

01180



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



"METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN  
PARA MICROEQUIPO"

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

(ÁREA MECÁNICA)

P R E S E N T A :

M. EN I. ALBERTO CABALLERO RUIZ

DIRIGIDA POR:  
DR. ERNST KUSSUL  
DR. SAÚL SANTILLÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA

ABRIL, 2005

m 343412



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

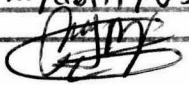
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alberto Caballero Ruiz.

FECHA: 21/abril/05

FIRMA: 

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

*Este trabajo se desarrolló en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico UNAM con la tutoría del Dr. Ernst Kussul y con aportaciones del Dr. Saúl Santillán (Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de ingeniería UNAM) y del M. en I. Leopoldo Ruiz Huerta. El trabajo fue apoyado por los proyectos DGAPA IN-112102 e IX-119504 y por CONACyT 33944-U y 39395-U.*

A mis padres Guadalupe y Margarito

que siempre han estado a mi lado brindándome todo su amor y apoyo para que los grandes proyectos de mi vida puedan ser tangibles.

A mis hermanos Víctor y Leonor

que siempre me han apoyado y brindado su cariño y sus consejos para elegir el mejor camino.

A Leopoldo

por su valiosa amistad, por los buenos momentos que hemos compartido y por su apoyo durante la realización de este proyecto.

A Javier

por su valiosa amistad

A Gabriel

por su amistad y la motivación que siempre transmite.

A mis familiares y amigos

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

## ***AGRADECIMIENTOS***

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Ernst Kussul por su amistad, asesoría y apoyo que siempre me han motivado y 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 a la Dra. Tatyana Baidyk, a la Dra. Graciela Velasco, al Sr. Mario Rodríguez, a Héctor Silva, a Mauricio Algalán, a Angélica Zamora y a Oscar por su amistad y apoyo durante la realización de este trabajo.

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

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

A mis sinodales: Dr. Ricardo Chicurel, Dr. Marcelo López, Dr. Vicente Borja, Dr. Arturo Barba, Dr. Jesús Manuel Dorador, Dr. Saúl Santillán y Dr. Ernst Kussul por sus comentarios y aportaciones.

Al CONACYT por su apoyo.

Y por supuesto, a la **Universidad Nacional Autónoma de México** mi alma mater.

# Índice

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
Micromecánica .....	3
Micromecánica en México .....	10
Reducción de errores en MMH´s .....	12
Errores geométricos .....	13
Expansiones térmicas .....	15
Rigidez .....	18
Escalamiento de masa .....	23
Fuerza de inercia (Movimiento lineal con aceleración uniforme) .....	24
Fuerza centrífuga .....	25
Deformaciones elásticas .....	26
Vibraciones .....	28
Errores excepcionales (errores que no decrecen cuando los tamaños disminuyen)....	29
¿Por qué evaluar microequipo?.....	29
Evaluación de microequipo.....	30
Características de las micromáquinas desarrolladas hasta nuestros días. ....	37
Métodos existentes para evaluar máquinas herramienta CNC.....	41
Tipos de técnicas empleadas para la evaluación de máquinas herramienta.....	43
Interferómetro láser.....	43
Barra telescópica con esferas.....	44
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>47</b>
Objetivo .....	53
Alcances .....	53
Aportaciones del trabajo.....	53
<b>3. PROPUESTA .....</b>	<b>54</b>

Ventajas del uso de un método de evaluación directa en la optimización de MMH's aplicado a la manufactura de microflechas.....	54
Proceso de desbaste y careado.....	56
Medición de la flecha .....	56
Cálculo del diámetro y centro de la flecha .....	58
Determinación de la posición adecuada del cortador y de la profundidad de corte ...	61
Propuesta para evaluar MMH's.....	67
Técnicas para medir desplazamientos en MMH's .....	68
Determinación del error en MMH's .....	77
<b>4. PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
Recomendaciones .....	107
Trabajo a futuro .....	108
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>114</b>
Publicaciones realizadas durante este proyecto de investigación.....	114



# Índice de tablas y figuras

Figura 1. Imágenes de mecanismos desarrollados empleando tecnologías microelectrónicas: a) micromotor electrostático [15], b) microengrane [16].	4
Figura 2. Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa [17].	5
Figura 3. En la figura (a) se muestra un microrobot de inspección, en la figura (b) una micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Hedi [6]; finalmente, en la figura (c) se muestra un microvehículo eléctrico de vuelo libre [11].	6
Figura 4. Microtorno Japonés [18].	7
Figura 5. Prototipo de microcentro de maquinado con dimensiones de 100x100x130 mm desarrollado por el Dr. Kussul en Ucrania.	7
Figura 6. (a) Micromáquina basada en estructuras paralelas con dimensiones de 50x50x50 mm [25]; (b) Microfresadora con dimensiones de 119x119x102mm [18]; (c) micromanipulador [19]; (d) micromanipulador de dos dedos (48 mm de diámetro y 65mm de altura) [9]; (e) Microtorno desarrollado por la empresa NanoWave (dimensiones de la base: 100x150 mm) [10].	8
Figura 7. Primera microfábrica sobre mesa semiautomatizada (arriba). Dispositivo micromecánico (rodamiento) desarrollado mediante un proceso automático en dicha microfábrica (abajo) [12].	9
Figura 8. Microfábrica desarrollada por la empresa Olympus Optics Co., Ltd. [13].	10
Figura 9. Microcentro de maquinado desarrollado en México.	11
Figura 10. Fuentes de error debido a errores geométricos.	13
Figura 11. Error producido por irregularidades en el tornillo sinfin de la transmisión de los ejes de una máquina.	14
Figura 12. Esquema que explica el origen de la diferencia de temperatura en máquinas de diferente tamaño.	16
Figura 13. Barra sometida a una fuerza de compresión.	19
Figura 14. Barra sometida a flexión.	20
Figura 15. Barra sometida a flexión (Caso 2).	21
Figura 16. Torsión de una barra.	22
Figura 17. Esquema para el cálculo de la fuerza de inercia.	24
Figura 18. Esquema para el cálculo de fuerza centrífuga.	26
Figura 19. Barreno de unión sin uso (izquierda) y barreno de unión con desgaste natural por uso (derecha) [25].	32
Figura 20. Resultados obtenidos en la medición geométrica de micropiezas utilizando un sistema de efecto <i>timel</i> [31].	33
Figura 21. Vista general de la máquina de medición por coordenadas basada en paralelogramos [32].	34
Figura 22. Propuesta de micromáquina de medición por coordenadas basada en paralelogramos [33].	35
Figura 23. Esquema general de la $\mu$ MMC desarrollada por el Dr. Mitsui [34].	36
Figura 24. Esquema general de la $\mu$ MMC desarrollada por el Dr. Ogura [35].	37
Figura 25. Sistema de ejes del microtorno japonés [7].	38
Figura 26. Resultados obtenidos con el microtorno japonés [7].	38

