recientemente se emplean varias tecnologías para manufacturar componentes mecánicos de dimensiones pequeñas (decenas de micrómetros), para

la construcción de motores y actuadores de baja escala. La integración de estos sistemas con fines de producción es llamada microfábrica o fábrica sobre mesa [Kawahara, Kitahara, 1997].

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

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

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

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

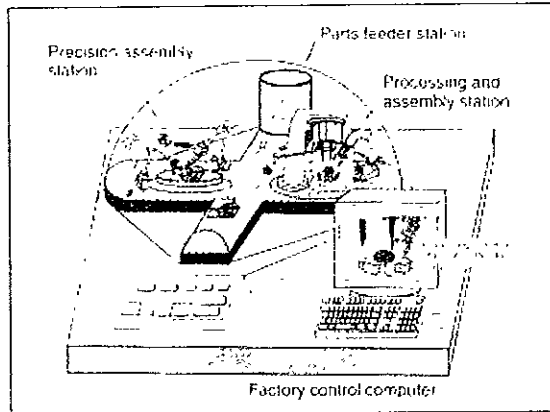


Figura 1.1 Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa (varios, Micromachine magazine, 1997).

En lo que respecta a inspección y mantenimiento de equipo industrial, los sistemas micromecánicos juegan un rol muy importante. En la actualidad existe interés en el desarrollo de pequeños robots de mantenimiento para inspección y reparación en lugares estrechos y/o inaccesibles. La aplicación de este tipo de robots cubre un amplio rango de equipo: maquinaria para transporte, plantas de energía (inspección en turbinas sin necesidad de desensamble), inspección de tuberías, plantas químicas, petroleras, nucleares, etc. En la figura 1.2 se muestra una micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy (Varios, Micromachine Magazine, 1997).

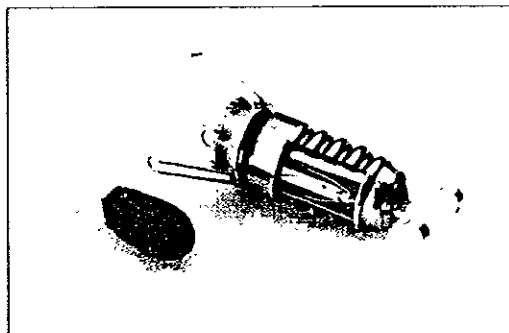


Figura 1.2. Micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Eddy.

De igual manera que los casos anteriores, podemos encontrar otras aplicaciones de microdispositivos como los mostrados en las figuras 1.3 a 1.5.

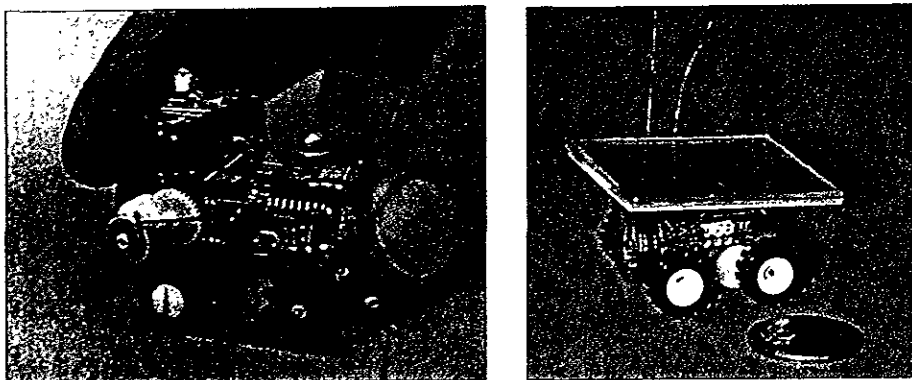


Figura 1.3. Microrobot de inspección (izquierda); Ejemplo de robot solar de exploración de pequeñas dimensiones (derecha).

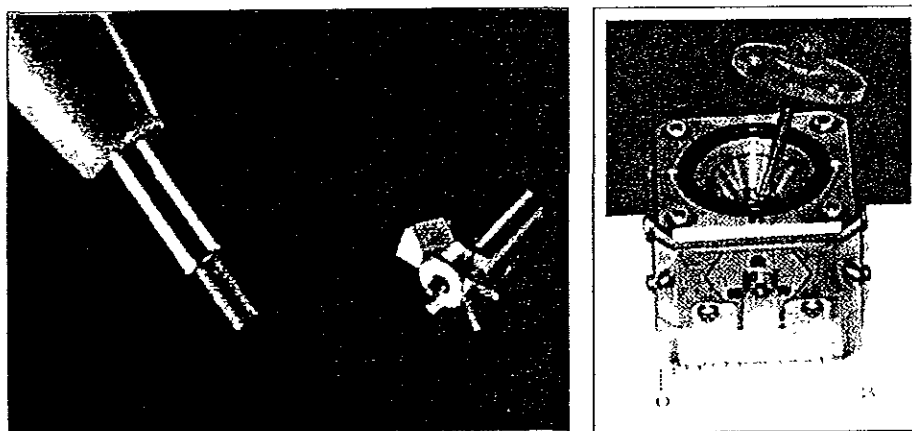


Figura 1.4. Microgenerador de corriente (izquierda); Microactuador con tres grados de libertad(derecha).

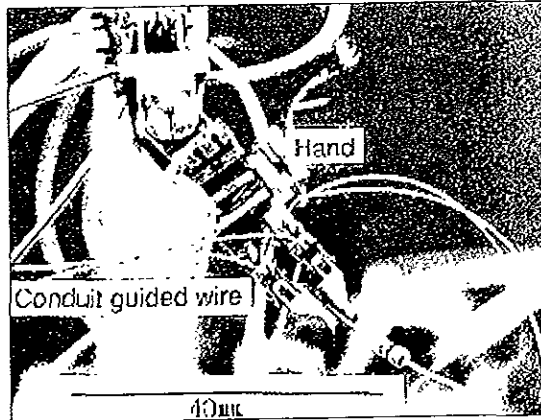


Figura 1.5. Micromanipulador [Vanos, Micromachine magazine, 1995].

En la figura 1.6 se muestra un microtorno japonés el cual es una de la pocas imágenes relacionadas con micromáquinas herramientas que se ha encontrado durante esta investigación, sus dimensiones son menores a $3 \text{ [cm}^3\text{]}$, pero sus características de su funcionamiento no son reportadas [Varios, Micromachine Magazine, 1997].

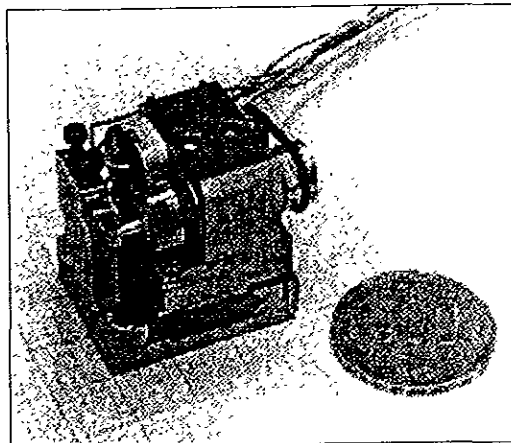


Figura 1.6. Microtorno Japonés.

Siguiendo la técnica de emplear mecánica convencional en para la fabricación de microsistemas en 1997 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 1.7 [Kussul, 1998].

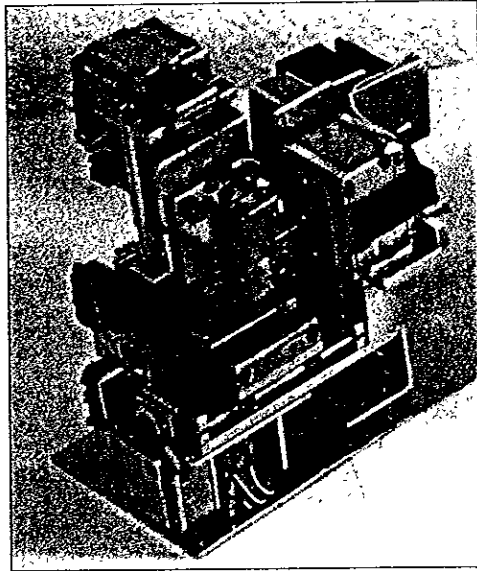


Figura 1.7 Prototipo de microcentro de maquinado.

Capítulo

2

Objetivos y alcances

Objetivo

- Caracterizar un microcentro de maquinado de bajo costo.

Alcances

- Proponer un método para caracterizar un microcentro de maquinado de bajo costo.
- Caracterizar un microcentro de maquinado de bajo costo con el método propuesto.
- Discutir los resultados para evaluar si el método es adecuado.

Capítulo

3

Desarrollo

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación de los tipos de técnicas que se emplean para caracterizar y evaluar máquinas herramientas convencionales y microequipos. Asimismo, se puso mucha atención en el tipo de características que se deseaban conocer y evaluar.

Técnicas de caracterización para máquinas herramientas convencionales

La precisión de trabajo, capacidades de desempeño y el efecto sobre el ambiente de las máquinas herramientas son factores que dependen de varias características [Weck, 1984] (ver figura 3.1.).

Las características que se observan en la figura 3.1 se pueden agrupar en dos líneas básicas: una de ellas se enfoca en el establecimiento de las limitaciones de la máquina y la segunda en el juicio global que establece el usuario de la máquina herramienta, tal como se muestra

en la figura 3.2 [Weck, 1984]. La determinación directa de las características de una máquina herramienta se enfoca en medir o cuantificar cada uno de sus atributos, lo que permite una identificación precisa de las causas de los errores, con el fin de establecer posibles mejoras en la máquina. La segunda línea en una determinación indirecta que permite realizar una cuantificación entre la precisión de trabajo y sus capacidades de desempeño.

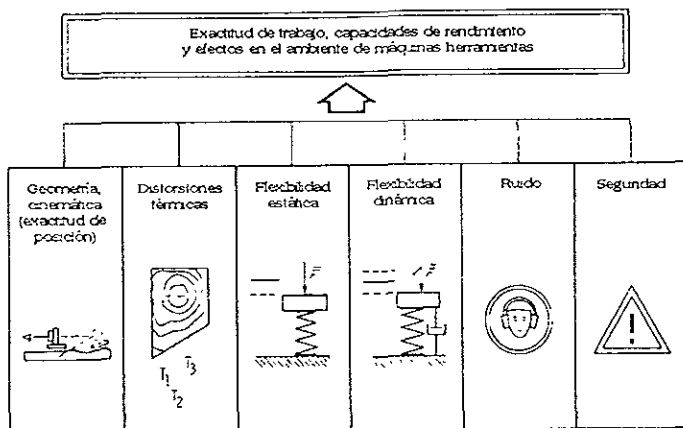


Figura 3.1 Características de máquinas herramientas en general.

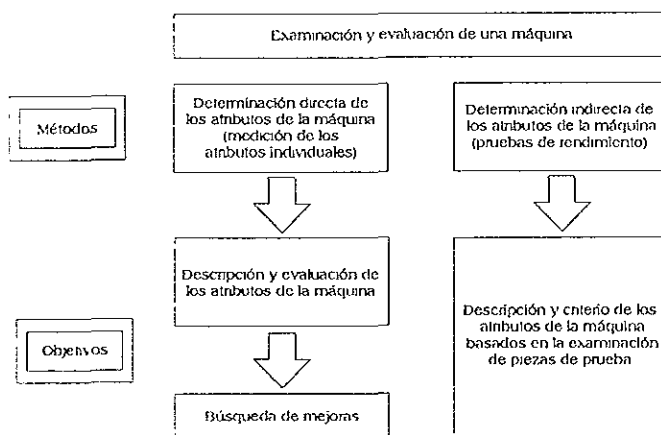


Figura 3.2. Objetivos y métodos para la examinación y evaluación de una máquina herramienta de uso general.

Todo lo anterior se lleva a cabo con el soporte de información estadística, lo que en determinado momento resulta costoso

Mediante el empleo de técnicas de evaluación estadística pueden hacerse una diferenciación entre errores periódicos y sistemáticos, por un lado, y errores aleatorios por el otro.

El procedimiento fundamental para determinar las características de una máquina herramienta basado en parámetros de calidad es mostrado en la figura 3.3 [Weck, 1984].

Los requerimientos de una técnica exitosa para la valoración de las características de una máquina herramienta son mostradas en la figura 3.4 [Weck, 1984].

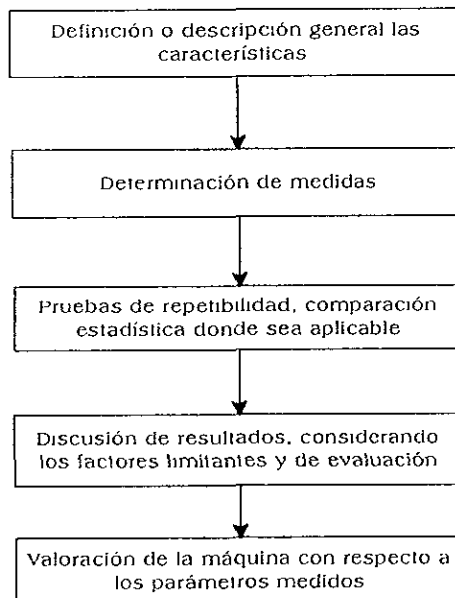


Figura 3.3 Procedimiento para la valoración de las características de una máquina herramienta

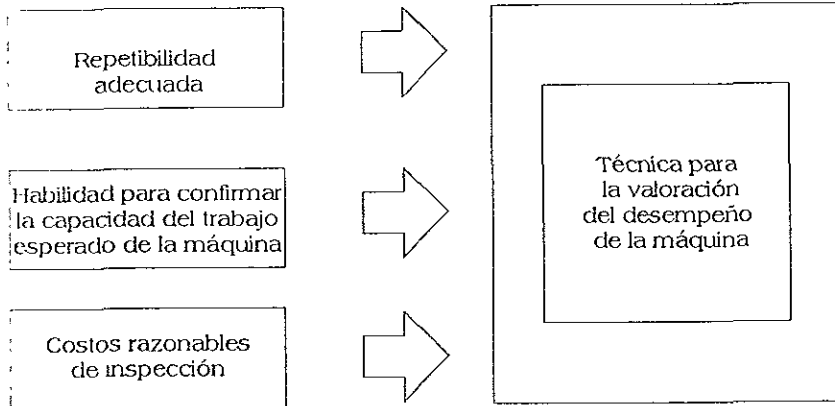


Figura 3.4. Requerimientos básicos de técnicas para la valoración del desempeño de una máquina

Las cartas de aceptación para máquinas herramientas deben tener un criterio de inspección y las desviaciones permisibles basadas en estándares nacionales o internacionales, o en recomendaciones aceptadas por asociaciones profesionales.

Dentro de los estándares existentes, los estándares aceptados son especificados únicamente para características geométricas, precisión de posición, precisión de trabajo, emisiones de ruido y seguridad. Una extensa clasificación de la multitud de pruebas de aceptación es mostrada en la Tabla 3.1 [Weck, 1984].