Figura 27. Algunas de las partes del microtorno producido por la empresa Nano Corporation. (a) Ejes X y Z del torno;(b) imagen del microservoactuador;(c) imagen del usillo y su motor [10].	39
Figura 28. Resultados obtenidos con el microtorno de la empresa Nano Corporation [10].	39
Figura 29. Algunas de las partes de la MMH desarrollada en el CCADET, UNAM. (a) Motores de pasos y cajas de engranes; (b) Sistema de guía de uno de los ejes de la MMH.	40
Figura 30. Interferómetro láser.	44
Figura 31. Interferómetro láser autoalinado para mediciones de error en máquinas multieje.	45
Figura 32. Sistema de barra con esferas.	46
Tabla 1. Comparativa entre tres tipos de MMH's (Los datos de precios fueron obtenidos de charlas realizadas con miembros de los grupos que desarrollaron dichos microequipos durante el "International Workshop on Microfactories 2004" celebrado en la ciudad de Shanghai, China.)	50
Figura 33. Diagrama de flujo del sistema de control adaptativo.	56
Figura 34. Rectificado de la materia prima. a) Materia prima con defectos; b) Materia prima careada.	56
Figura 35. Configuración del sistema de control adaptativo para la manufacturar flechas finas. (Flecha, disco de medición y cortador).	57
Figura 36. a) Vista transversal del sistema de control adaptativo para la manufactura de flechas finas; b)-e) Secuencia de movimientos que genera el programa cuando se cumple la condición de contacto eléctrico.	59
Figura 37. a) Vista transversal del sistema de control adaptativo para la manufactura de flechas finas; b)-e) Secuencia de movimientos que deben cumplirse para que el programa termine su ejecución.	60
Figura 38. Posición adecuada del cortador con respecto al eje de giro de la flecha.	62
Figura 39. Configuración del Sistema de control para manufacturar flechas finas. (Flecha, cortador y disco metálico).	63
Figura 40. Datos experimentales obtenidos con el disco de medición.	63
Figura 41. Resultado obtenido con el algoritmo para encontrar los parámetros de la circunferencia que se ajusta a los valores experimentales obtenidos a partir del disco de medición. a) Gráfica completa, b) Acercamiento para observar con más detalle las diferencias que hay entre los valores experimentales y la curva teórica.	64
Figura 42. Datos experimentales obtenidos con el cortador.	65
Figura 43. Resultado obtenido con el algoritmo para encontrar los parámetros de la circunferencia que se ajusta a los valores experimentales obtenidos a partir del cortador. a) Gráfica completa, b) Acercamiento para observar con más detalle las diferencias que hay entre los valores experimentales y la curva teórica.	66
Figura 44. Flecha fabricada en la micromáquina desarrollada en la UNAM.	66
Tabla 2. Alternativas para medir desplazamientos en MMH's [47-50].	68
Figura 45. Técnica de medición empleando una MMC.	70
Figura 46. Hoja de desviaciones de un balín de 5/16 pulgadas de diámetro soldado con estaño al vástago.	72
Figura 47. Hoja de desviaciones de un balín de 5/16 pulgadas de diámetro pegado con resina epóxica al vástago.	72
Figura 48. Esquema de sistema de medición de desplazamientos para la MMH.	73
Figura 49. Grupos de mediciones.	74
Figura 50. Procedimiento para realizar las mediciones de desplazamiento en la MMH.	75

Figura 51. a) Disco para sujetar el balín de referencia; b) Matriz de mediciones.....	76
Figura 52. Correlación entre los puntos obtenidos experimentalmente y la curva del perímetro correspondientes al balín real.....	77
Figura 53. Diagrama de flujo para el algoritmo de localización del centro de la esfera.....	81
Tabla 3. Ecuaciones matemáticas para los errores traslacionales.....	83
Figura 54. (a) Esfera afectada por los errores de la MMH; (b) Comparación de la esfera con errores con respecto a la esfera ideal.....	85
Figura 55. Diagrama de flujo para el algoritmo que determina los coeficientes asociadas a las ecuaciones de error en MMH's.....	89
Figura 56. Sistema de esferas para evaluar una micromáquina herramienta.....	90
Figura 57. Software de control del primer prototipo de MMH.....	91
Figura 58. Mediciones experimentales de la superficie de la esfera patrón en una posición fija dentro del volumen de trabajo de la MMH.....	92
Figura 59. Sistema de esferas para evaluar una micromáquina herramienta.....	94
Figura 60. Diferencia entre mediciones y puntos teóricos. (a) Plano de medición X-Y; (b) plano de medición X-Z; (c) plano de medición Y-Z.....	95
Figura 61. Variaciones en la determinación del centro de la esfera patrón en 10000 experimentos.....	96
Figura 62. Variaciones en la determinación del centro de la esfera patrón en 10000 experimentos con el algoritmo genético optimizado.....	97
Figura 63. Posiciones de B2 dentro del espacio de trabajo de la MMH.....	98
Tabla 4. Error de las posiciones de B2 cuando el disco de sujeción se encuentra a una distancia de 17 mm del husillo.....	98
Figura 64. Diagrama de flujo del algoritmo para determinar los coeficientes de las ecuaciones de error.....	101
Figura 65. Diferencia entre mediciones ajustadas mediante as ecuaciones de error y los puntos teóricos. (a) Plano de medición X-Y; (b) plano de medición X-Z; (c) plano de medición Y-Z.....	103
Tabla 5. Constantes de error calculadas en cinco procesos para una posición de la esfera de referencia.....	104
Tabla 6. Centros corregidos de cinco procesos para una posición de la esfera de referencia.....	104

# Introducción

El auge en el desarrollo de microdispositivos mecánicos se inició a mediados de los 80's. Este desarrollo se ha llevado a cabo en forma casi paralela en varias partes del mundo empleando diferentes métodos para la fabricación, tales como la microlitografía, maquinado por láser, electroerosión, mecánica convencional, etc.

La propuesta de generar microdispositivos mecánicos mediante el uso de técnicas de la mecánica convencional surge en Japón y Ucrania hacia mediados de los 90's. La idea básica es crear máquinas herramientas acordes a la escala de las piezas que se deseen fabricar. Más allá de crear micromáquinas herramienta (MMH's), se planteó la idea de desarrollar microfábricas como una alternativa para la producción de pequeños dispositivos mecánicos reduciendo errores y consumo de recursos tales como energía, materiales y espacio de trabajo. Una microfábrica cuenta con unidades de proceso (conformadas por MMH's), de ensamble, de control de calidad, de transporte, de mantenimiento, entre otras [17].

En los inicios de estas propuestas los investigadores se dieron a la tarea de desarrollar MMH's que permitieran comprobar las hipótesis generadas en esta área de investigación. A finales de los 90's, se reportan dos MMH's: una de ellas es un microtorno desarrollado en el *Mechanical Engineering Laboratory (MEL)* del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* en Japón[7]; y el otro es un Microcentro de maquinado desarrollado en el *International Research and Training Center of UNESCO/IIP of Information Technologies and System* de la *National Academy of Sciences of Ukraine* [8]. A partir de ese momento surge un interés a nivel mundial por realizar investigaciones en el área Micromecánica. Países como Alemania, Corea, Noruega, Suiza, USA y México muestran interés por esta área [2-14]. En el año 2000 se culmina el desarrollo del primer microcentro de maquinado mexicano dentro del

Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.

La tecnología necesaria para generar microequipo en general está constituida por un entorno interdisciplinario donde conviven varias áreas de la ciencia y la ingeniería, como lo son: la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, la física, la química, etc. Actualmente, con la finalidad de facilitar el avance de este tipo de tecnología, incrementar las cualidades de este tipo de dispositivos y brindar expectativas a las áreas de aplicación, surge la necesidad de establecer mecanismos para su evaluación: tanto para los sistemas de microfabricación, como para los microdispositivos desarrollados.

Cuando se generan dispositivos micromecánicos a partir de micromáquinas herramienta (MMH's), los elementos que se manufacturan dependen de las características de las propias MMH's, así como de los sistemas de control empleados. Por lo anterior, resulta una necesidad primordial el desarrollo de métodos de evaluación para MMH's. con el fin de conocer sus características de precisión y aprovechar esto para proponer alternativas que permitan mejorar su rendimiento, así como también, para establecer las capacidades de aplicación de esta tecnología.

Actualmente existen algunas técnicas empleadas para la caracterización dimensional de MMH's, las cuales se basan en el uso de dispositivos tales como: *encoders* ópticos, microscopios de efecto túnel, etc. Estos dispositivos, empleados en la evaluación de microequipo, son muy costosos y difíciles de implementar.

En este trabajo se desarrolla una propuesta de metodología para la evaluación de errores en microequipo de bajo costo, la cual hace uso de una técnica de medición de fácil implementación. La propuesta aquí presentada es aplicada a un prototipo de MMH desarrollada en LMM como caso de estudio. El resultado de este trabajo permitirá, además de establecer las características de precisión en MMH's, crear mecanismos de evaluación que permitan el desarrollo de sistemas de control para la optimización de características de precisión en MMH's.

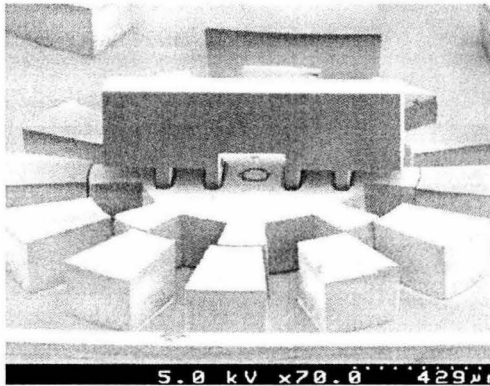
# 1. Antecedentes

## Micromecánica

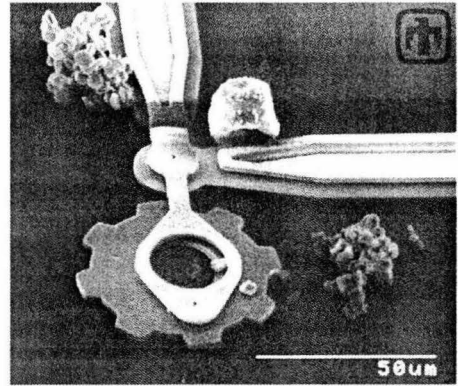
Durante la época de los 80's surgen varias propuestas para desarrollar sistemas productivos con la finalidad de generar microdispositivos con dimensiones menores a un milímetro. Dichos microdispositivos debían estar conformados, tanto por partes microelectrónicas, como por partes micromecánicas [1,2].

En el caso de las partes microelectrónicas no existían problemas para generarlas, puesto que se tenían avances significativos en el desarrollo de circuitos integrados durante aquel tiempo. Por otro lado, el desarrollo de partes micromecánicas representaba un desafío importante para los investigadores de esa época debido a que, en ese entonces, no existían tecnologías mecánicas para desarrollar mecanismos tan pequeños como los requeridos para el desarrollo de sistemas micromecánicos. Los desarrollos de componentes mecánicos en ese entonces se manufacturaban con máquinas herramientas de tamaño convencional (por ejemplo un torno podía tener dimensiones mínimas de hasta 80x40x40 cm), con las cuales se generaban piezas con dimensiones de algunos milímetros. Por lo antes expuesto, fue necesario desarrollar tecnologías capaces de producir piezas con dimensiones de milímetros o inferiores.

Ejemplos de las tecnologías desarrolladas para la fabricación de mecanismos micromecánicos son: los *MicroElectroMechanical Systems* (MEMS), desarrollados principalmente en los Estados Unidos de Norteamérica; los *MicroSystems Technology* (MST), cuyo mayor auge está en los países europeos; y por último los *MicroMachine Technology* (MMT) en Japón [3]. Las tecnologías antes mencionadas se basan substancialmente en técnicas empleadas para la construcción de circuitos integrados en el área electrónica. En la figura 1 se presentan algunas imágenes de mecanismos fabricados con estas tecnologías.



a



b

Figura 1. Imágenes de mecanismos desarrollados empleando tecnologías microelectrónicas: a) micromotor electrostático [15], b) microengrane [16].

Las aplicaciones de este tipo de dispositivos se pueden encontrar en áreas como la industria automotriz (acelerómetros), en la industria biotecnológica (biochips para detección de agentes biológicos), en la industria de computación (cabezas para impresoras de inyección de tinta), etc. [4].

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).

En los 90's se propone emplear sistemas micromecánicos (microfábricas) basadas en sistemas de manufactura convencionales para generar microdispositivos mecánicos. Esta línea de investigación se comienza a desarrollar en Japón y Ucrania, siendo su principal objetivo el desarrollar herramientas de ayuda para el desarrollo de microdispositivos más complejos como es el caso de manipuladores y robots de tamaño milimétrico donde: las formas de los componentes

micromecánicos requeridos sean complejas (tres dimensiones); se requiera de un diseño para ensamble; y que los materiales de fabricación requeridos sean diversos [3,5].

Una microfábrica cuenta con unidades de proceso (conformadas por MMH's), ensamble, control de calidad, transporte, mantenimiento, entre otras (en la figura 2 se muestra el esquema de una microfábrica). Otro aspecto importante es que una microfábrica resulta una alternativa para la producción de pequeños dispositivos mecánicos reduciendo errores y consumo de recursos tales como energía, materiales y espacio de trabajo [6].

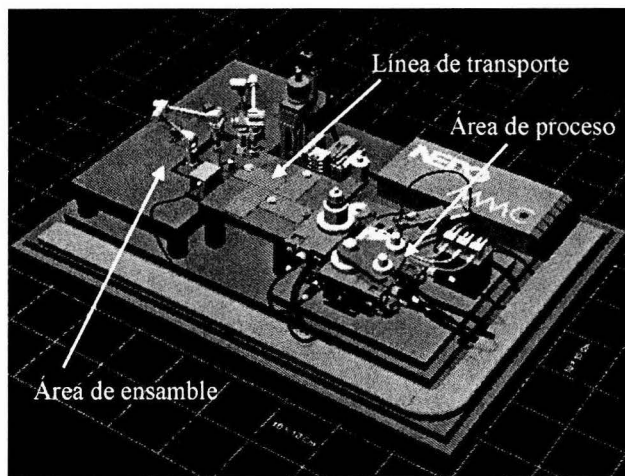


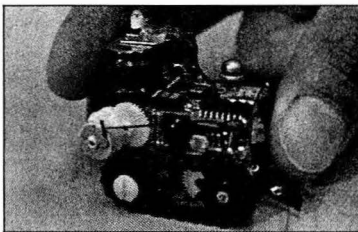
Figura 2. Esquema de una microfábrica o fábrica sobre mesa [17].

Algunas de las aplicaciones potenciales de microdispositivos generados bajo esta tecnología son [1-20]:

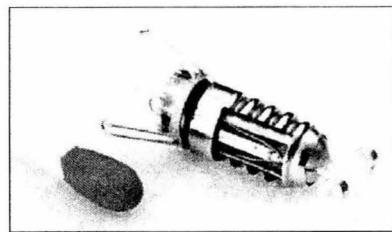
- En el campo de la medicina, la demanda de microequipo ha ido en aumento con aplicaciones en: microscopía, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco invasivas, tratamientos, etc. La reducción en el tamaño de los instrumentos permite inspeccionar las partes internas del cuerpo humano disminuyendo el riesgo de causar daños en éste.