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 Pruebas de exactitud <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Exactitud de manufactura en geometría 1.2 Influencia del peso de trabajo 1.3 Influencia de cambios posicionales de unidades móviles 1.4 Puesta de dimensiones con la mano 1.5 Movimiento principal 1.6 Consistencia de alimentado 1.7 Sujeción 1.8 Vibración 2 Pruebas para rigidez estática <ul style="list-style-type: none"> 2.1 Con respecto a la precisión 2.2 Con respecto a la estabilidad 3. Pruebas para condiciones límite para producir estabilidad de corte 4 Pruebas de ruido (cantidad y fuente) 5. Pruebas para control automático gobernando el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo (también será examinada exactitud resultante, parámetros máximos de velocidad, aceleración, fuerzas y fiabilidad. Además éstas pruebas ayudan para las características de diseño del sistema de control) <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Dispositivos para limitar movimientos de desplazamiento <ul style="list-style-type: none"> 5.1.1 Sistemas de paro 5.1.2 Dispositivos con límite mediante <i>switch</i> 5.1.3 Sistemas de leva 5.1.4 Ajustes digitales o numéricos 5.2 Dispositivos para controlar trayectoria de movimiento | <ul style="list-style-type: none"> 5.2.1 Control numérico 5.3 Pruebas de los dispositivos para activar los controles 6 Pruebas de transportación mecánica y automatizada, almacenamiento y dispositivos de carga 7. Pruebas de dispositivos mecanizado y automatizados par cambio de herramientas 8. Prueba de los dispositivos de sujeción para piezas de trabajo y herramientas 9. Pruebas a los dispositivos que transmiten movimiento 10. Pruebas en guías tanto de movimiento rotacionales como lineal 11. Pruebas a componentes en operación para control manual 12. Pruebas en instalaciones eléctricas 13. Pruebas en sistemas neumáticos 14. Pruebas en sistemas hidráulicos 15. Pruebas en sistemas de lubricación 16. Pruebas en sistemas de refrigeración 17. Pruebas a unidades de succión 18. Pruebas a dispositivos de seguridad 19. Evaluación técnica-económica 20 Pruebas de rigidez y resistencia de uso. |
|--|---|

Tabla3. 1. Glosario de pruebas aceptadas

Técnicas de caracterización para micromáquinas

Básicamente en todas las ciencias se debe tener la habilidad para medir y caracterizar los fenómenos físicos.

Las herramientas de microfabricación están dedicadas al diseño y fabricación de pequeños componentes, los cuales pueden ser empleados en distintas aplicaciones como se mencionó anteriormente, por lo que se convierte en una necesidad fundamental conocer el comportamiento de estos microdispositivos. Debido a las limitaciones que se tienen, hasta el momento se han desarrollado muy pocos dispositivos para medir o caracterizar microdispositivos. Asimismo, los precios de estos equipos son habitualmente muy elevados.

A nivel mundial no existen metodologías para examinar equipos micromecánicos, cada una de las tecnologías mencionadas establecen diferentes métodos y parámetros a considerar para determinar características de microdispositivos, evaluar sus capacidades y proponer mejoras.

En el caso del desarrollo de MEMS Stephen D. Centuria (1987) menciona que el diseño exitoso en partes micromecánicas depende de la precisión con la cual el comportamiento de las estructuras pueda ser predicho con el fin de construir y reproducir microdispositivos. Esto depende de tres factores críticos:

- a) Control de las propiedades mecánicas de los materiales empleados para la fabricación de microdispositivos.

- b) Control dimensional de la estructura de los microdispositivos durante la fabricación.
- c) Análisis estructural de la parte primaria del microdispositivo y su soporte o encapsulado.

En este tipo de tecnología la metodología para asegurar que la producción de microdispositivos es de calidad adecuada, está basada en un amplio estudio de las propiedades de los materiales utilizados y no tanto en las herramientas para desarrollar microdispositivos. Para tal fin se desarrolla software de simulación respaldado con bases de datos que contienen información de comportamiento de materiales tal como características de oxidación y razones de difusión bajo una gran variedad de circunstancias.

Otro método empleado para probar micromáquinas fabricadas con tecnología MEMS está siendo desarrollado en los Laboratorios Sandia por Bill Miller (1997). La línea que se sigue en estos laboratorios es la de establecer la confiabilidad de estos dispositivos bajo diferentes condiciones de operación para observar el rendimiento que tienen éstos con respecto a su desgaste natural, en la figura 3.5 se muestra el barrenado de una unión de una micromáquina sin uso y una con desgaste natural.

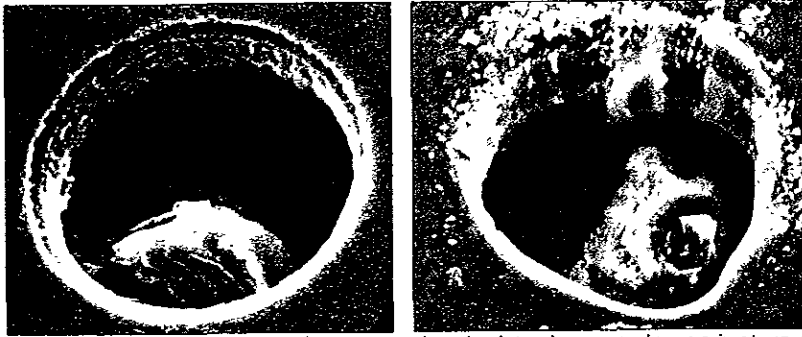


Figura 3.5. Barreno de una unión sin uso (izquierda) y barreno de una junta con desgaste natural por uso (derecha)

De acuerdo a la literatura, en el caso de la tecnología MMT es necesario establecer un camino distinto para el desarrollo de la evaluación de estos dispositivos. Una forma de caracterizar este tipo de máquinas es comparando el rendimiento real de un dispositivo fabricado con valores teóricos y realizar un análisis teórico para analizar las discrepancias [Takayuki Tsunemi, 1994], es decir, analizar por separado cada uno de los elementos de una micromáquina, para con esto obtener un camino para determinar los principios y especificaciones que un dispositivo debe de tener para formar parte como componente de una micromáquina.

Siguiendo la línea del párrafo anterior en la Universidad de Keio, Japón, se desarrolló un sistema para evaluar en forma precisa las características de precisión dimensional y geométrica de las partes que componen una micromáquina. El sistema consiste en un instrumento de medición geométrica sin contacto que aplica voltaje entre una prueba y una muestra conductora y utiliza el efecto túnel mediante la aproximación de la prueba y la muestra a una distancia de 1 [nm]. En la figura 3.6 se muestran algunos resultados obtenidos con este equipo [Mitsui, 1995].

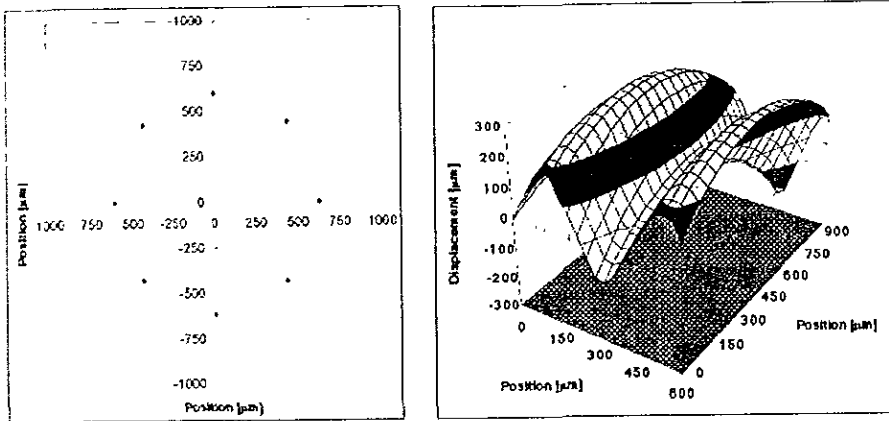


Figura 3.6. Resultado de mediciones en el diámetro interior de un barreno (izquierda), resultado de la medición de geometría de un tomillo (derecha).

Otro de los parámetros para evaluar una micromáquina y en específico una micromáquina herramienta es la inspección de los productos que se producen en ésta con el fin evaluar la calidad de superficie de piezas manufacturadas (rugosidad de superficie, existencia de cavidades, estimación de corte). El método empleado es el análisis y reconocimiento de texturas utilizando técnicas de redes neuronales. La información referente a la calidad de superficie será empleada para estimar las condiciones de la herramienta de corte y la calidad del material de la pieza de trabajo, así como también para diagnosticar el equipo [Kussul, 1992].

En general, todos los MEMS presentan problemas complejos para ser evaluados. Las pruebas requieren ser diferentes, dependiendo de las técnicas bajo las cuales son fabricados, ya sea bajo técnicas MEMS o con micromáquinas. En el caso MEMS existen especialistas que ofrecen servicios para evaluar estos microdispositivos en laboratorios de universidades o de gobierno [Nelson, 1999], pero en general no existe una estandarización en el tipo de pruebas que es necesario practicar a

estos dispositivos para evaluarlos. La situación en la que se encuentran los estudios para la evaluación de micromáquinas desarrolladas bajo la tecnología MMT es similar, por lo que se está comenzando a tener mucho interés en esta línea de investigación.

Por lo antes mencionado podemos darnos cuenta de lo complicado que es evaluar una micromáquina. Pueden emplearse variados procedimientos para este fin: la medición de piezas manufacturadas con el equipo; la fabricación y medición de piezas de prueba; la inspección de superficie en piezas; y métodos especiales para la evaluación de equipos.

La medición de piezas usuales manufacturadas en una micromáquina provee información acerca de tolerancias. El maquinado de piezas de prueba permite obtener información acerca de diferentes pasos del proceso. La inspección de superficie permite realizar evaluaciones de rigidez, vibraciones y parcialmente del comportamiento de los componentes del equipo.

Capítulo

4

Caso de Estudio

Dentro de las líneas de investigación desarrolladas a corto, mediano y largo plazo en el laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM, destaca el desarrollo de sistemas micromecánicos. Esta línea tiene como principal objetivo generar tecnología de punta para la fabricación de piezas con dimensiones inferiores al milímetro para desarrollar tecnología de producción totalmente automatizada enfocada al desarrollo de equipo e instrumentación de bajo costo y alta eficiencia.

Como parte de esta línea de investigación se ha iniciado el desarrollo de las primeras generaciones de microequipo mecánico, que tiene como características generales sencillez de manufactura y diseño, así como un bajo costo de producción y consumo energético. Estos primeros prototipos están enfocados a crear un centro de maquinado y manipuladores para usos diversos, teniendo como meta la automatización total de un proceso productivo.

Por esta razón y con el fin de desarrollar microsistemas mecánicos el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM propone la compactación de sistemas mecánicos tradicionales. Esta tecnología, a diferencia de la que actualmente es usada para la fabricación de componentes fotográficos y de relojería, presenta una mayor versatilidad, menor espacio, mejores acabados y en un mediano plazo un menor costo. Todo esto sin perder de vista el potencial de mayores posibilidades de escalamiento y miniaturización.

Las micromáquinas herramientas y micromanipuladores de primera generación tienen medidas entre 120 y 180 [mm] y pueden ser producidas con equipo mecánico convencional (tornos, fresadoras, taladros etc.). Las micromáquinas herramientas y micromanipuladores de segunda generación pueden tener medidas entre 50 y 80 [mm] y deben ser producidas con el microequipo de la primera generación. De esta manera definimos que las generaciones siguientes deben estar conformadas por equipo más pequeño que el equipo de la generación anterior. Todos los microdispositivos deben ser controlados automáticamente por medio de una computadora. Por tal motivo es posible crear una microfábrica (llamadas también fábrica sobre mesa), que contenga una gran cantidad de microsistemas [Kussul, 1999].

En el último año se desarrolló un prototipo de microcentro de maquinado con capacidad para realizar maquinados de torno, fresa y taladra. El tipo de trabajo depende del tipo de herramienta empleada y de la configuración en la que trabaje el equipo. A continuación se habla del prototipo desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM

Microcentro de maquinado de bajo costo

Las especificaciones propuestas en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos para el desarrollo de este prototipo de microcentro de maquinado de la primera generación de microequipo, fabricado en México, fueron:

- ↷ Capacidad para producir piezas dentro del rango de 100 micrómetros y hasta 5 milímetros.
- ↷ Resolución de 2 micrómetros por 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 un sistema Pentium con 32Mb en memoria RAM.

Como resultado de estas especificaciones se obtuvo un prototipo de microcentro de maquinado de bajo costo con dimensiones aproximadas de 130x160x85 (mm³), dicho prototipo es presentado en las figuras 4.1 y 4.2.

Como se puede observar en las figuras; sobre el bastidor (1) están montadas tres guías (2), (4), (6), mismas que soportan tres carros (3), (5), (7) mediante un esquema secuencial. Cada guía es instalada sobre el carro previo para obtener con esto movimientos de translación en los ejes "X", "Y" y "Z".

Se cuenta también con un sistema de sujeción de piezas (10) que está acoplado a una caja de reducción de engranes (11) y también es instalado sobre la base.

Los actuadores empleados para proporcionar movimiento, tanto en los carros como en el sistema de sujeción son motores de pasos (8) y (9) auxiliados mediante cajas de engranes con una relación de 84.7:1.

En el último carro se encuentra montado un sistema porta herramientas para realizar trabajos de torneado. Por medio de alfileres colocados en el porta herramientas es posible medir el diámetro de la pieza de trabajo. Para el caso de fresado y taladrado se coloca un sistema de sujeción especial en lugar del portaherramientas (12).

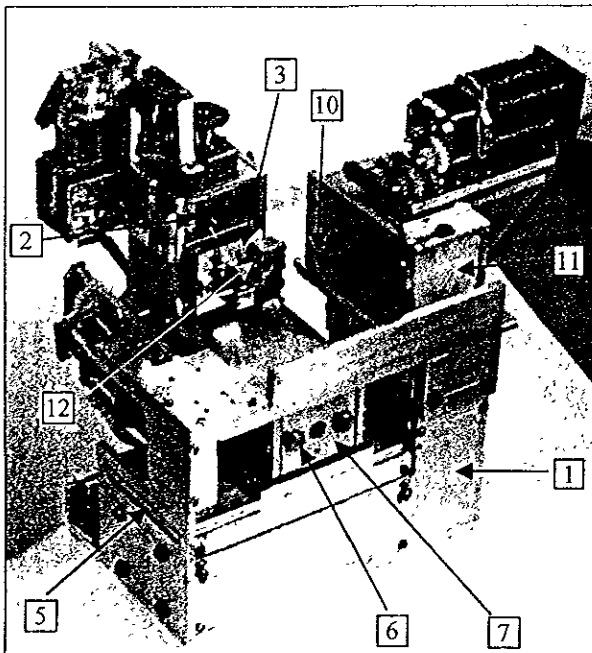


Figura 4.1 Vista frontal del microcentro de maquinado desarrollado en el Centro de Instrumentos UNAM.

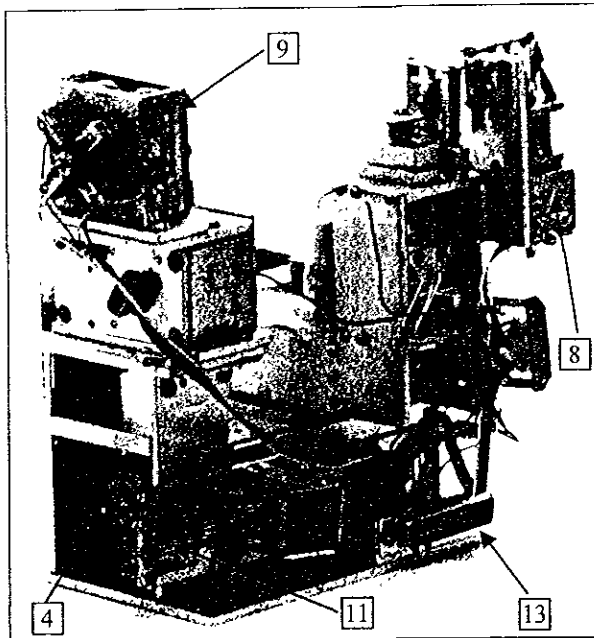


Figura 4.2. Vista posterior del microcentro de maquinado desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro de Instrumentos UNAM

El sistema de control de este prototipo fue diseñado con el objetivo de tener la posibilidad de emplear una computadora personal para su control y eliminar en medida de lo posible el hardware de control externo. Éste está compuesto por un amplificador de DC de 16 canales y cuatro acondicionadores de señal para los sensores de contacto.

El microcentro de maquinado cuenta con un puerto (13) que contiene conexiones a los motores de pasos y a sensores de contacto colocados en el inicio de la carrera de cada eje. El estado de cada uno de los motores es determinado por los datos que se encuentren en el

puerto "A" de dos puertos paralelos que se encuentran en la PC. Para realizar cada paso en la computadora se tiene que realizar un cambio de cuatro bits. Para simplificar el sistema de control de los motores de pasos trabajan en modo estático.

La retroalimentación de la micromáquina herramienta a la computadora es realizada por medio del puerto "B" con la ayuda de cuatro sensores de contacto; tres de ellos se emplean para determinar la posición inicial de los carros y uno de ellos es empleado para detectar el momento de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo con el fin de determinar posiciones relativas de diferentes instrumentos empleados en los procesos de manufactura. También se emplean para realizar algunas mediciones durante el proceso, por ejemplo, medir el diámetro de la pieza de trabajo. Para esto se emplean sensores de contacto eléctrico y únicamente puede haber retroalimentación con piezas de trabajo metálicas. El diagrama de control se muestra en la figura 4.3.

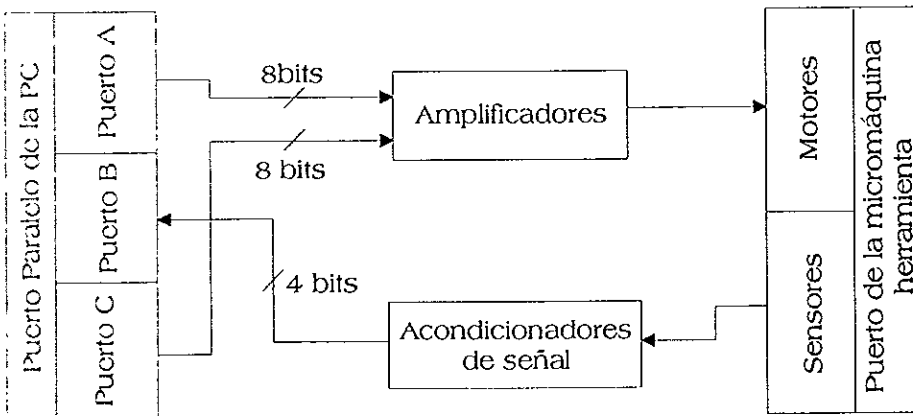


Figura 4.3 Sistema de control del microcentro de maquinado de bajo costo.

El lenguaje de programación empleado para desarrollar el programa de control para esta micromáquina es Borland C++.

El diseño detallado de este prototipo es mostrado en la tesis "Diseño y construcción de un microcentro de bajo costo" (Ruiz, 2000).

Con este equipo ya se han fabricado algunas piezas de forma automática pero no se conocen las características reales de la máquina por lo que es necesario caracterizarla y establecer los parámetros de rendimiento de éste con el fin de emplearlos en la parte de control y compensar errores. Así mismo para establecer sus fuentes y proponer mejoras. Esto es parte central del presente trabajo

Capítulo

5

Propuesta para caracterizar el microcentro de maquinado de bajo costo

La Norma ISO 230 estandariza los métodos para probar la exactitud de máquinas herramientas, sin incluir máquinas herramientas portátiles. Esta norma está constituida por las siguientes partes:

Parte 1: Exactitud geométrica de máquinas operando sin carga o en condiciones de acabado.

Parte 2: Determinación de la exactitud y repetibilidad de posicionamiento de máquinas herramientas de control numérico.

Parte 3: Exactitud de máquinas trabajando bajo carga.

Parte 4: Vibraciones.

Parte 5: Nivel de ruido.

Parte 6. Seguridad.

De las partes anteriores que componen la ISO 230 sólo se contó con los estándares para evaluar la exactitud geométrica de máquinas operando sin carga o en condiciones de acabado, las cuales son:

- ↪ Rectitud
- ↪ Planitud
- ↪ Paralelismo y equidistancia.
- ↪ Cuadratura
- ↪ Rotación

Para establecer la propuesta para la caracterización de la micromáquina herramienta de bajo costo se establecieron las características que se deseaban conocer del equipo, que son las siguientes:

- ↪ Resolución real por paso de motor
- ↪ Linealidad de cada eje
- ↪ Paralelismo y ortogonalidad entre ejes
- ↪ Precisión
- ↪ Comportamiento espacial de la máquina

↷ Posición inicial

Como primer paso, se realizó un análisis del método que se emplearía para la caracterización, considerando que existe el método directo y el método indirecto, y adaptándolo a la infraestructura con la que se cuenta en el Centro de Instrumentos UNAM. En el Centro de Instrumentos UNAM se tiene un Laboratorio de Metrología, certificado por el CENAM, el cual cuenta con equipo para realizar pruebas de carácter geométrico, tales como una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), comparador óptico, microscopio, etc.

Se decidió atacar el problema de forma directa empleando la MMC. Para analizar cada eje en forma independiente estableciendo un cubo de trabajo y midiendo puntos dentro de éste. Así mismo, por medio de éste método se podría establecer la precisión de retorno a la posición de origen en el microcentro de maquinado.

La primera prueba que se realizó fue la de posición de inicio, la cual nos ayudaría a establecer un error más, asociado a los ejes. Se programó el microcentro de maquinado para que realizara diferentes trayectorias, se detuviera (punto 1), y regresara a la posición de inicio (punto 2), con el fin de medir ambos puntos.

En este caso fue necesario diseñar un elemento que, colocado en el lugar del porta herramientas, nos permitiera tomar las mediciones para identificar su origen. En la figura 5.1 se muestra elemento el elemento diseñado, el cual tiene una esfera metálica (balín) en la parte superior. La MMC determinaba la posición del centro de la esfera después de palpar cinco puntos.

La obtención de los demás puntos se realizó como se establece en el diagrama de flujo presentado en la figura la figura 5.2.

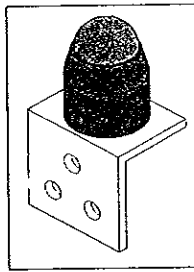


Figura 5.1. Esfera para medir posición de inicio del microcentro de maquinado.

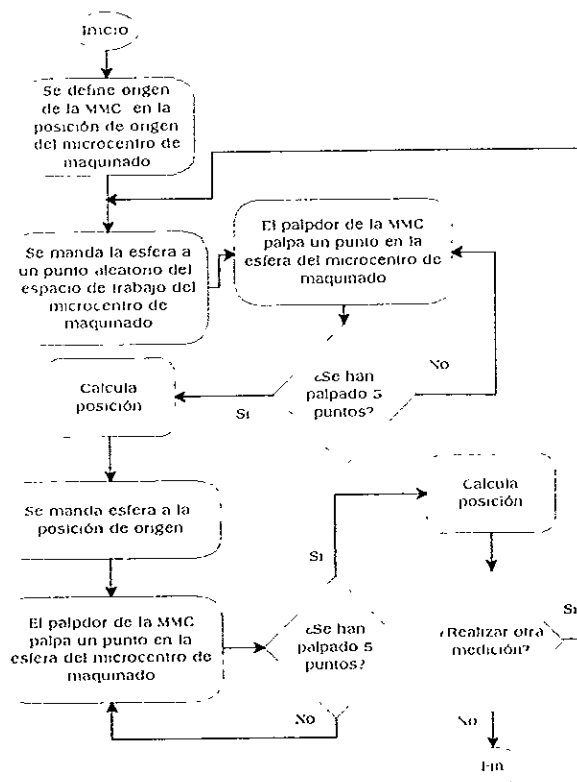


Figura 5.2. Diagrama de flujo para pruebas de posición inicial.

Las características de la Máquina de Medición por Coordenadas marca ZEISS son las siguientes:

Modelo:	MC850
Intervalo de medición:	0.85×0.24×0.60 (m)
Precisión:	0.2×10 ⁶ (m)
Sistema antivibración:	A base de rodamientos de aire, estructura rígida
Presión de aire:	686 (kpa)

En la figura 5.3 se presenta la fotografía de la MMC.

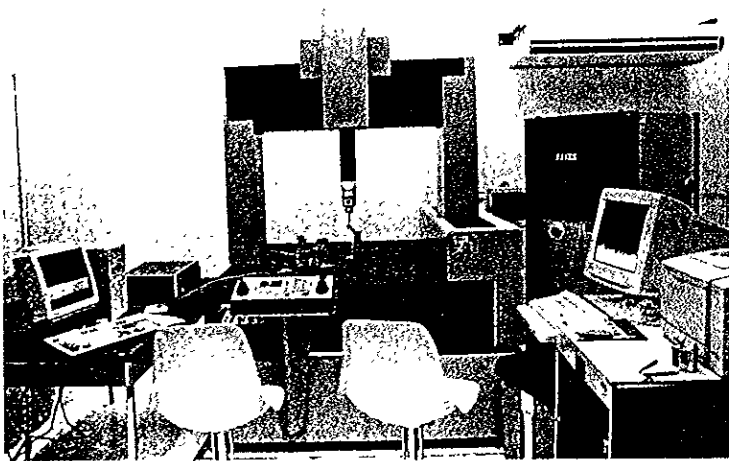


Figura 5.3 Máquina de Medición por coordenadas empleada para las pruebas de posición de origen

El principio de operación de la MMC es hacer contacto con un palpador en una superficie, y cuando se deja de hacer contacto con ella valida la lectura del punto en el espacio.

Para esta prueba se programo en la MMC que el cero de ésta estuviera en el centro de la esfera, medida en la posición de inicio del MCM.

En la figura 5.4 se muestra una imagen del momento en que el palpador de la MMC toca la esfera para realizar una de las mediciones.

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de las mediciones obtenidas en esta prueba.

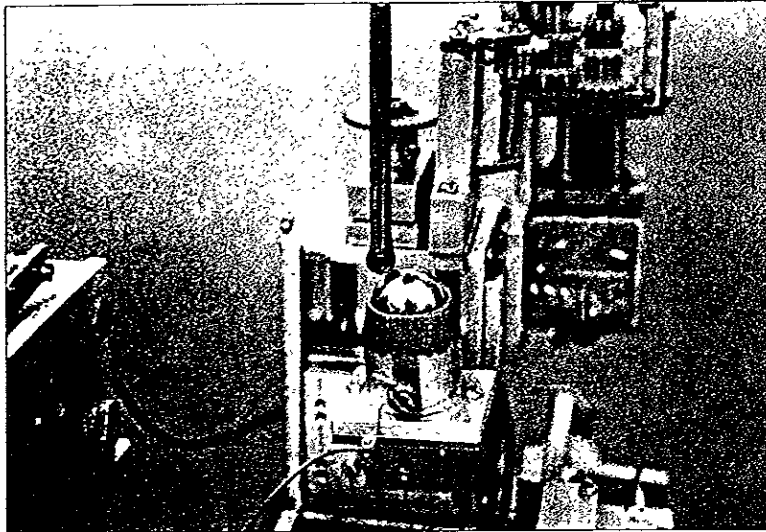


Figura 5.4. Palpador haciendo contacto con esfera para medir posición de origen.

Número de medición	Posición aleatoria [μm]			Posición de inicio [μm]		
	"X"	"Y"	"Z"	"X"	"Y"	"Z"
1	8582.0	-9378.4	9036.5	-24.8	13.4	-8.0
2	12175.6	-11272.9	3273.6	-50.9	-14.8	115.5
3	9387	-253.7	3580.1	36.1	10.9	135.6
4	3656.9	-1898.3	5303.5	-29.4	7.4	-137.4
5	1830.6	-63.8	-34.1	-32.6	7.8	-3.6
6	-194.5	-1755.6	-71.3	-9.2	4.1	-9.3

Tabla 5.1. Mediciones realizadas en la prueba de posición de origen.

En la figura 5.5 se muestra una gráfica del comportamiento en los tres ejes al llegar a la posición inicial.

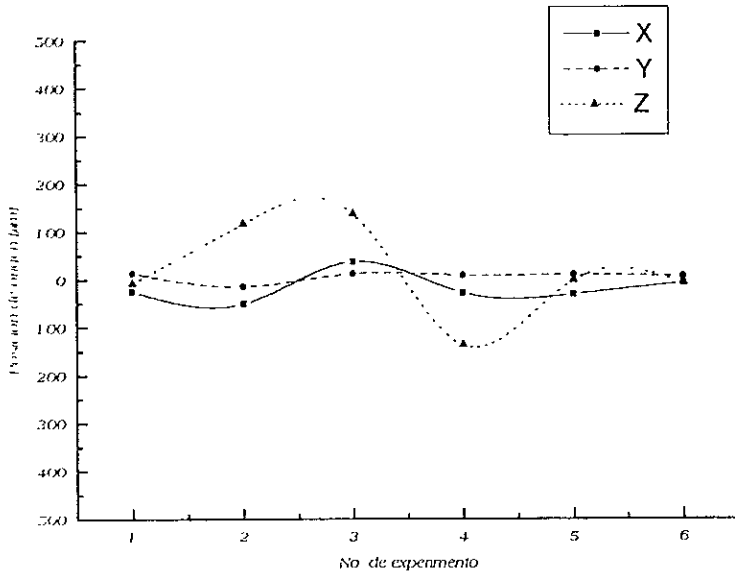


Figura 5.5 Gráfica de las lecturas de la posición de origen en los tres ejes (X,Y,Z).

Las desviaciones estándar que se tienen de cada eje con respecto a cero son las siguientes:

$$\sigma_x = 36.11 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\sigma_y = 11.4 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\sigma_z = 100.76 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Analizando los resultados, se observó que existía una diferencia muy grande entre los resultados del diámetro de la esfera, esto se atribuyó a un corrimiento del centro de ésta debido a la fuerza con la que el palpador hace contacto. En el eje "Z" es donde se tienen más

variaciones, debido a que fue la dirección de ataque del palpador con la esfera

Con el fin de determinar la influencia del fenómeno en las mediciones, se realizaron pruebas con la ayuda de un palpador electrónico, el cual detectaba el movimiento de la esfera al momento en que el palpador hacía contacto con ella. Una fotografía de esta prueba se muestra en la figura 5.6

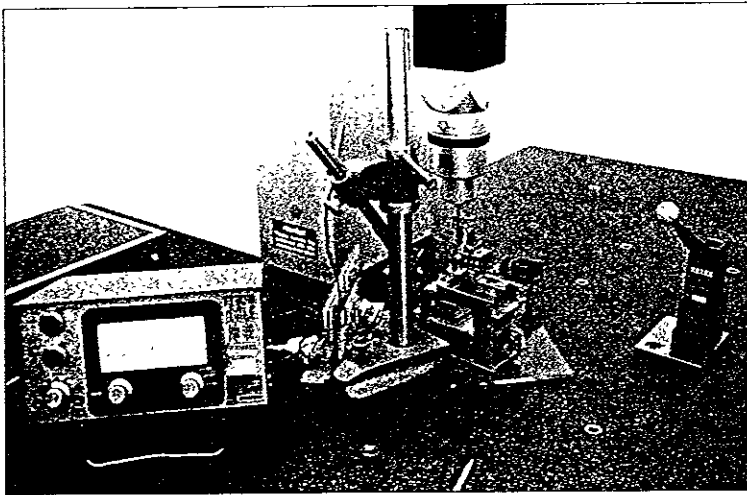


Figura 5.6. Medición de la magnitud de desplazamiento en la base de la esfera al ocurrir el impacto del palpador con sobre la esfera.