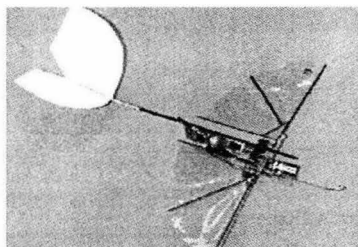
- En lo que respecta a inspección y mantenimiento de equipo industrial, los sistemas micromecánicos juegan un rol muy importante. En la actualidad existe interés en el desarrollo de pequeños robots de mantenimiento para inspección y reparación en lugares estrechos y/o inaccesibles. La aplicación de este tipo de robots cubre un amplio rango de equipo: maquinaria para transporte, plantas de energía (inspección en turbinas sin necesidad de desensamblar), inspección de tuberías, plantas químicas, petroleras, nucleares, etc.
- 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. En la figura 3 se muestran ejemplos de microequipo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. En la figura (a) se muestra un microrobot de inspección; en la figura (b) una micromáquina para inspección de tuberías por el método de corrientes de Hedí [6]; finalmente, en la figura (c) se muestra un microvehículo eléctrico de vuelo libre [11].

Siguiendo la línea de emplear mecánica convencional en la fabricación de microsistemas, en 1996 en el *Mechanical Engineering Laboratory* (MEL) del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* en Japón, se desarrolló un microtorno con dimensiones de 30x30x30 mm [7], dicho microequipo es presentado en la figura 4.

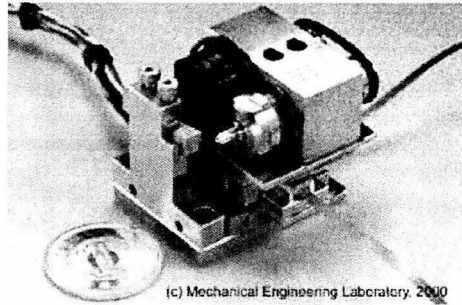


Figura 4. Microtorno Japonés [18]

Un año más tarde, en el *International Research and Training Center of UNESCO/IIP of Information Technologies and Systems* de la *National Academy of Sciences of Ukraine* se desarrolló un prototipo de microcentro de maquinado cuya imagen es presentada en al figura 5 [8].

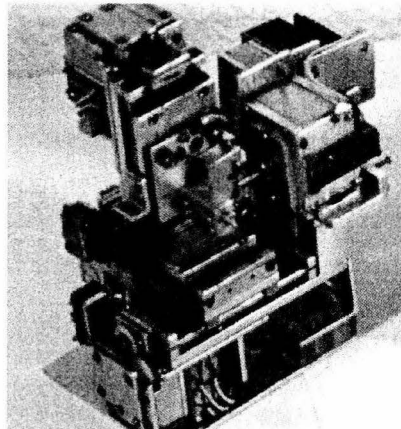


Figura 5. Prototipo de microcentro de maquinado con dimensiones de 100x100x130 mm desarrollado por el Dr. Kussul en Ucrania.

En los últimos años se han desarrollado alrededor del mundo varios prototipos de microequipo como: micromanipuladores, microfresadoras, microtornos, etc. En la figura 6 se presentan algunos ejemplos de diferentes tipos del microequipo generado.

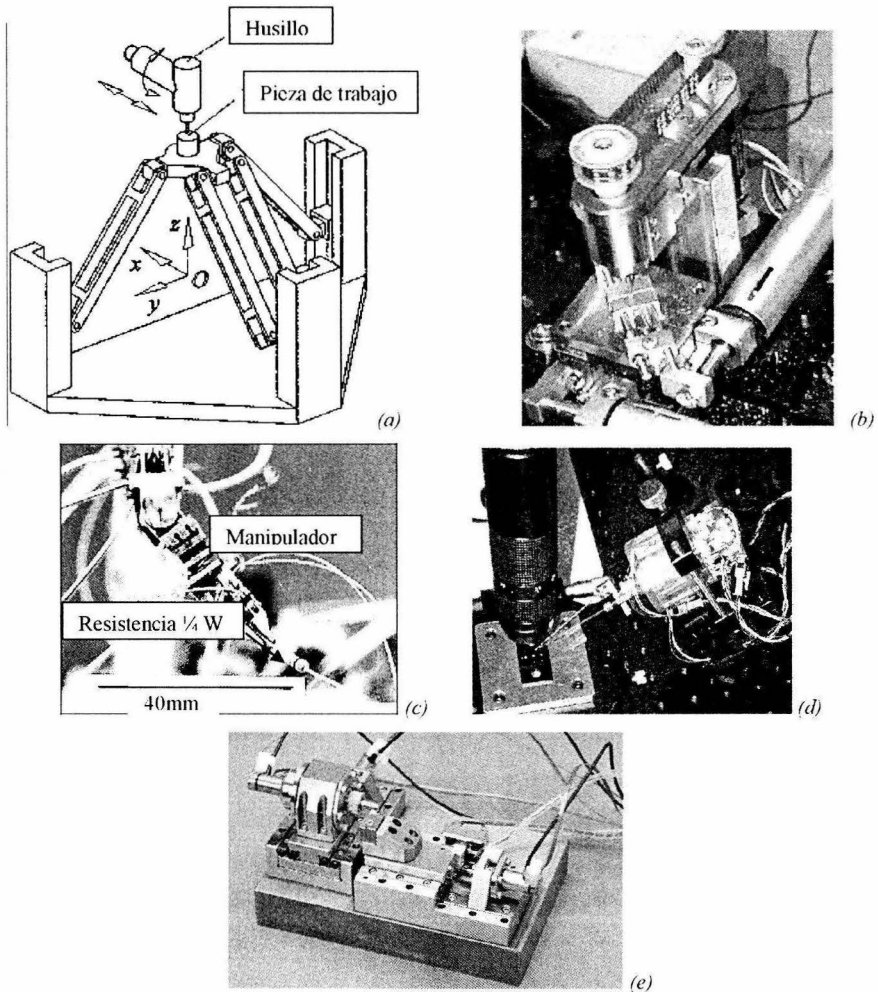


Figura 6. (a) Micromáquina basada en estructuras paralelas con dimensiones de 50x50x50 mm [25]; (b) Microfresadora con dimensiones de 119x119x102mm [18]; (c) micromanipulador [19]; (d) micromanipulador de dos dedos (48 mm de diámetro y 65mm de altura) [9]; (e) Microtorno desarrollado por la empresa NanoWave (dimensiones de la base: 100x150 mm) [10].



Otro ejemplo de prototipo de microfábrica fue desarrollado por la empresa Olympus Optics Co., Ltd, con el fin de resolver tareas de fabricación de productos con componentes micro-ópticas.

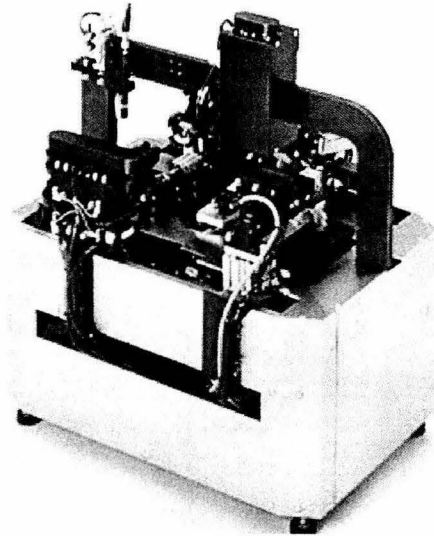


Figura 8. Microfábrica desarrollada por la empresa Olympus Optics Co., Ltd.[13]

## Micromecánica en México

En México existe un grupo de investigadores que trabajan en esta línea de investigación. Dicho grupo labora en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM. La principal línea de investigación de este laboratorio es: investigar y generar tecnología de punta para la fabricación de piezas con dimensiones inferiores al milímetro, con el objetivo de desarrollar tecnologías de producción totalmente automatizadas, enfocadas al desarrollo de equipo e instrumentación de bajo costo y alta eficiencia [21].