Los desplazamientos máximos que se detectaron por eje en la base de la esfera fueron:

$$\delta_x = 15 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\delta_y = 18 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\delta_z = 40 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Los desplazamientos detectados influyeron en las lecturas obtenidas en esta prueba, desconociendo en que magnitud, puesto que no se puede tocar la esfera siempre en los mismos puntos, pero se concluyó que los errores de posición de inicio son menores a los calculados, aunque no es posible considerar estas medidas para el análisis del equipo.

La prueba anterior indica que nos es posible realizar una caracterización directa sobre el MCM con la infraestructura existente, por lo que se optó por atacar el problema de caracterización de forma indirecta, es decir, a partir de las piezas producidas en el equipo. Lo que nos permitió conocer en parte la precisión o grado de inestabilidad del equipo.

Con el método propuesto, es posible separar los errores sistemáticos de los errores aleatorios como se muestra en la figura 5.7. Generalmente estos no se identifican inmediatamente para detectar las causas individuales de la imprecisión de trabajo.

En evaluaciones de tipo indirecto, las probetas pueden ser diseñadas para que algunos parámetros individuales del equipo sean caracterizados, tal es el caso de la rigidez, geometría, precisión posicional, etc. [Weck, 1984].

Los errores pueden resultar en falta de rectitud, cortes cóncavos o convexos, desviación en paralelismo, errores de ángulo, ondulaciones, etc. Usualmente la mezcla de varios de estos errores se presenta, tal como se muestra en la figura 5.8 [Weck, 1984].

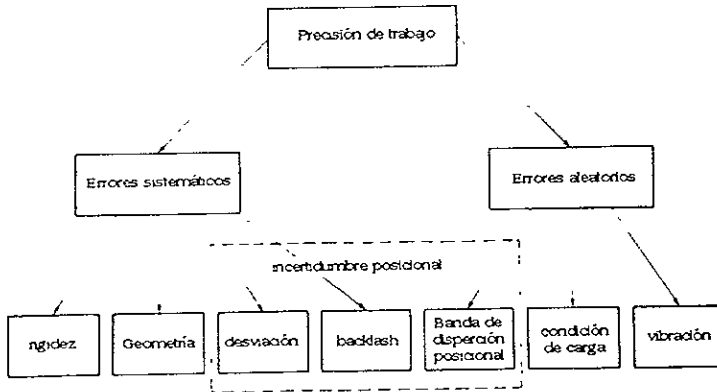


Figura 5.7. Imprecisiones de trabajo de una máquina herramienta (factores que influyen de acuerdo a la norma VDI/DGQ 3441).

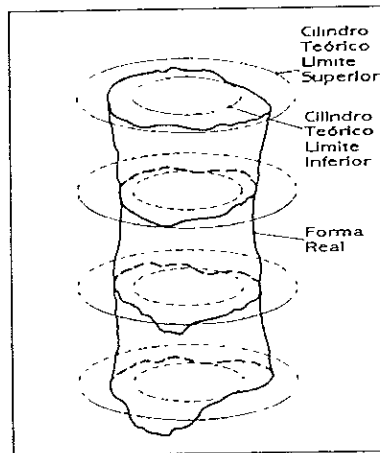


Figura 5.8. Desviaciones en la forma de una pieza cilíndrica.

Finalmente las características que era factible conocer del equipo de acuerdo a la propuesta fueron:

- ☞ Características posicionales: Análisis de resolución de desplazamiento en ejes (desplazamiento lineal por paso de motor) y Backlash

- ↻ Inspección geométrica: Análisis geométrico de piezas fabricadas en el equipo para compararlas con el diseño teórico de las mismas, con el fin de conocer características de exactitud y precisión.

Diseño de pruebas

Las pruebas para la caracterización del prototipo de MCM se realizaron a partir de la manufactura de un número determinado de piezas similares (20 piezas), de las cuales se tenían las características geométricas teóricas. Con la aplicación de análisis estadísticos se conocieron los parámetros deseados.

Las pruebas para el desarrollo de este trabajo se establecieron bajo los siguientes puntos:

- ↻ Para analizar la resolución máxima y *Backlash* se empleó un tipo de probeta.
- ↻ Para las pruebas de análisis geométrico se utilizaron piezas manufacturadas en el MMC con fines de fabricar un dispositivo para probar las aplicaciones de esta tecnología.

Para elaborar las probetas, se necesitaba conocer la resolución de desplazamiento teórico. Del diseño se establece que el equipo tiene un desplazamiento lineal teórico de 1.875 [μm] [Ruiz, 2000], por cada paso de motor, este desplazamiento se considera el mismo en todos los ejes, puesto que se emplea la misma configuración de engranes y guías para dar movimiento a éstos.

Para el caso de la primera prueba, se decidió manufacturar una pieza de forma cilíndrica con tres marcas radiales (probeta del tipo 1), como la que se muestra en la figura 5.9.

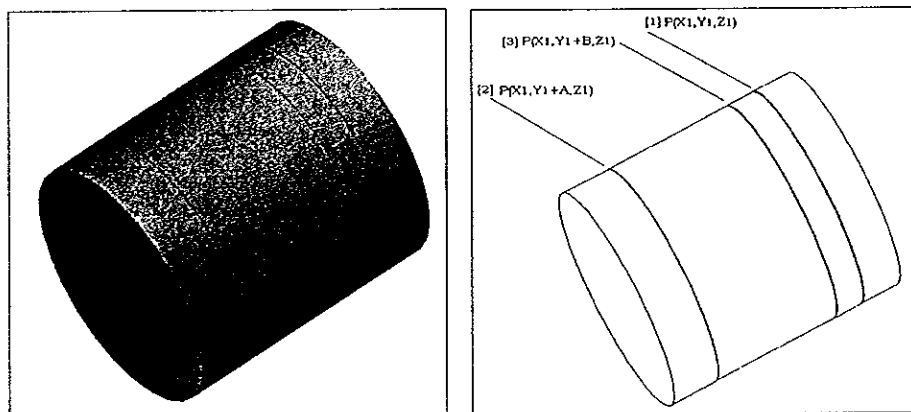


Figura 5.9. Probeta empleada para determinar características posicionales del microcentro de maquinado

Partiendo de la figura 5.9 (derecha), se maquinó la marca (1) que funcionó como referencia de un punto en el espacio (x_1, y_1, z_1) donde se localizó el cortador; la marca (2), se maquinó después de recorrer el cortador una distancia conocida "A" sobre el eje "Y", es decir, se trasladó al punto $(x_1, y_1 + A, z_1)$; finalmente la marca (3) se maquinó después de retroceder la misma distancia "A" en el eje "Y", el cual está en el punto $(x_1, y_1 + B, z_1)$, donde la distancia "A - B" es el *backlash* asociado al eje "Y" del microcentro de maquinado.

Determinando el valor de "A - B" conocimos el *backlash* de un eje de la máquina, que debe ser aproximadamente el mismo para los ejes "X" y "Z". Asimismo, se determinó la distancia "A", la cual, al relacionarla con el número de pasos que recorrió el carro en el eje "Y" permitió conocer

el desplazamiento real por paso de motor. Estas mediciones se llevaron a cabo con la ayuda de un comparador óptico.

Las probetas que se emplearon para la segunda prueba fueron microanillos (probetas de tipo 2), los cuales fueron empleados en la fabricación de un microfiltro mecánico, el cual es una aplicación de la tecnología micromecánica. En la figura 5.10 se muestra una imagen del modelo en sólido del microfiltro mecánico y en la figura 5.11 se observa el modelo en sólido de un microanillo. A este tipo de probetas se les realizaron análisis geométricos con un comparador óptico.

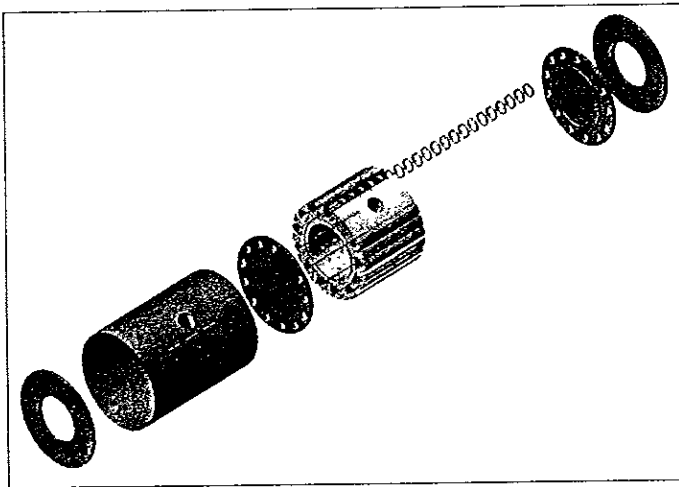


Figura 5.10. Microfiltro mecánico.

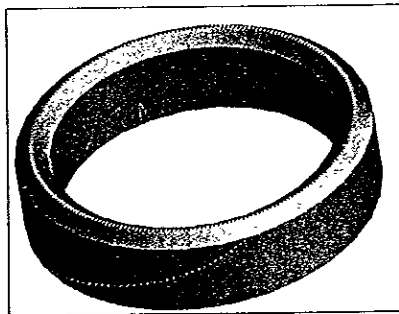


Figura 5.11. Probetas para realizar la inspección geométrica

Desarrollo de las piezas de prueba.

En el desarrollo de los programas de cómputo para fabricar las probetas se consideraron características del microcentro de maquinado relacionadas con su diseño:

1. Resolución de desplazamiento teórico por paso de motor.
2. Posición de herramientas
3. Posición del centro de la pieza con respecto a de las herramientas

La resolución teórica es de 1.875 (μm) por paso; para el caso de los puntos dos y tres se diseñó un programa que permitió mover el porta herramientas con ayuda del teclado de la PC y así determinar estos datos, mismos que dependen de la herramienta a utilizarse y del tipo de pieza que se desea fabricar. En la figura 5.12 se muestra una foto del porta herramientas. El numerar las herramientas nos fue útil para desarrollar los programas.

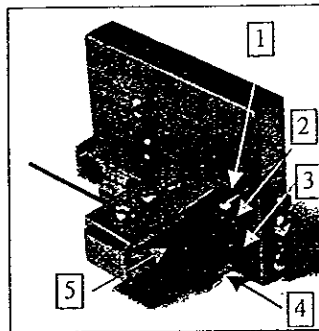


Figura 5.12. Porta herramientas del microcentro de maquinado.

Para la fabricación de las probetas se empleó barra de latón de $\phi = 1/8''$.

Programa de fabricación de probetas para determinar *backlash* y resolución máxima de desplazamiento

Primero se colocó el porta herramientas en la posición de inicio.

Como segundo paso, se localizó la pieza de trabajo con la herramienta No. 2 por lo que fue necesario llevar la herramienta a la posición P1(6650, 0, 4500), con el fin de la herramienta de alinear con el eje rotacional.

A partir de este punto se localizó la pieza realizando un barrido en el eje "Y" para encontrar el punto en el que la herramienta No. 2 tiene contacto con la pieza de trabajo en forma axial P2(6650, Y1, 4500), por medio de contacto eléctrico.

Una vez localizada la pieza, se maquina un cilindro con diámetro de $\phi \approx 2.54$ [mm], paralelo al eje "Y" con altura de $h \approx 3.8$ [mm].

Como siguiente paso se traslada la herramienta de trabajo No. 4 al punto P3(3895, 9900, 3600). En este punto se proyecta la herramienta sobre la pieza de trabajo en forma radial a ésta y se maquina la primera marca (referencia) con una profundidad de aproximadamente 9 [μm]; se extrae la herramienta en la misma dirección en la que entró, se recorren 1050 pasos sobre el eje "Y" y se marca en esta posición la pieza; se vuelve a extraer, se regresan los mismos 1050 pasos para maquina otra marca; finalmente la máquina regresa los carros a su posición inicial y el programa pregunta si se desea realizar otra pieza. En la figura 5.13 se muestra el diagrama de flujo del programa realizado.

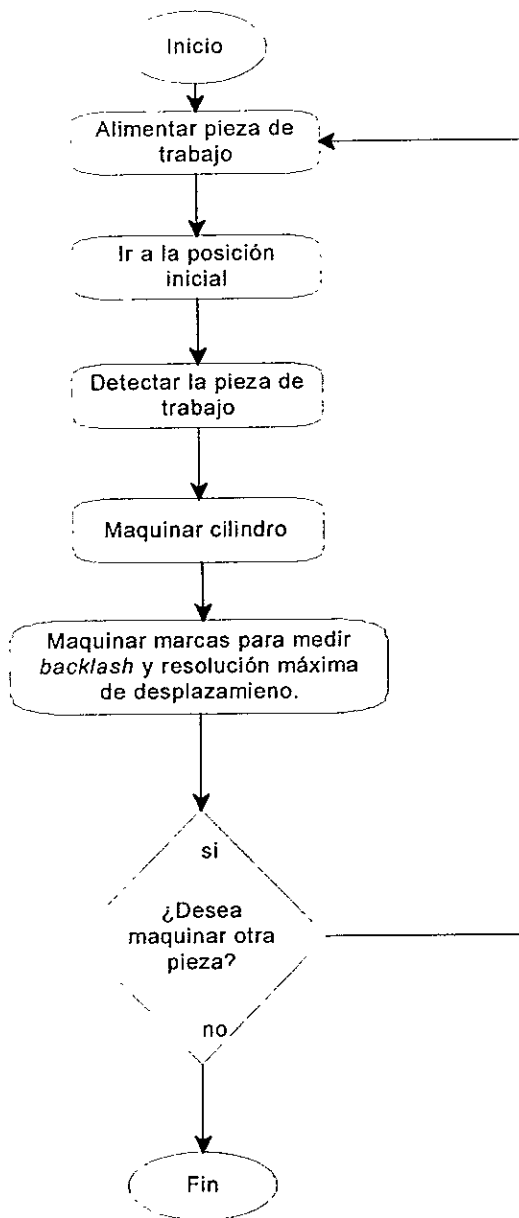


Figura 5.13. Diagrama de flujo para realizar probeta para medir backlash y resolución máxima de máquina.

Programa de fabricación de probetas para realizar el análisis geométrico

Como se puede observar, en la fabricación de las probetas anteriores, se tuvo que maquinar una por una, no así el caso de la fabricación de microanillos donde se realizaron varias piezas con un solo programa, para observar el error.

El programa lleva el carro a su posición inicial. Se busca la pieza de trabajo con la herramienta No. 5 (broca) trasladándose al punto P1(3900, 0, 650) que hace coincidir el centro de la broca con el centro de giro de la pieza de trabajo. A partir de este punto se busca la pieza, por medio de contacto eléctrico, realizando un barrido en el eje "Y".

Cuando se localiza la pieza, se le maquina un barrenado de aproximadamente 1.9 (mm). Al finalizar esta tarea se coloca la herramienta No. 2 en posición de corte y se maquina un cilindro de $\phi \approx 1.260 \times h \approx 800$ (μm). Con la herramienta No. 1 se realiza el refrentado de la pieza y los cortes cónicos.

Finalmente, con la herramienta No. 4 se corta el anillo terminado. Se realiza un nuevo refrentado de la pieza de trabajo, se vuelve a colocar la herramienta No. 5 en posición y se repite el programa para realizar un nuevo anillo, tomando en cuenta la nueva posición relativa del carro porta herramientas. El programa maquina 5 anillos durante su ejecución. El diagrama de flujo de este programa se presenta en la figura 5 14.

Las probetas maquinadas en el microcentro de maquinado fueron realizadas bajo diferentes condiciones, es decir en diferentes días con diferentes condiciones ambientales, con el fin de tener resultados generales de los parámetros deseados.

El programa para la fabricación de anillos se muestra en los anexos.

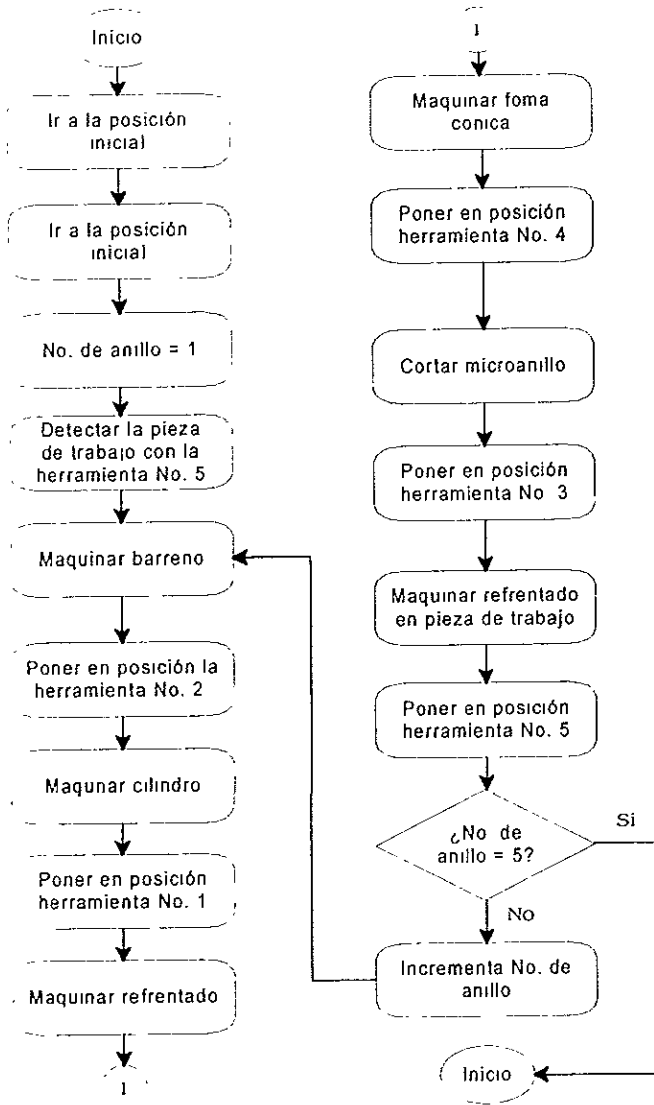


Figura 5.14 Diagrama de flujo del programa para la fabricación de microanillos

Descripción del equipo utilizado para la realización de pruebas.

Para el análisis geométrico, *backlash* y resolución desplazamiento en ejes se empleó un comparador óptico de la marca NIKON con las siguientes características:

Modelo: V-16D

Área de trabajo: 50 [mm] x 50 [mm]

Precisión: 1×10^{-6} [m]

En la figura 5.15 se presenta la fotografía del comparador óptico marca NIKON



Figura 5.15. Comparador óptico NIKON.

Capítulo

6

Pruebas y Resultados

Las mediciones de las probetas diseñadas en el capítulo anterior se realizaron en el Laboratorio de Metrología del Centro de Instrumentos UNAM, bajo las siguientes condiciones:

- ↻ Temperatura 20 °C
- ↻ Humedad relativa 50%

Los parámetros que se obtuvieron con la ayuda de los instrumentos de medición fueron analizados con la ayuda de métodos estadísticos.

En los análisis estadísticos se puso atención al promedio de las lecturas (\bar{X}) y a las desviaciones estándar (σ).

Resolución real de desplazamiento por paso de motor

En la figura 6.1 se muestra una imagen de una de las probetas fabricadas para la etapa de pruebas relacionada con el título de este apartado y el *baklash* (probetas del tipo 1, pag. 42 de este trabajo).

La resolución del centro de maquinado, por cada paso programado en el motor, está determinada por la distancia que se desplaza el eje y el número de pasos programado.

La longitud medida, fue la distancia entre las marcas maquinadas 1 y 2 de todas las probetas de tipo 1. Dicha magnitud tenía un desplazamiento programado de 1050 pasos de motor. En la tabla 6.1. se enlistan las mediciones obtenidas con la ayuda del comparador óptico.

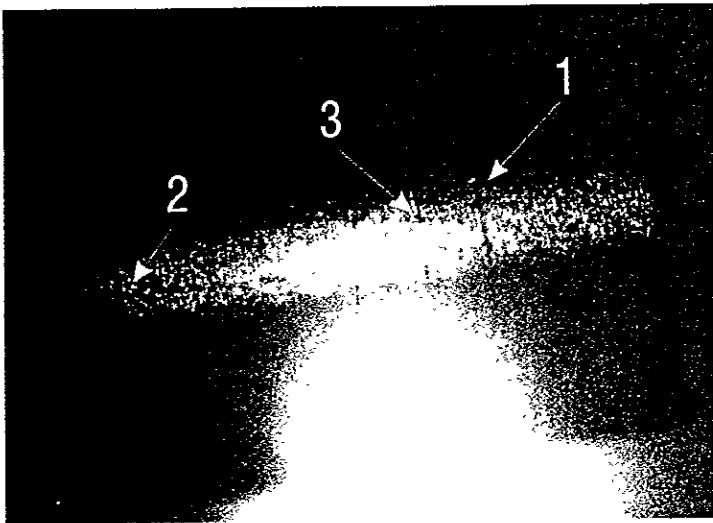


Figura 6.1. Probeta empleada para la medición de resolución de desplazamiento.

No. De Probeta	Medición [μm]
1	1979.3
2	1979.4
3	1971.0
4	1973.5
5	1971.1
6	1992.1
7	1983.1
8	1982.1
9	1979.7
10	1973.9
11	1971.1
12	1975.3
13	1975.4
14	1980.0
15	1977.3
16	1971.3
17	1985.0
18	1987.4
19	1976.3
20	1985.9

Tabla 6.1 Resolución de desplazamiento por paso de motor.

En la figura 6.2 se muestra el comportamiento del desplazamiento.

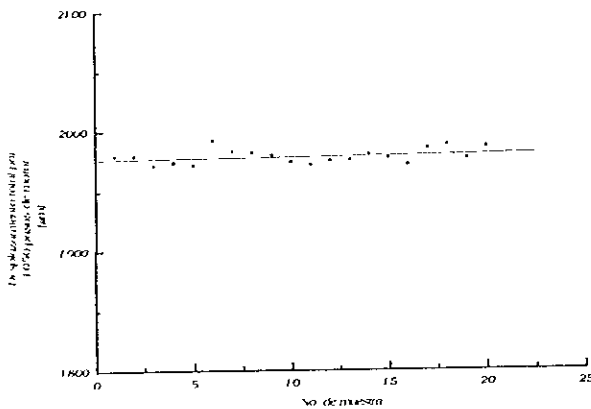


Figura 6.2. Distancia entre marcas maquinadas en la probeta de latón.

Después de realizar un análisis estadístico, los datos que se obtuvieron son los siguientes.

$$X_{\text{desplazamiento}} = 1978.5 \text{ } (\mu\text{m})$$

$$\sigma = 6.07(\mu\text{m})$$

La desviación estándar proporciona información sobre un 62.8 % de la muestra por lo que es necesario multiplicarlo por tres para tener el error en un porcentaje del 99.3 de la muestra (mathWorld, 1997), esto es,

$$3\sigma = 18.21 \text{ } (\mu\text{m})$$

por lo tanto, el error de esta medición es de:

$$\text{Error} = \pm 18.21 \text{ } (\mu\text{m})$$

Este error es promedio y se puede tomar como el promedio del área de trabajo del eje "Y" debido a que siempre se maquinó en distintas posiciones de dicho eje.

El error que se tiene es una consecuencia de las desviaciones, tanto en las cuerdas de los tornillos sinfín que forman parte de la transmisión, como de la rectitud de éstos. Lo anterior es consecuencia del método empleado para la fabricación del MCM.

Se realizó un análisis teórico que consistió en observar cuáles eran las desviaciones máximas de ángulo que se tuvieron cuando se maquinó el tornillo sinfín y la desviación que tiene el tornillo sinfín. Con esto se calculó el error aproximado que se podía tener para cada una de las causas, dando como resultado lo siguiente:

$\text{Error}_{\text{cuerdas}} \approx 33 \text{ } (\mu\text{m})$ (Error debido a la manufactura de cuerdas)

$\text{Error}_{\text{rectitud}} \approx 7 \text{ } (\mu\text{m})$ (Error debido a la falta de rectitud en el tornillo sinfín)

Por lo que el error total debido a las desviaciones antes mencionadas es de

$\text{Error} \approx \pm 20 \text{ } (\mu\text{m})$

Al comparar este error con el obtenido del análisis estadístico, nos damos cuenta de que, el error obtenidos de las probetas es menor que el calculado teóricamente, esto se debe a que el error teórico se evaluó para condiciones críticas.

La resolución experimental de desplazamiento por paso de motor se muestra en la tabla 6.2, ésta se obtiene de dividir la distancia 1-2 entre 1050, que es el número de pasos programado. En la gráfica 6.3 se muestra el comportamiento de desplazamiento real por paso de motor.

No. De Probeta	Medición (μm)	No. De Probeta	Medición (μm)
1	1.88	11	1.87
2	1.88	12	1.88
3	1.87	13	1.88
4	1.87	14	1.88
5	1.87	15	1.88
6	1.89	16	1.87
7	1.88	17	1.89
8	1.88	18	1.89
9	1.88	19	1.88
10	1.87	20	1.89

Tabla 6.2. Desplazamiento por paso de motor

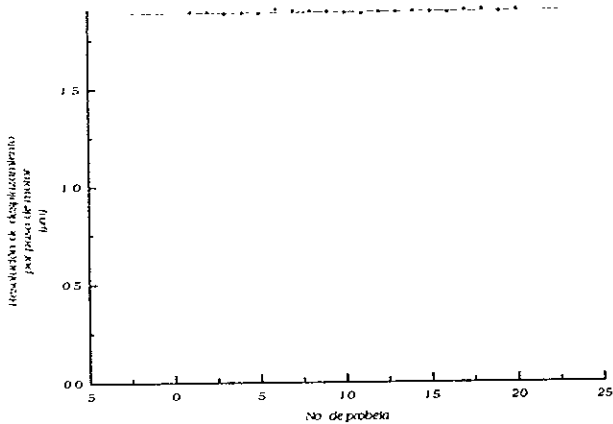


Figura 6.3. Desplazamiento por paso de motor.

Los resultados estadísticos se muestran a continuación:

$$X_{\text{desplazamiento}} = 1.88 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\sigma = 0.00575 \text{ (}\mu\text{m)}$$

En este caso la desviación estándar nos sirve para conocer el comportamiento de los puntos con respecto al valor promedio, dado que el valor es menor a la precisión del equipo empleado para las mediciones. Esta desviación estándar se puede tomar como un error aleatorio.

Backlash

Para definir el *backlash* que presenta el microcentro de maquinado de bajo costo en el eje "Y", se tomó como referencia la marca (2) de la probeta de tipo 1 que se muestra en la figura 6.1 y se realizaron mediciones de la distancia de ésta con respecto a las marcas (1) y (3).

Los resultados de estas mediciones se presentan en la tabla 6.5 y en la figura 6.4 se muestra la gráfica de los resultados.

No. De Probeta	Distancia 2-1 [μm]	Distancia 2-3 [μm]
1	1979.36	1634.95
2	1979.43	1635.36
3	1971.08	1627.06
4	1973.51	1623.18
5	1971.11	1620.09
6	1992.17	1641.56
7	1983.16	1637.74
8	1982.15	1632.12
9	1979.71	1635.24
10	1973.97	1628.80
11	1971.19	1645.16
12	1975.33	1629.09
13	1975.46	1648.21
14	1980.04	1638.69
15	1977.31	1626.37
16	1971.32	1629.09
17	1985.08	1645.21
18	1987.49	1636.81
19	1976.36	1618.30
20	1985.97	1632.73

Tabla 6.3. Longitudes para la determinación del backlash.

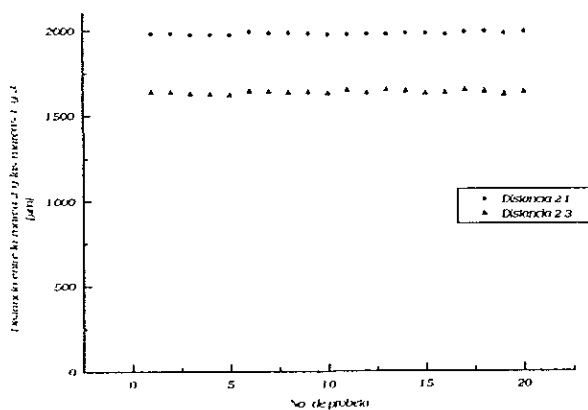


Figura 6.4. Gráfica de longitudes para la medición del backlash.

En la siguiente tabla se muestra el backlash del MCM en su eje "Y", obtenido de la diferencia entre las distancias 1-2 y 1-3.

No. de Probeta	Backlash [μm]	No. de Probeta	Backlash [μm]
1	344.41	11	326.03
2	344.08	12	346.23
3	344.01	13	327.24
4	350.33	14	341.35
5	351.02	15	350.94
6	350.61	16	342.23
7	345.42	17	339.87
8	350.03	18	350.67
9	344.47	19	358.07
10	345.17	20	353.24

Tabla 6 4. Backlash presentado en el eje "Y" del microcentro de maquinado de bajo costo.

El backlash promedio que se presentó en el eje "Y" de la micromáquina herramienta es:

$$\text{Backlash} = 345.27 \text{ } (\mu\text{m})$$

$$\sigma = 7.78 \text{ } (\mu\text{m})$$

Tras realizar un análisis de los resultados, se determinó que existen varias fuentes de este error en el microcentro de maquinado.

La primera fuente se encuentra en las cajas de reducción. El backlash que se encuentra en este punto es pequeño, puesto que sólo afecta en forma considerable el backlash que tengan los últimos engranes de dichos dispositivos. Esto se debe a que el backlash de los engranes se reduce en mismo grado que la relación de reducción que tenga la caja

de cada engrane con respecto a la salida de potencia, se puede definir el backlash total de una caja de engranes como sigue:

$$B = \sum_{i=1}^n W_i b_i$$

$$W = \frac{1}{n \cdot r}$$

Donde, B: es el backlash total; b: es el backlash por engrane; n: es el número de engranes; r: es el factor de reducción

La segunda y más importante fuente de backlash se encuentra en el acoplamiento entre de la transmisión y el carro en cada eje, esto se debe a que es necesario que exista holgura en este punto para evitar que se realice esfuerzo excesivo en las cajas de engranes para transmitir movimiento.

El tercer punto de *backlash* se encuentra en la transmisión de movimiento entre el tornillo sinfín y la tuerca que está acoplada al carro en cada eje.

La suma de estos tres parámetros dan como resultado el error total por *backlash*

Análisis Geométrico

Las probetas fabricadas para ésta etapa de pruebas, son las probetas del tipo 2 (pag. 44 de este trabajo).

El realizar el análisis geométrico de piezas fabricadas en el microcentro de maquinado nos ayudó a encontrar desviaciones generales de éste. En la siguiente tabla se muestra la descripción de las mediciones

realizadas a los microanillos que sirvieron como probetas para la realización de esta prueba.