El principio básico para el desarrollo de microequipo enfocado a la manufactura de microdispositivos se basa en la idea de desarrollar generaciones de microequipo, donde cada generación tiene dimensiones menores que la generación anterior. La primera generación de microequipo es desarrollada con máquinas herramienta de tamaño convencional y el microequipo

de cada siguiente generación es desarrollado con ayuda del microequipo de la generación que lo precede.

En el año 2000 se presentó dentro del *First International Conference on Mechatronics and Robotics* en San Petersburgo (Rusia) un prototipo de microcentro de maquinado, correspondiente a la primera generación de microequipo, con capacidad para realizar procesos de torneado, fresado y taladrado. El tipo de trabajo que realiza el microcentro de maquinado depende del tipo de herramienta empleada y de la configuración en la que trabaje éste [22]. En la figura 9 se muestra dicho prototipo.

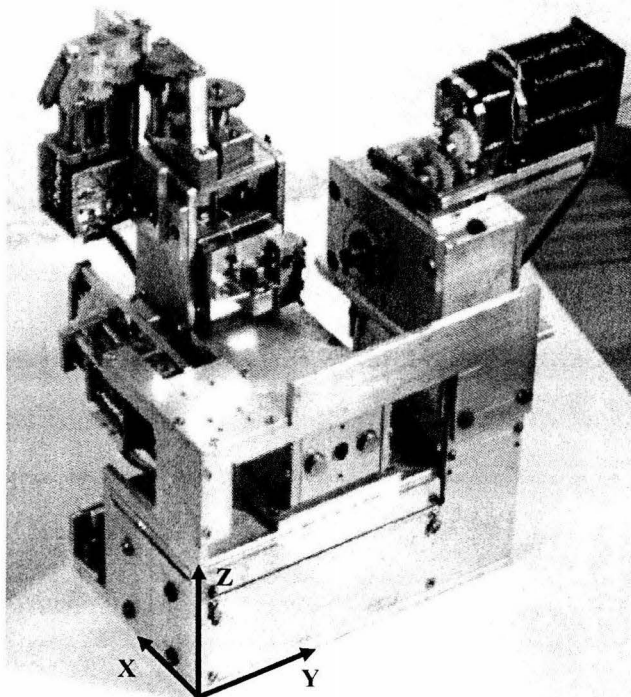


Figura 9. Microcentro de maquinado desarrollado en México.

Las características de esta MMH son:

- Dimensiones de 130x160x85 mm.

- Recorridos en ejes: X=20 mm, Y=35mm, Z=20mm.
- Resolución de 1.87  $\mu\text{m}$ .
- Precisión de  $\pm 20 \mu\text{m}$ .
- Voltaje de alimentación 12V DC.
- Capacidad para manufacturar piezas en el rango de los 5 milímetros a los 50 micrómetros.
- Software de control desarrollado en Borland C++ Builder.
- El Software de control puede operar en un sistema Pentium con 32Mb en RAM.

## Reducción de errores en MMH's

Una de las principales ideas que fundamenta la propuesta de crear máquinas herramienta de dimensiones acordes con las dimensiones de los elementos que se desean fabricar, se encuentra basada en la afirmación: "*Máquinas grandes, errores grandes... máquinas pequeñas, errores pequeños*" [3], es decir, se espera un decremento en la influencia de las variables de error que afectan a las MMH's. A continuación se presenta un análisis teórico que demuestra la afirmación anterior. En dicho análisis sólo se están tomando en cuenta algunos ejemplos de variables que pueden llegar a afectar las cualidades geométricas de una MMH, como son el caso de errores asociados con: la calidad en el maquinado de las partes de la máquina; la variación de temperatura; deformaciones; vibraciones, etc.

Para dicho análisis, se consideran dos dispositivos mecánicos  $A$  y  $B$  que pueden ser MMH's o micromanipuladores, donde el tamaño del dispositivo  $A$  es  $S$  veces mayor que el dispositivo  $B$ . Por ejemplo, una flecha del dispositivo  $A$  tiene una relación de tamaño con respecto a una flecha del dispositivo  $B$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$d_A = S \cdot d_B \quad (1)$$

Donde,  $d_A$  es el diámetro de la flecha contenida en el dispositivo  $A$ ;  $d_B$  es el diámetro de la flecha contenida en el dispositivo  $B$ ; y  $S$  es el factor de escala.

Resulta complicado hacer un análisis general de la correlación que existe entre los tamaños de microdispositivos y sus parámetros, por lo que en este caso se presentan los análisis para algunos casos comunes.

### Errores geométricos

Considerando que las máquinas  $A$  y  $B$  son similares en diseño, materiales y errores relativos, es posible afirmar que los errores lineales de las partes de las máquinas con respecto a las formas de referencia son  $S$  veces mayores para la máquina  $A$  que para la máquina  $B$ . Por ejemplo, si consideramos para este análisis uno de los ejes de las máquinas, el cual tiene errores de rectitud, tal como se muestra en la figura 10.

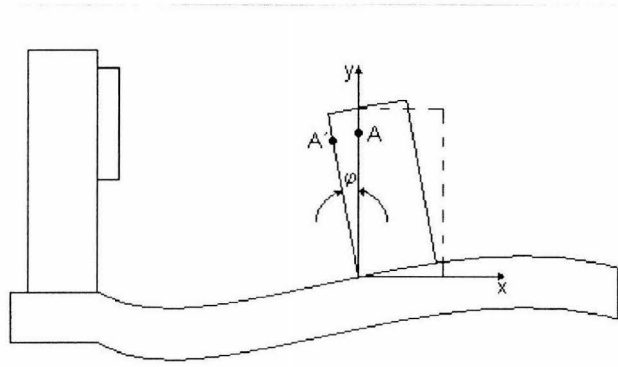


Figura 10. Fuentes de error debido a errores geométricos

El error generado por la falta de rectitud en el eje lo podemos expresar como:

$$E_{Ax} = A' \cos \varphi \quad (2)$$

$$E_{Ay} = A' \sen \varphi \quad (3)$$

Donde  $\varphi$  es el ángulo de error. La relación de escala entre el punto  $A'$  de la máquina  $A$  y el punto  $B'$  de la máquina  $B$  está dada por:

$$A' = SB' \quad (4)$$



Aplicando (4) en (2) y (3) tenemos,

$$E_{Ax} = A' \cdot \cos \varphi = S \cdot B' \cdot \cos \varphi = S \cdot E_{Bx} \quad (5)$$

$$E_{Ay} = A' \cdot \text{sen} \varphi = S \cdot B' \cdot \text{sen} \varphi = S \cdot E_{Bx} \quad (6)$$

Otro ejemplo, puede ser el error que se genera cuando se emplean tornillos sin fin en las guías para generar desplazamiento. En este caso, las variaciones de fase que existan en la cuerda del tornillo ocasionarán errores de posición (ver figura 11).

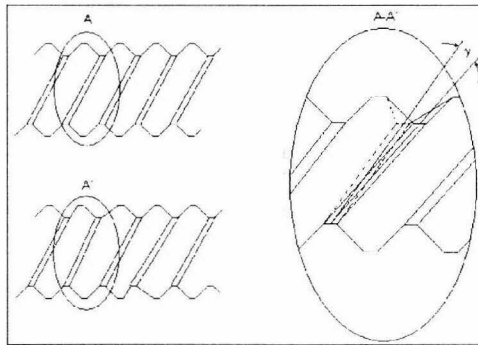


Figura 11. Error producido por irregularidades en el tornillo sinfin de la transmisión de los ejes de una máquina.