Nombre de medición	Descripción
M1, M2, M3, M4	Son las mediciones del diámetro del exterior de la base del microanillo cada 45°.
S1, S2, S3, S4	Se refiere a la distancia que existe entre el diámetro interior y el diámetro exterior de la base del microanillo. Se tomaron medidas cada 90°.
M11, M12, M13, M14	Son las mediciones del diámetro del exterior de la parte superior del microanillo cada 45°.
N1, N2	Mediciones del diámetro que conforma el vértice el corte cónico localizado en la parte superior del anillo, mediciones cada 90°.
S11, S12, S13, S14	Se refiere a la distancia que existe entre el diámetro interior y el diámetro exterior de la base del microanillo, se tomaron medidas cada 90°.
P1, P2, P3, P4	Se refiere a la distancia que existe entre el diámetro del vértice del corte cónico y el diámetro interior de la base del microanillo. Se tomaron medidas cada 90°.
Q	Medición de la altura de la parte plana del cilindro.
H	Medición de la altura de la parte cónica del cilindro

Tabla 6.5 Tabla de mediciones realizadas a las probetas para realizar el análisis geométrico

En las figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se muestran imágenes del tipo de probeta empleada y las mediciones que se realizaron.

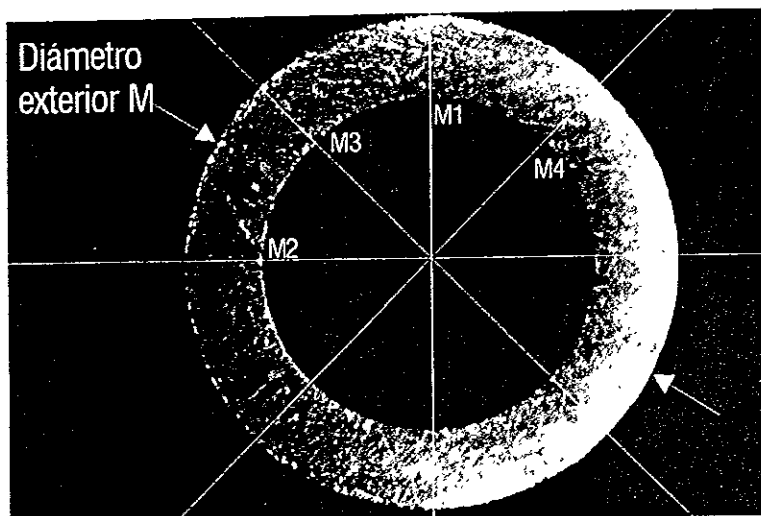


Figura 6.5. Medición del diámetro exterior de la base del microanillo.

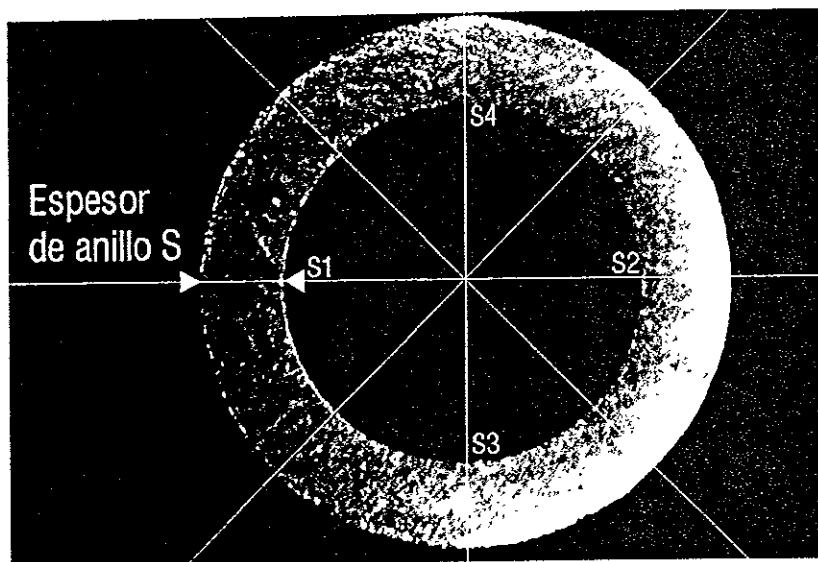


Figura 6.6. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro exterior del micro anillo en su base.

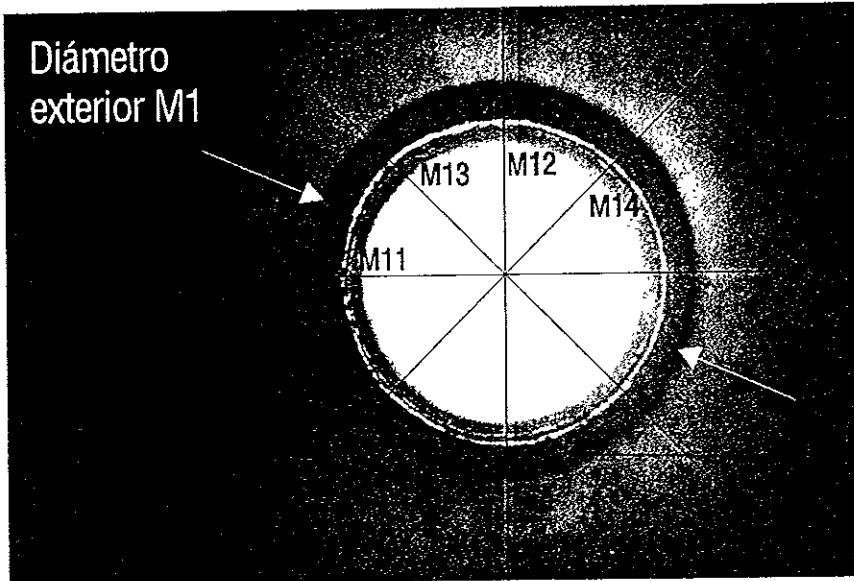


Figura 6.7. Mediciones del diámetro exterior de la parte superior del microanillo.

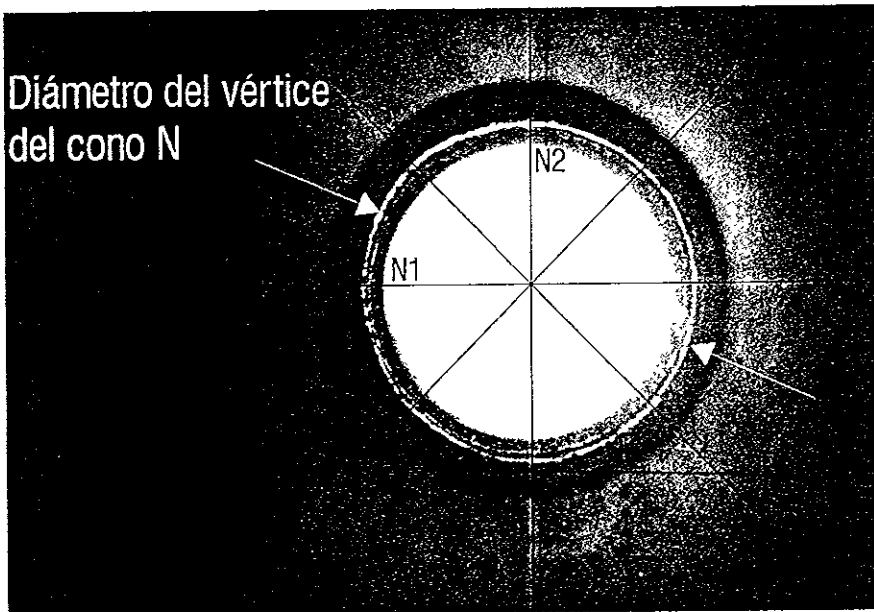


Figura 6.8 Medición de diámetro del vértice de la superficie cónica del microanillo.

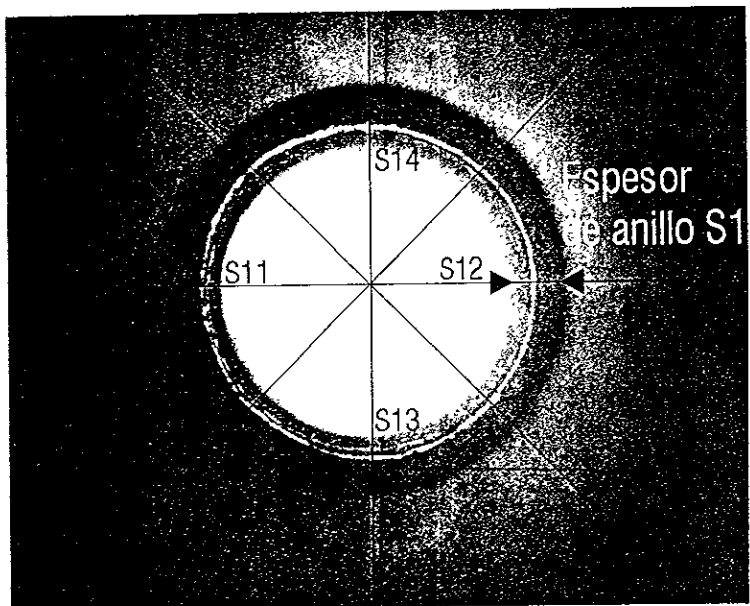


Figura 6.9. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro exterior del micro anillo en su parte superior.

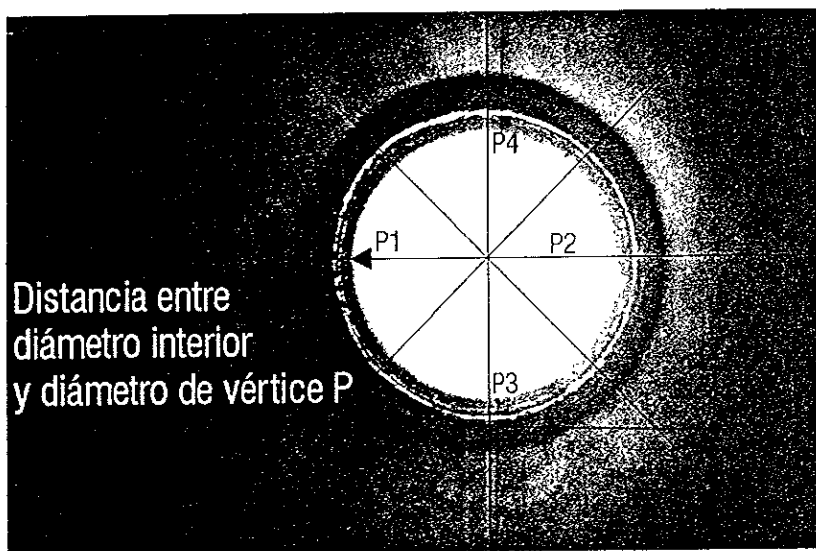


Figura 6.10. Distancia entre el diámetro interior y el diámetro del vértice de la superficie cónica.

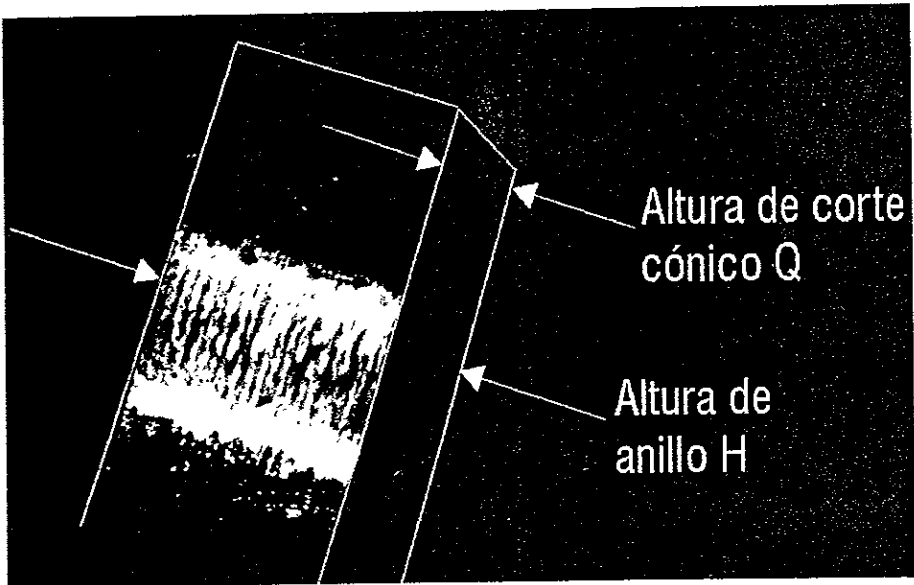


Figura 6 11. Medición de la altura de la parte plana del cilindro y de la parte cónica

De las mediciones que se registraron se obtuvieron datos promedio y desviación estándar, los cuales se muestran en la tabla 5.6 (para 20 probetas). Las tablas con todas las mediciones registradas se anexan en los apéndices.

Cabe señalar que la medida de la altura en la parte cilíndrica del anillo no se toma en cuenta en este análisis, debido a que al final del maquinado el anillo es sometido a un proceso de desbaste en la base para formar una superficie rugosa. Como el proceso es manual no se tiene control sobre esta magnitud.

Medición	Promedio [μm]	Desviación estándar (σ) [μm]	Error (3σ) \pm [μm]
M1	1260.45	6.75462	20.26386
M2	1259.75	6.75804	20.27412
M3	1257.69	7.06092	21.18276
M4	1256.88	7.1726	21.5178
S1	202.15	13.48401	40.45203
S2	200.9	11.5024	34.5072
S3	207.45	12.19782	36.59346
S4	208.4	12.21475	36.64425
M11	1259.7	6.3337	19.0011
M12	1260.65	6.30184	18.90552
M13	1255.751	6.95058	20.85174
M14	1256.776	6.32986	18.98958
N1	982.6	22.3922	67.1766
N2	980	19.07327	57.21981
S11	208.15	17.78904	53.36712
S12	203.55	9.5613	28.6839
S13	206.5	14.78442	44.35326
S14	206.7	10.55861	31.67583
P1	65.65	14.27281	42.81843
P2	60.3	12.12696	36.38088
P3	67.2	14.54792	43.64376
P4	65.4	8.39423	25.18269
Q	476.7908	34.82494	104.4748
I1	657.1851	43.68368	131.051

Tabla 6.6 Mediciones promedio obtenidas del análisis geométrico a piezas fabricadas en un microcentro de maquinado.

Los datos que se presentan en la tabla 5.6 ayudaron a definir los tipos de errores y sus fuentes.

Los errores en el maquinado de piezas con ayuda del microcentro de maquinado obedecen al tipo de maquinado que se realiza con éste, por lo que además de tener errores asociados a las características del microcentro de maquinado, también se tienen errores debido al tipo de herramienta que se emplea para el maquinado y la forma en la que se realiza éste. En la tabla 5.7 se presentan los errores encontrados dependiendo del tipo de maquinado realizado.

Tipo de maquinado	Promedio de medición [μm]	Error \pm [μm]
Maquinado de un cilindro (M)	1258.45	20.11
Maquinado de barreno (S)	205.47	38.28
Maquinado de cono (N)	981.30	62.19
Maquinado de cono (P)	64.63	37.00
Maquinado de cono (Q)	476.79	34.82

Tabla 6.7. Error por tipo de maquinado.

Conclusiones

Se presentó la caracterización de un MCM de bajo costo, con una propuesta de método indirecto. Las pruebas realizadas mostraron la conveniencia de éste método.

En el caso de la precisión relativa a su posición de origen, se puede apreciar los inconvenientes de caracterizar este equipo con los recursos con los que se contaba (Modo directo).