El error producido por este tipo de variaciones en el ángulo de la cuerda del tornillo da como resultado errores de fase en el comportamiento del tornillo, es decir, el error de ángulo generado por  $\gamma$  se reflejará en un error de fase con valor  $\beta$ , el cual es representado por la siguiente ecuación:

$$E_{A'} = D_{Am} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi \gamma}{P} + \beta \right) \quad (7)$$

donde  $D_{Am}$  es el diámetro medio del tornillo sinfin de la máquina  $A$  y  $P$  es el paso de dicho tornillo. La relación de diámetros que existe entre el tornillo sinfin de la máquina  $A$  y la máquina  $B$  está dada por,

$$D_{Am} = S \cdot D_{Bm} \quad (8)$$

Con la ayuda de las ecuaciones (7) y (8), es posible obtener la relación entre errores,

$$E_A = D_{Am} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi x}{p} + \beta\right) = S \cdot D_{Bm} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi x}{p} + \beta\right) = S \cdot E_B \quad (9)$$

En estos dos ejemplos podemos observar como el error generado por variaciones en las características geométricas de una máquina decrecen en medida que decrecen las dimensiones de ésta.

### *Expansiones térmicas*

La expansión térmica de un componente con longitud  $L$  se puede representar como:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (10)$$

donde  $\Delta L$  es la deformación térmica,  $\alpha$  es el coeficiente de la expansión térmica y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura.

El parámetro  $\alpha$  es igual en la máquina herramienta A y B porque depende solamente del material del componente; la longitud de un componente B es  $S$ -veces más pequeños que la longitud de un componente A:

$$L_A = S \cdot L_B \quad (11)$$

La diferencia de temperatura  $\Delta T$  consiste en las dos componentes:  $\Delta T_i$  - diferencia interna de la temperatura, y  $\Delta T_e$  - diferencia externa de la temperatura. La máquina herramienta B requiere un volumen más pequeño que el de la máquina herramienta A. Es más fácil mantener una temperatura constante en el volumen más pequeño que en el más grande, por lo tanto podemos escribir:

$$\Delta T_{e_A} \geq \Delta T_{e_B} \quad (12)$$

Para comparar la diferencia entre la temperatura interna y externa se puede considerar un esquema simplificado como el mostrado en la figura en figura 12.



Figura 12. Esquema que explica el origen de la diferencia de temperatura en máquinas de diferente tamaño.

En la figura 12 se observa que la temperatura  $T_2$  en el sumidero de calor (HS) es constante. La energía producida por el generador del calor es  $W$ . Con la información anterior, la diferencia de temperatura se puede obtener de la siguiente manera:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{W \cdot L_{HT}}{\lambda \cdot S_{HT}}, \quad (13)$$

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

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

$$L_{HT_A} = S \cdot L_{HT_B}, \quad (14)$$

$$S_{HT_A} = S^2 \cdot S_{HT_B} \quad (15)$$

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

$$W = w \cdot V_{H\phi}, \quad (16)$$

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

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

$$W_A = S^3 \cdot W_B \quad (17)$$

Esto se debe a que

$$V_A = S^3 \cdot V_B. \quad (18)$$

Tomando como base las ecuaciones (13), (14), (15) y (16), obtenemos:

$$\Delta T_A = \frac{W_A \cdot L_{HTA}}{\lambda \cdot S_{HTA}} = \frac{S^3 \cdot W_B \cdot S \cdot L_{HTB}}{\lambda \cdot S^2 \cdot S_{HTB}} = S^2 \cdot \Delta T_B \quad (19)$$

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

$$w_A = \frac{w_B}{S} \quad (20)$$

Por lo tanto,

$$W_A = S^2 \cdot W_B \quad (21)$$

y

$$\Delta T_A = \frac{W_A \cdot L_{HTA}}{\lambda \cdot S_{HTA}} = \frac{S^2 \cdot W_B \cdot S \cdot L_{HTB}}{\lambda \cdot S^2 \cdot S_{HTB}} = S \cdot \Delta T_B \quad (22)$$

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

Utilizando la ecuación (13) es posible obtener:

$$\Delta L_A = \alpha \cdot L_A \cdot \Delta T_A \geq \alpha \cdot S \cdot L_B \cdot \Delta T_B = S \cdot \Delta L_B, \quad (23)$$

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

### *Rigidez*

La rigidez  $r$  de un objeto, está determinada por la relación que existe entre la fuerza  $Fz$  que afecta al objeto y la deformación  $\Delta z$  que sufre el objeto en dirección de la fuerza:

$$r = Fz / \Delta z \quad (24)$$

A continuación se presentan algunos ejemplos para estudiar este caso:

#### *(a) Compresión (o extensión) de la barra*

En la figura 13 se muestra una imagen de una barra sometida a compresión.

La fuerza  $Fz$  comprime a la barra con sección  $q$  produciendo una deformación  $\Delta z$ , la cual está representada por la siguiente ecuación:

$$\Delta z = (Fz \cdot L) / (q \cdot E) \quad (25)$$

Donde  $E$  es módulo de elasticidad del material que constituye a la barra.

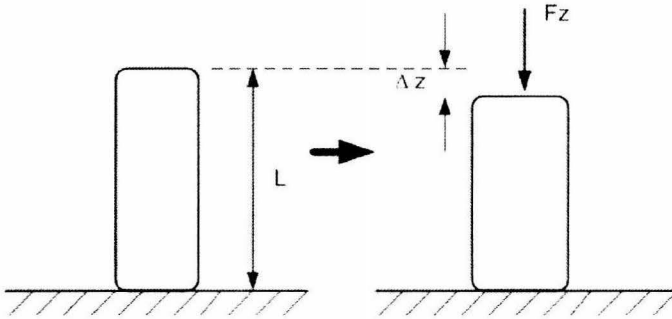


Figura 13. Barra sometida a una fuerza de compresión.

De las ecuaciones (24) y (25) se obtiene:

$$r = Fz / \Delta z - (q \cdot E) / L \quad (26)$$

De acuerdo con la relación que existe entre los dispositivos  $A$  y  $B$ , se establecen las siguientes igualdades:

$$L_A = S \cdot L_B \quad (27)$$

$$q_A = S^2 \cdot q_B \quad (28)$$

$$F_{A} = F_B \quad (29)$$

Sustituyendo las relaciones anteriores en la ecuación de rigidez se tiene:

$$r_A = \frac{q_A \cdot E_A}{L_A} = \frac{S^2 \cdot q_B \cdot E_B}{S \cdot L_B} = S \cdot r_B \quad (30)$$

(b) Barra sometida a flexión (Caso 1)

En este caso de estudio, un extremo de la barra de longitud  $L$  se encuentra empotrado en la pared; mientras que el otro extremo está afectado por una fuerza  $F_z$ , tal como se ilustra en la figura 14.

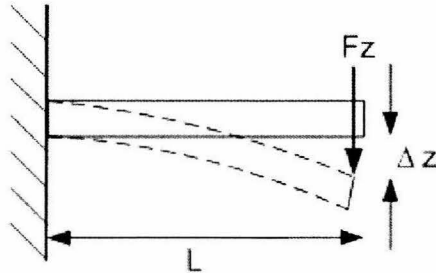


Figura 14. Barra sometida a flexión.