Las características obtenidas de la micromáquina herramienta son:

- ↷ Resolución de desplazamiento de 1.88 [μm] por paso en el eje "Y",
- ↷ Precisión en eje "Y" de ±18 [μm],
- ↷ Backlash en el eje "Y" de 345.27 [μm],
- ↷ Precisión en maquinado de ±62 [μm]

Estos resultados son satisfactorios y concuerdan con lo esperado, de acuerdo a las condiciones bajo las cuales fue desarrollado este equipo, por lo que el método propuesto resulta ser una alternativa razonable para caracterizar este tipo de equipos.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo es conveniente establecer piezas estándares que permitan realizar caracterizaciones de microcentros de maquinado. Por ejemplo, el cilindro con tres marcas que ayudó a determinar algunos parámetros del microcentro de maquinado como *backlash* y resolución por paso de motor.

Los datos obtenidos en este trabajo ayudaron a identificar que los errores que se presentan en el microcentro de maquinado son producidos tanto por características propias de la máquina como del herramental empleado para maquinar piezas

En este microcentro de maquinado es difícil realizar trabajos de muy altas tolerancias, por lo que se deben de identificar los parámetros de corrección y reducir el error mediante control (software).

Los resultados que aquí se presentaron son de ayuda para conocer el comportamiento real del microcentro de maquinado, pero no proporcionan información suficiente para realizar una corrección de errores por control de procesos. Es necesario desarrollar instrumentos que permitan evaluar todos los componentes de la máquina en forma individual por el método de medición directa, con el fin de tener información que permita realizar correcciones.

Como conclusión final se recomienda el desarrollo de un sistema de caracterización a nivel mundial que sirva como estándar para evaluar máquinas de este tipo, donde se incluya el método presentado en esta tesis.

Bibliografía

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

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

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

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

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

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

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

E.M.Kussul, D.A.Rachkovskij, T.N.Baidyk et al. Micromechanical engineering. a basis for the low cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. // J. Micromech. Microeng. - 1996 - 6. - P. 410-425.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina I., Baydyk T; CNC machine tools for low cost micro devices manufacturing; First International Conference on Mechatronics and Robotics; Saint-Petesburg, Russia; May 29-June 2, 2000; Proceedings Volume1; pp 98-103.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Apéndices

A. Programa para fabricar probetas

A continuación se presenta uno de los programas que se emplearon para el desarrollo de probetas para la caracterización de un microcentro de maquinado de bajo costo.

* Este programa fabrica cinco anillos */

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

#define A 0x378
#define B 0x379
#define C 0x37A

#define D 0x278
#define E 0x279
#define F 0x27C

#define N 250
#define NA 4 //numero de anillos

unsigned char rgrX[] = {0x9,0xC,0x6,0x3};
unsigned char rgrY[] = {0x9,0xC,0x6,0x3};
```

```

unsigned char rgrZ[]={0x6,0xC,0x9,0x3};
unsigned char rgrSpind[]={0x6,0xC,0x9,0x3};
int timer(void);
void set_channel2_0(unsigned);
unsigned get_from_channel2(void);
long X,Y,Z,Q;

float MicroPP=1.0;

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

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

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

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

int SpindForward(long dSpind,unsigned char Speed);

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

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

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

signed char aX,aY,aZ,aSpind;
long XB=50000L;
long YB=50000L;
long ZB=50000L;
long START=1000L;
unsigned char VMAX=16;
long x1,y1,z1,q1,x2,y2,z2,q2,x3,y3,z3;

main(void)
{
long i,j,k,x1,y1,z1,R,CP,YMAT,add;
/* long VY=50L; */

```

```

long Npass.
long DY.
int na;
char c1,c2.

// SpindForward(10000,20).

na=NA.

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

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

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

                X=-95L;

clrscr();

/* search of end of workpiece by cutter1 */
ZForward(3900L,16);
XForward(650L,16);
YForward(50000L,16).

m1                //start of ring fabrication cycle

printf("\n el anillo N %d",NA-na+1);
x1=X;y1=Y;z1=Z;

/* drilling */

for(k=0;k<10;k++)
{
printf("\nk=%ld",k);
YForwardRotO((100L*70L),70,20);
SpindForward(500,20);
}
SpindForward(500,20);

YBack(3500L,16);
ZForward(4020L-z1,16);
XForward(4400-x1,16);
YForward(8000,16);
XBack(1100,16);
XForwardO(305,16).

DY=1000L;

for(i=0,i<6;i++)

```

```

{
printf("\ni=%ld' i)
XForward(100L,VMAX);
YForwardRot( DY*60L,60,20);
SpindForward(200L,20);
XBack(200L,VMAX);
YBack(DY+200,VMAX);
YForward(200L,VMAX);
XForward(200L,VMAX);
DY=DY+20
}

```

```

XForward(30L,VMAX);
YForwardRot( DY*60L,60,20);
SpindForward(200L,20);
XBack(200L,VMAX);
YBack(DY+200,VMAX);
YForward(200L,VMAX);
XForward(200L,VMAX);
DY=DY+20;

```

```

x1=X;
y1=Y;
z1=Z;

```

```

XBack(x1-2500,16);
YForward(100,16);
x1=X;
ZBack(z1-2000,16);
ZForward(500,16);
XForward(3840-x1,16);
// YBack(300,16);
// YForward(150,16);

```

```

for(j=0;j<2;j++)
{
printf("\nj=%ld",j);
XForwardRot(500L*40,40,20);
XBack(500L,16);
YForward(30,16);
}
x2=X;
y2=Y;
z2=Z; //cone cutting

```

```

YForward(200,16);
XForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);

```

```

YBack(1000,16);
XForward(450,16);

```

```

XBack(250,16);
ZForward(70,16);
YForward(950,16);
YForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);
//return position

```

```

YBack(1000,16);
ZBack(300,16);
x3=X;y3=Y;z3=Z;
XBack(x3-x2,16);
YForward(y2-y3,16);
ZForward(z2-z3,16);
//repeat cone cutting

```

```

YForward(200,16);
XForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);

```

```

YBack(1000,16);
XForward(450,16);
XBack(250,16);
ZForward(70,16);
YForward(950,16);
YForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);
//return position

```

```

YBack(1000,16);
ZBack(300,16);
x3=X;y3=Y;z3=Z;
XBack(x3-x2,16);
YForward(y2-y3,16);
ZForward(z2-z3,16);
//repeat cone cutting

```

```

YForward(200,16);
XForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);

```

```

YBack(1000,16);
XForward(450,16);
XBack(250,16);
ZForward(70,16);
YForward(950,16);
YForwardRot(100L*80,80,20);
SpindForward(200,20);
//return position

```

```

/* YBack(1000,16);
ZBack(300,16);
x3=X;y3=Y;z3=Z;
XBack(x3-x2,16);
YForward(y2-y3,16);
ZForward(z2-z3,16);
//repeat cone cutting

```

```

YForward(200,16);
XForwardRot(100L*200,200,VMAX);

```

```

SpindForward(300,16)

YBack(1000,16).
XForward(450,16):
XBack(250,16)
ZForward(70,16)
YForward(950,16).
YForwardRot(100L*200,200,16):
SpindForward(300,16).
*/
//end of cone cutting

YBack(1000,16)
XForward(350,16):
ZBack(700,16)
YForward(815,16):

/* for(k=0;k<72;k++)
{
printf("\nk=%ld",k):
ZForward(700,16).
ZBack(700,16):
SpindForward(1,16)
}
*/
YBack(1000,16)
XBack(2000,16).

x2=X;y2=Y.z2=Z:

ZForward(8000-z2,16).
YForward(y1-y2-150,16).
YForward(850,16).
XForward(3300-x2,16).

/* cutting off */

for(i=0 i<8,i++)
{
printf("\ni=%ld",i)
XForwardRot(30L*80L,80L,20):
SpindForward(200,20):
}
XBack(1000,16).

//repeat fabrication of the micro ring
x1=X y1=Y.z1=Z:
YBack(1000,16)
XBack(x1-200,16):
ZBack(z1-200,16):

mc printf("\nMake correction? (y/n)",
c1=getch().
if(c1=='y')
{
printf"\X=%ld add " X)

```


ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

```
scanf("%ld",&add).  
X=X+add.  
printf("\nX=%ld ",X).  
goto mc.  
}
```

```
x1=X;y1=Y;z1=Z;  
XForward(550-x1,16),  
ZForward(3900-z1,16);  
YForward(20000,16);  
na=na-1;  
printf ("\ncontinue manufacturing? (y/n)");  
c1=getch();  
if(c1=='y')  
goto m1;
```

```
// if(na>0)goto m1.
```

```
YBack(YB,VMAX);  
YBack(75L,16);  
YStart(START,32).
```

```
XBack(XB,VMAX);  
XBack(75L,16),  
XStart(START,32);
```

```
ZBack(ZB,VMAX);  
ZBack(75L,16);  
ZStart(START,32);
```

```
return(0).  
}
```

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

```
int XForwardRot(long StepNum,unsigned char SpeedX,unsigned char SpeedRot)  
{  
long i,j,k,m,n;  
unsigned char sensors,RGR.  
  
m=StepNum-SpeedX.  
n=StepNum-SpeedRot.  
RGR=rgrX[aX].  
RGR=RGR<<4;  
outputb(D,RGR).  
RGR=rgrSpind[aSpind];  
outputb(A,RGR).  
delay(200).  
for(i=StepNum,i>0;i--)  
{
```

```

timer(),
if(i<m)
{
m=m-SpeedX;
aX=aX+1;
if(aX>3) aX=0;
RGR=rgrX[aX];
RGR=RGR<<4;
outportb(D,RGR);
X++;
}
if(i<n)
{
n=n-SpeedRot;
aSpind=aSpind+1;
if(aSpind>3) aSpind=0;
RGR=rgrSpind[aSpind];
outportb(A,RGR);
Q++;

sensors=inportb(B);
sensors=sensors&0x10;
if(sensors==0x10)
goto mXFR;
}
mXFR: delay(200);
outportb(A,0);
outportb(D,0);
return(i);
}
/* Similar to YForward with Spindle rotation. StepNum number of minimal
time steps given by timer */

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

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

```

```

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

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

```

```

    outputb(A,RGR);
    Q++;
}
sensors=inportb(B);
sensors=sensors&0x10;
if(sensors==0x10)
    goto mZFR;
}
mZFR: delay(200);
    outputb(A,0);
    outputb(D,0);
    return(i);
}
/* Similar to XForwardRot, but without cutter contact test */

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

    m=StepNum-SpeedX;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrX[aX];
    RGR=RGR<<4;
    outputb(D,RGR);
    RGR=rgrSpind[aSpind];
    outputb(A,RGR);
    delay(200);
    for(i=StepNum;i>0;i--)
    {
        timer();
        if(i<m)
        {
            m=m-SpeedX;
            aX=aX+1;
            if(aX>3) aX=0;
            RGR=rgrX[aX];
            RGR=RGR<<4;
            outputb(D,RGR);
            X++;
        }
        if(i<n)
        {
            n=n-SpeedRot;
            aSpind=aSpind+1;
            if(aSpind>3) aSpind=0;
            RGR=rgrSpind[aSpind];
            outputb(A,RGR);
            Q++;
        }
    }
    mXFR: delay(200);
    outputb(A,0);
    outputb(D,0);
    return(i);
}

```

```
/* Similar to YForwardRot, but without cutter contact test */
```

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

    m=StepNum-SpeedY;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrY[aY];
    RGR=RGR<<4;
    joint=RGR|rgrSpind[aSpind];
    outputb(A,joint);
    delay(200);
    for(i=StepNum,i>0;i--)
    {
        timer();
        if(i<m)
        {
            m=m-SpeedY;
            aY=aY+1;
            if(aY>3) aY=0;
            RGR=rgrY[aY];
            RGR=RGR<<4;
            joint=(joint&0xf)|RGR;
            outputb(A,joint);
            Y++;
        }
        if(i<n)
        {
            n=n-SpeedRot;
            aSpind=aSpind+1;
            if(aSpind>3) aSpind=0;
            RGR=rgrSpind[aSpind];
            joint=(joint&0xf0)|RGR;
            outputb(A,joint);
            Q++;
        }
    }
    mYFR: delay(200);
        outputb(A,0);
        outputb(D,0);
        return(i);
}
```

```
/* Similar to ZForwardRot, but without cutter contact test */
```

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

    m=StepNum-SpeedZ;
    n=StepNum-SpeedRot;
    RGR=rgrZ[aZ];
    outputb(D,RGR);
    RGR=rgrSpind[aSpind];
```

```

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

```

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

```

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

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

```

```

mXF delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}
/* Moves the carriage Y on the dY steps and returns 0,
if cutter has contact with workpiece, stops the movement and returns
the number of steps, which were not made to reach dY */
int YForward(long dY,unsigned char Speed)
{
long i,j;
unsigned char sensors,RGR;

for(i=dY;i>0;i--)
{
sensors=inportb(B);
sensors=sensors&0x10;
if(sensors==0x10)
goto mYF;
RGR=rgrY[aY];
RGR=RGR<<4;
outportb(A,RGR);
Y++;
aY=aY+1;
if(aY>3)
aY=0;
for(j=0;j<Speed;j++)
timer(i);
}
mYF delay(200);
outportb(A,0);
return(i);
}

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

```

```

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

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

```

```

    for(j=0;j<Speed;j++)
        timer();
}
mZF. delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}

/* Moves the carriage X on the dX steps and returns 0, don't test sensors */
int XForward0(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

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

/* Moves the carriage Y on the dY steps and returns 0, don't test sensors */
int YForward0(long dY,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

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

```



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

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

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

```
/* Rotates Spindle forward on dSpind steps, returns 0 */
```

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

    for(i=dSpind,i>0,i--)
    {
        RGR=rgrSpind[aSpind];
        outputb(A,RGR);
        Q++;
        aSpind=aSpind+1;
        if(aSpind>3)
            aSpind=0;
        for(j=0;j<Speed;j++)
            timer();
    }
    delay(200);
    outputb(A,0);
    return(i);
}
```

```
/* Moves the carriage X back on the dX steps and returns 0,
if carriage is moved to home position, stops the movement and returns
the number of steps, which were not made to reach dX */
```

```
int XBack(long dX,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
```

unsigned char sensors,RGR;

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

```
{
  sensors=inportb(B);
  sensors=sensors&0x40;
  if(sensors==0x40)
    goto mXB;
  RGR=rgrX[aX];
  RGR=RGR<<4;
  outportb(D,RGR);
  X--;
  aX=aX-1;
  if(aX<0)
    aX=3;
  for(j=0;j<Speed;j++)
    timer();
}
mXB: delay(200);
outportb(D,0);
return(i);
}
```

/* Moves the carriage Y back on the dY steps and returns 0, if carriage is moved to home position, stops the movement and returns the number of steps, which were not made to reach dY */

int YBack(long dY,unsigned char Speed)

```
{
  long i,j;
  unsigned char sensors,RGR;
```

for(i=dY,i>0;i--)

```
{
  sensors=inportb(B);
  sensors=sensors&0x80;
  if(sensors!=0x80)
    goto mYB;
  RGR=rgrY[aY];
  RGR=RGR<<4;
  outportb(A,RGR);
  Y--;
  aY=aY-1;
  if(aY<0)
    aY=3;
  for(j=0;j<Spced;j++)
    timer();
}
```

```
mYB: delay(200);
outportb(A,0);
return(i);
```

}

/* Moves the carriage Z back on the dZ steps and returns 0, if carriage is moved to home position, stops the movement and returns the number of steps, which were not made to reach dZ */

```

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

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

```

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

```

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

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

```

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

```

int YBack0(long dY,unsigned char Speed)
{

```

```

long i,j;
unsigned char sensors,RGR;

for(i=dY,i>0,i--)
{
  RGR=rgrY[aY];
  RGR=RGR<<4;
  outputb(A,RGR);
  Y--;
  aY=aY-1;
  if(aY<0)
    aY=3;
  for(j=0,j<Speed;j++)
    timer();
}
mYB: delay(200);
outputb(A,0);
return(i);
}
/* Moves the carriage Z back on the dZ steps and returns 0, don't tests
sensors */

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

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

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

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

  for(i=dSpind,i>0,i--)
  {

```

```

RGR=rgrSpind[aSpind]:
outputb(A,RGR);
Q-:
aSpind=aSpind-1;
if(aSpind<0)
    aSpind=3;
for(j=0;j<Speed;j++)
    timer();
}
delay(200);
outputb(A,0);
return();
}
/* Moves carriage X forward to the initial position X=0 */

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

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

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

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

```

```

RGR=RGR<<4
outportb(A,RGR);
aY=aY+1;
if(aY>3)
    aY=0;
for(j=0;j<Speed;j++)
    timer();
}
mYS: delay(200);
outportb(A,0);
Y=0;
return(i);
}
/* Moves carriage Z forward to the initial position X=0 */
int ZStart(long dZ,unsigned char Speed)
{
    long i,j;
    unsigned char sensors,RGR;

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

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

    xbyte=inportb(0x61);
    xB=xbyte|0x03;
    outportb(0x61,xB);
    T1=10000;
}
aaa set_channel2_0(T1);

```

```

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

```

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

```

int ZPB(long dZ,unsigned char Speed)

```

```

{
long i,j;
unsigned char sensors,RGR;

```

```

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

```

```

}

```

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

```

int ZPS(long dZ,unsigned char Speed)

```

```

{
long i,j;
unsigned char sensors,RGR;

```

```

for(i=dZ;i>0;i--)
{
sensors=inportb(B);
sensors=sensors&0x10;
if(sensors!=0x10)
goto mZS;
RGR=rgrZ[aZ];
outportb(D,RGR);
Z++;
aZ=aZ+1;
}

```

```

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

// .....

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

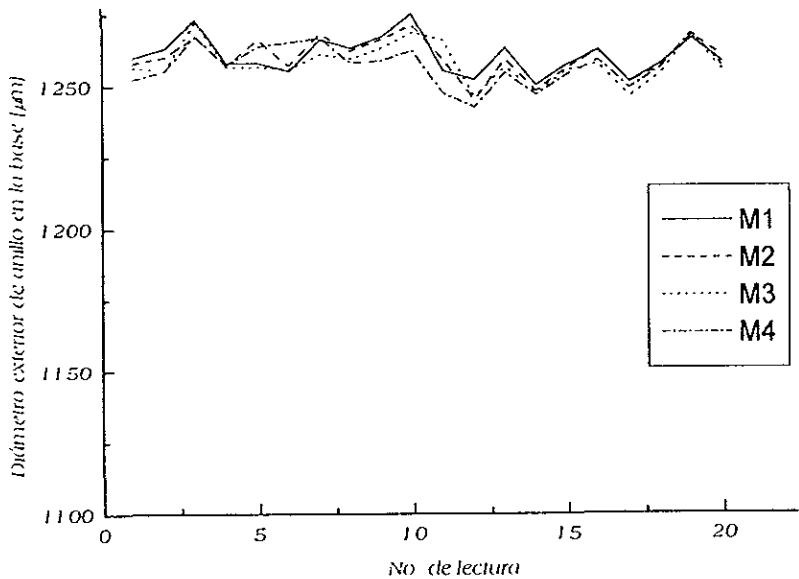
    asm mov al,0x80;
    asm out 0x43,al;
    asm in al,0x42;

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

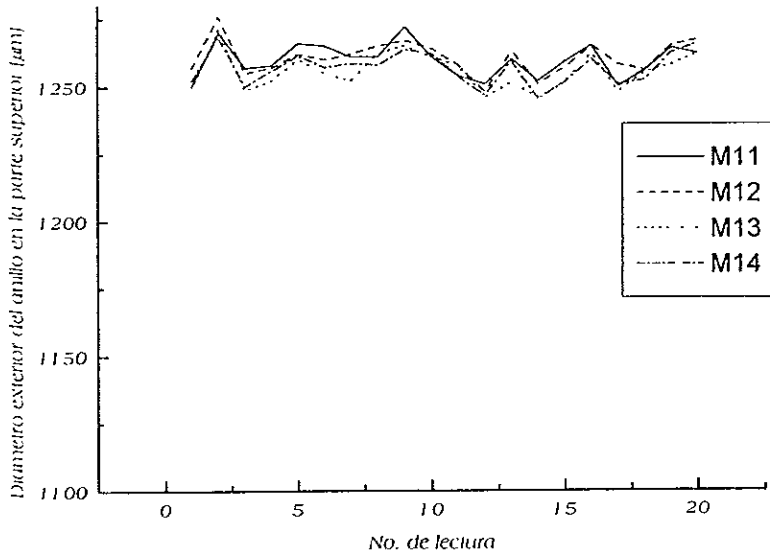
```


B. Datos de lecturas medidas y gráficas

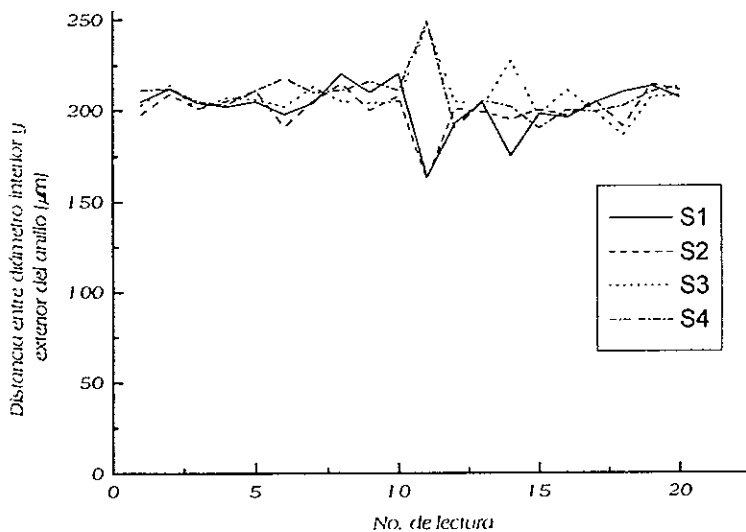
Medición de diámetro de la base del anillo				
No. de medición	M1 [μm]	M2 [μm]	M3 [μm]	M4 [μm]
1	1260	1258	1256.53	1252.29
2	1263	1260	1255.11	1255.11
3	1273	1267	1272.09	1267.14
4	1258	1257	1256.53	1257.24
5	1258	1266	1256.53	1263.60
6	1255	1257	1255.82	1265.01
7	1266	1268	1260.77	1266.43
8	1263	1262	1259.36	1257.94
9	1267	1266	1262.89	1258.65
10	1275	1271	1268.55	1262.19
11	1255	1259	1265.72	1247.34
12	1252	1245	1245.92	1242.39
13	1263	1259	1256.53	1254.41
14	1250	1248	1247.34	1246.63
15	1257	1256	1255.11	1253.70
16	1262	1262	1257.24	1258.65
17	1251	1251	1245.92	1248.75
18	1257	1256	1253.70	1255.82
19	1266	1267	1267.14	1267.84
20	1258	1260	1255.11	1256.53



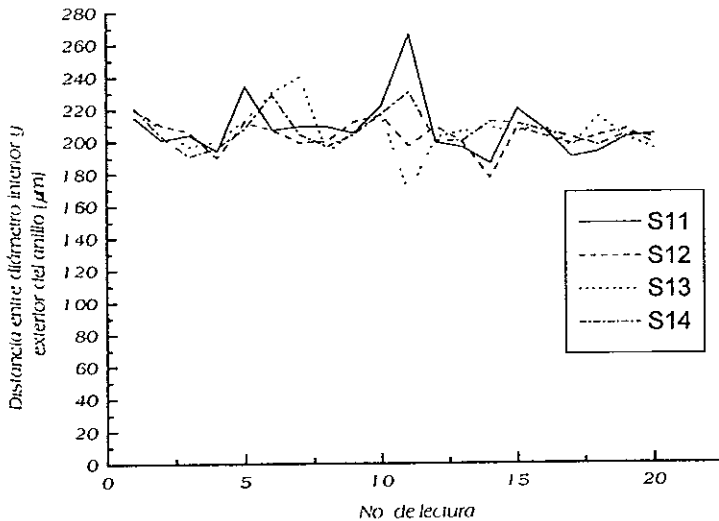
Medición de diámetro de la parte superior del anillo				
No de medición	M11[μm]	M12[μm]	M13[μm]	M14[μm]
1	1250	1257	1248.75	1252.29
2	1270	1276	1271.38	1268.55
3	1257	1255	1248.75	1250.16
4	1258	1257	1252.29	1255.82
5	1266	1262	1260.06	1261.48
6	1265	1260	1255.11	1257.24
7	1261	1262	1252.29	1258.65
8	1261	1265	1262.19	1257.94
9	1272	1267	1265.01	1263.60
10	1261	1264	1260.77	1262.19
11	1254	1258	1257.94	1253.70
12	1251	1248	1245.92	1246.63
13	1260	1263	1251.58	1259.36
14	1252	1251	1245.92	1245.22
15	1259	1257	1251.58	1251.58
16	1265	1265	1262.19	1260.06
17	1250	1258	1248.04	1250.87
18	1256	1256	1255.11	1252.29
19	1264	1265	1257.94	1262.19
20	1262	1267	1262.19	1265.72



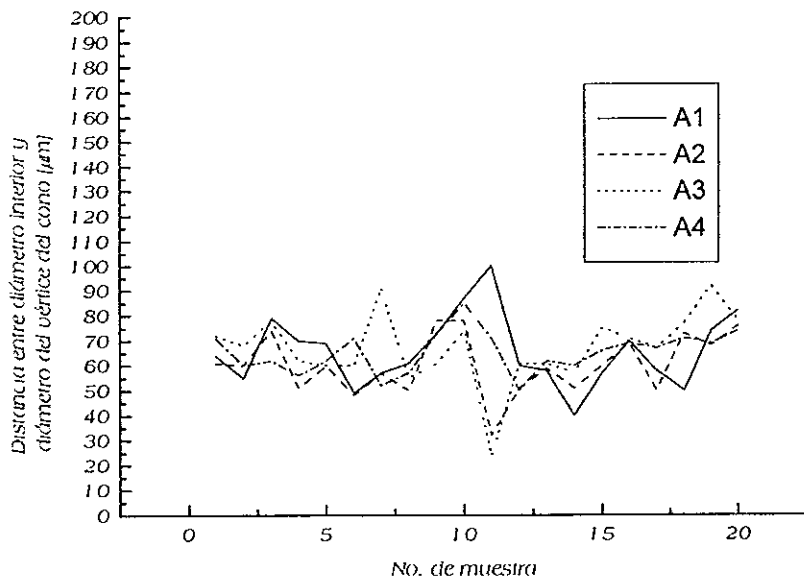
Distancia entre diámetro interior y exterior del anillo				
No. de medición	S1 (μm)	S2 (μm)	S3 (μm)	S4 (μm)
1	205	198	203.00	211.00
2	212	209	214.00	212.00
3	204	201	201.00	205.00
4	202	205	207.00	203.00
5	205	211	206.00	211.00
6	198	191	202.00	218.00
7	204	205	213.00	210.00
8	220	215	205.00	211.00
9	210	200	204.00	216.00
10	220	208	205.00	211.00
11	163	162	247.00	249.00
12	193	201	205.00	190.00
13	204	199	202.00	205.00
14	175	195	227.00	202.00
15	198	200	197.00	190.00
16	196	197	211.00	200.00
17	204	205	199.00	199.00
18	210	191	186.00	202.00
19	213	214	207.00	210.00
20	207	211	208.00	213.00



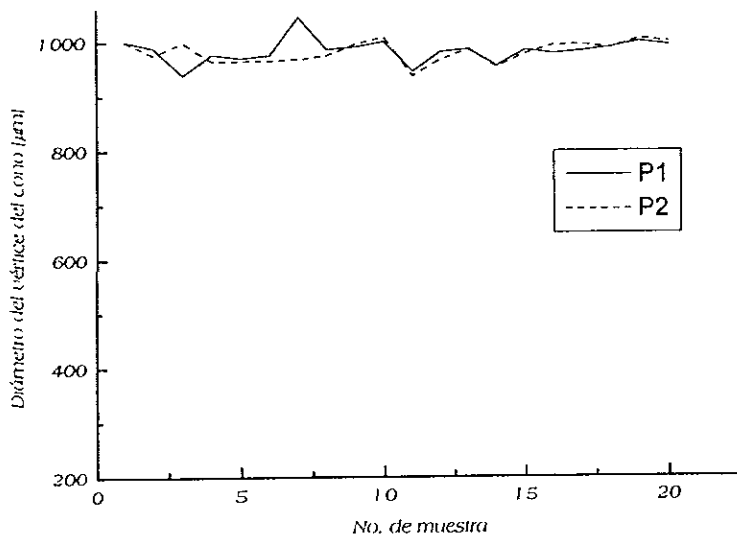
Distancia entre diámetro interior y exterior del anillo				
No. de medición	S11 (μm)	S12 (μm)	S13 (μm)	S14 (μm)
1	215	220	220.00	221.00
2	201	210	208.00	203.00
3	204	206	197.00	191.00
4	194	190	200.00	196.00
5	234	212	213.00	208.00
6	207	207	230.00	229.00
7	209	199	240.00	204.00
8	209	200	193.00	197.00
9	205	212	206.00	204.00
10	222	216	216.00	217.00
11	266	197	168.00	230.00
12	199	209	202.00	200.00
13	196	199	206.00	200.00
14	186	177	208.00	212.00
15	220	208	206.00	211.00
16	207	203	209.00	206.00
17	190	198	196.00	202.00
18	193	203	215.00	197.00
19	202	207	202.00	204.00
20	204	198	195.00	202.00



Distancia entre diámetro interior y diámetro del vértice del cono				
No. de medición	P1 (μm)	P2 (μm)	P3 (μm)	P4 (μm)
1	64	61	72.00	71.00
2	55	60	68.00	60.00
3	79	74	78.00	62.00
4	70	51	62.00	56.00
5	69	60	60.00	62.00
6	49	48	60.00	71.00
7	57	57	91.00	52.00
8	61	50	55.00	57.00
9	73	78	61.00	73.00
10	87	78	74.00	85.00
11	100	32	24.00	71.00
12	60	51	61.00	50.00
13	58	59	61.00	62.00
14	40	51	57.00	60.00
15	57	60	75.00	66.00
16	70	69	71.00	69.00
17	58	50	67.00	67.00
18	50	73	77.00	71.00
19	74	68	92.00	69.00
20	82	76	78.00	74.00



Diámetro del vértice del cono		
No. de medición	P1 (μm)	P2 (μm)
1	1001	1000
2	988	975
3	938	998
4	976	964
5	969	964
6	975	965
7	1045	967
8	985	974
9	990	995
10	1000	1008
11	945	936
12	981	966
13	985	985
14	954	952
15	983	977
16	977	992
17	982	993
18	988	987
19	998	1004
20	992	998



Altura del corte cónico	
No. de medición	P1 (μm)
1	477
2	438
3	483
4	429
5	435
6	461
7	476
8	453
9	498
10	508
11	426
12	473
13	444
14	467
15	449
16	453
17	474
18	444
19	456
20	450