La barra tiene una sección transversal constante con momento de inercia  $I$ . Para este caso, la deflexión  $\Delta z$  en el extremo de la barra está dada por:

$$\Delta z = \frac{F_z \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (31)$$

por lo que, la rigidez es:

$$r = F_z / \Delta z = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (32)$$

La relación de momentos de inercia entre los dispositivos  $A$  y  $B$  está dada por:

$$I_A = S^4 \cdot I_B \quad (33)$$

Sustituyendo (27,29 y 33) en (32) se obtiene:

$$r_A = \frac{3 \cdot E_A \cdot I_A}{L_A^3} = \frac{3 \cdot E_B \cdot S^4 \cdot I_B}{S^3 \cdot L_B^3} = S \cdot r_B \quad (34)$$

(c) Barra sometida a flexión (Caso 2).

En este caso, los dos extremos de la barra se empotran en dos soportes y se ejerce una fuerza  $F_z$  en el centro de la barra de longitud  $L$ , tal como aparece en la figura 15.

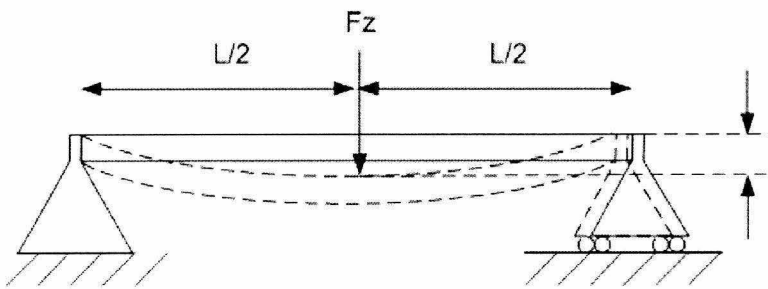


Figura 15. Barra sometida a flexión (Caso 2).

La sección de la barra tiene momento de inercia  $I$ , y para este caso la deflexión  $\Delta z$  está dada por:

$$\Delta z = \frac{F_z \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (35)$$

y la rigidez,

$$r = F_z / \Delta z = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (36)$$

Sustituyendo (27,29 y 33) en (36) se obtiene:



$$r_A = \frac{48 \cdot E_A \cdot I_A}{L_A^3} = \frac{48 \cdot E_B \cdot S^4 \cdot I_B}{S^3 \cdot L_B^3} = S \cdot r_B \quad (37)$$

(d) Torsión de una barra.

Para este caso, un extremo de la barra con longitud  $L$  está sujeta en la pared, mientras que en su otro extremo se encuentra sujeta una barra con longitud  $L_1$  en posición perpendicular, tal como se muestra en la figura 16. Los dos extremos de la barra de longitud  $L_1$  están siendo afectados por las fuerzas  $F_z$  que forman un par de fuerzas. Este par de fuerzas tuerce la barra de longitud  $L$  generando un momento de inercia polar  $I_p$ , produciendo un desplazamiento  $\Delta z$  en las terminales de la barra de longitud  $L_1$ . Dicha barra se considera como un cuerpo rígido, por lo que el ángulo  $\theta$  de torsión de la barra de longitud  $L$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{\varphi \cdot I_p} \quad (38)$$

Donde  $T$  es el momento del par de fuerzas  $F_z$ ;  $L$  es la longitud de la barra;  $\varphi$  es el módulo de desplazamiento; e  $I_p$  es el momento de inercia polar.

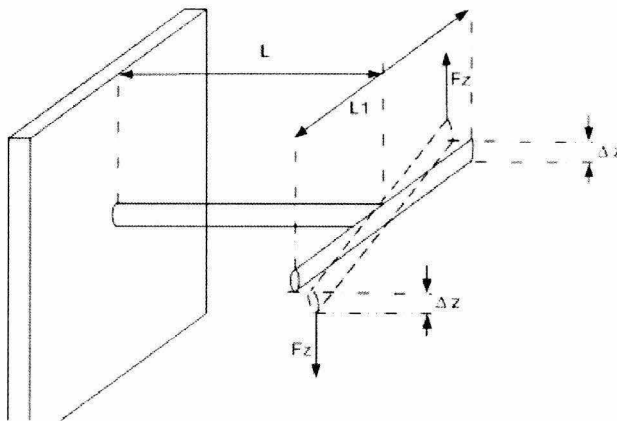


Figura 16. Torsión de una barra.

El sistema está definido por las siguientes ecuaciones:

$$T = F_z \cdot L_l \quad (39)$$

$$\Delta z = \theta \left( \frac{L_\gamma}{2} \right) = \frac{F_z \cdot L_\gamma \cdot L}{\varphi \cdot I_p} \cdot \frac{L_\gamma}{2} = \frac{F_z \cdot L_\gamma^2 \cdot L}{2 \cdot \varphi \cdot I_p}, \quad (40)$$

$$r = \frac{F_z}{\Delta z} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot I_p}{L_\gamma^2 \cdot L}. \quad (41)$$

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

$$\begin{aligned} L_{lA} &= S \cdot L_{lB} \\ L_{IA} &= S \cdot L_{IB} \\ \varphi_A &= \varphi_B \\ I_{PA} &= S^4 \cdot I_{PB} \end{aligned} \quad (42)$$

Sustituyendo (42) en (41) se tiene:

$$r_A = \frac{2 \cdot \varphi_A \cdot I_{PA}}{L_{lA}^2 \cdot L_{IA}} = \frac{2 \cdot \varphi_B \cdot S^4 \cdot I_{PB}}{S^2 \cdot L_{lB}^2 \cdot S \cdot L_{IB}} = S \cdot r_B \quad (43)$$

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

### *Escalamiento de masa*

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

$$dx_A = S \cdot dx_B$$

$$\begin{aligned} dy_A &= S \cdot dy_B \\ dz_A &= S \cdot dz_B \end{aligned} \quad (44)$$

Como es bien conocido, la masa de un componente es posible determinarla mediante la siguiente ecuación:

$$m = \iiint \rho(x, y, z) dx dy dz, \quad (45)$$

Donde  $\rho(x, y, z)$  es densidad de materia en un punto  $(x, y, z)$ .

En este caso, se dividieron los dispositivos  $A$  y  $B$  en paralelepípedos de igual tamaño,

$$\rho_A(x_A, y_A, z_A) = \rho_B(x_B, y_B, z_B) \quad (46)$$

Con las ecuaciones (44), (45) y (46) obtenemos:

$$\begin{aligned} m_A &= \iiint \rho_A(x, y, z) \cdot dx_A \cdot dy_A \cdot dz_A = \\ &= \iiint \rho_B(x, y, z) \cdot S \cdot dx_B \cdot S \cdot dy_B \cdot S \cdot dz_B = S^3 \cdot m_B \end{aligned} \quad (47)$$

### *Fuerza de inercia (Movimiento lineal con aceleración uniforme)*

Para ilustrar el comportamiento de la fuerza de inercia, se considera un componente con masa  $m$  que se mueve de un punto 1 a un punto 2 con aceleración uniforme (ver figura 17); la distancia entre el punto 1 y el punto 2 es  $L$ ; y finalmente, la velocidad inicial del componente es  $V_1$  y la velocidad final es  $V_2$ .

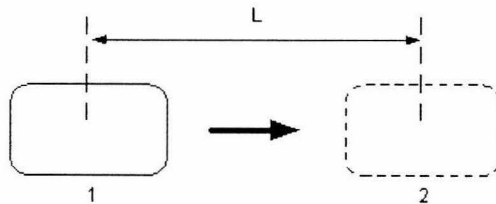


Figura 17. Esquema para el cálculo de la fuerza de inercia.

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

$$t = \frac{2 \cdot L}{V_1 + V_2} \quad (48)$$

La aceleración se obtiene mediante:

$$A = \frac{V_2 - V_1}{t} = \frac{(V_2 - V_1)(V_2 + V_1)}{2 \cdot L} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot L} \quad (49)$$

Finalmente, la fuerza de inercia del elemento está dada por:

$$F = m \cdot A = \frac{m \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2 \cdot L} \quad (50)$$

Cuando las velocidades en la máquina A son iguales a las velocidades de la máquina B, la fuerza de inercia está dada por

$$F_A = \frac{m_A \cdot (V_{2A}^2 - V_{1A}^2)}{2L_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot (V_{2B}^2 - V_{1B}^2)}{2 \cdot S \cdot L_B} = S^2 \cdot F_B \quad (51)$$

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

$$F_A = \frac{m_A \cdot (V_{2A}^2 - V_{1A}^2)}{2L_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot (S^2 \cdot V_{2B}^2 - S^2 \cdot V_{1B}^2)}{2 \cdot S \cdot L_B} = S^4 \cdot F_B \quad (52)$$

### *Fuerza centrífuga*

Un disco de masa  $m$  rota con respecto a un eje con velocidad angular  $\omega$ . El disco está fijo en el eje con una excentricidad  $AR$ , como se muestra en la figura 18.

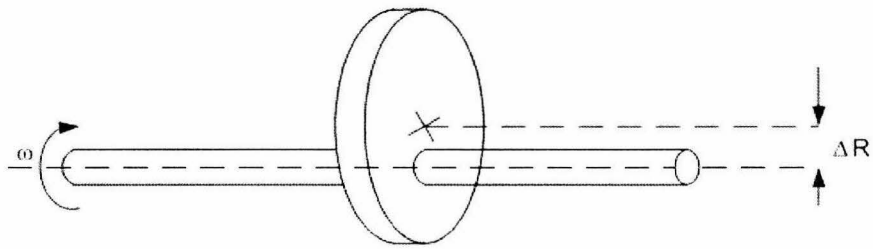


Figura 18. Esquema para el cálculo de fuerza centrífuga.

La fuerza centrífuga en el disco está dada por:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot \Delta R = \frac{m \cdot V^2}{\Delta R} \quad (53)$$

Donde  $V$  es velocidad lineal del centro del disco.

Cuando la velocidad lineal es constante la fuerza centrífuga está dada por

$$F_A = \frac{m_A \cdot V_A^2}{\Delta R_A} = \frac{S^3 \cdot m_B \cdot V_B^2}{S \cdot \Delta R_B} = S^2 \cdot F_B \quad (54)$$

Cuando el tiempo de una revolución es constante la fuerza centrífuga está dada por

$$F_A = m_A \cdot \omega_A^2 \cdot \Delta R_A = S^3 \cdot m_B \cdot \omega_B^2 \cdot S \cdot \Delta R_B = S^4 \cdot \Delta R_B \quad (55)$$

### *Deformaciones elásticas*

Las deformaciones elásticas presentan una de las más importantes causas de error en la producción de dispositivos mecánicos con máquinas herramienta. La ecuación (2) se emplea para obtener la deformación elástica,

$$\Delta z = \frac{F}{r} \quad (56)$$

Donde  $r$  es la rigidez de la máquina herramienta,  $F$  es fuerza que afecta en dirección Z.

De las ecuaciones (8), (12), (15) y (21) tenemos:

$$r_A = S \cdot r_B \quad (57)$$

Para los casos presentados con las ecuaciones (29), (32), (36), (37), (41) y (52) la fuerza esta dada por:

$$F_A = S^2 \cdot F_B \quad (58)$$

Para estos casos escalamiento de deformación es:

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^2 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S \cdot \Delta z_B \quad (59)$$

En otros casos (ecuaciones (30), (33) y (34)) tenemos,

$$F_A = S^4 \cdot F_B \quad (60)$$

y

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^4 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S^3 \cdot \Delta z_B \quad (61)$$

Para el caso de la ecuación (35) tenemos,

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S^3 \cdot F_B}{S \cdot r_B} = S^2 \cdot \Delta z_B \quad (62)$$

A partir de los ejemplos considerados, es posible concluir que los errores producidos por la deformación elástica disminuyen como mínimo linealmente con respecto a la disminución de

tamaños en las MMH's. Se tienen dos excepciones, las cuales están mostradas en las ecuaciones (39), (47) donde

$$F_A = S \cdot F_B \quad (63)$$

y

$$\Delta z_A = \frac{F_A}{r_A} = \frac{S \cdot F_B}{S \cdot r_B} = \Delta z_B \quad (64)$$

Estos casos corresponden a la fuerza electroestática o fuerza capilar. Estas fuerzas tienen el orden de magnitud más bajo que otras fuerzas hasta el tamaño de 1  $\mu\text{m}$ , por lo que es posible no tomar en cuenta la influencia de estas fuerzas.

### *Vibraciones*

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

$$\Delta z^{(R)} = q \cdot \Delta z \quad (65)$$

Donde  $\Delta z$  es la deformación estática y  $q$  es el factor de calidad del sistema mecánico.

Se considera que dos fuerzas periódicas son las que tienen mayor influencia en la amplitud de vibración: la fuerza centrífuga y la fuerza de corte. Las dos fuerzas corresponden a la ecuación (56). Si se considera que el factor de calidad  $q$  de las máquinas herramienta  $A$  y  $B$  es el mismo, obtenemos:

$$\Delta z_A^{(R)} = q_A \cdot \Delta z_A = q_B \cdot S \cdot \Delta z_B = S \cdot \Delta z_B^{(R)} \quad (66)$$

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

$$q_A > q_B \quad (67)$$

Tomando en cuenta la ecuación (64) y aplicándola en la ecuación (63) se tiene:

$$\Delta z_A^{(R)} > S \cdot \Delta z_B^{(R)} \quad (68)$$

Las deformaciones de vibraciones disminuyen más allá que linealmente con respecto a la reducción de tamaños en microdispositivos.

## Errores excepcionales (errores que no decrecen cuando los tamaños disminuyen)

En el apartado anterior se describió cómo disminuyendo los tamaños de microequipo, los errores en las MMH's y micromanipuladores también se decrementan; pero no todos los errores siguen a esta regla. Por ejemplo, si se produce un tornillo sinfín para un microtorno  $B$  empleando un microtorno  $A$  de una generación previa que contiene dentro de sus elementos un tornillo sinfín con errores de paso  $\Delta x_A$ , el resultado que tendremos es un tornillo sinfín para el microtorno  $B$  con los mismos errores del tornillo del microtorno  $A$ :

$$\Delta x_B = \Delta x_A \quad (69)$$

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

## ¿Por qué evaluar microequipo?

La tecnología necesaria para generar microequipo está constituida por un entorno interdisciplinario donde conviven varias áreas de la ciencia y la ingeniería, como lo son: la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, la física, la química, etc. Actualmente, con la finalidad de facilitar el avance de este tipo de tecnología, incrementar las cualidades de este tipo de dispositivos y brindar expectativas a las áreas de aplicación, surge la necesidad de establecer



mecanismos para su evaluación: tanto para los sistemas de fabricación, como para los microdispositivos desarrollados.

Debido al desarrollo multidisciplinario de esta área, los métodos de evaluación de microequipo abarcan diferentes aspectos de los sistemas a evaluar. En un reporte técnico presentado por el Dr. Mitsui en el año de 2000, señala que dentro del Comité de Estandarización de Micromáquinas de Japón, se llegó a la siguiente conclusión: *los principales tipos de evaluación para microequipo son: formas y dimensiones, fuerzas y torques, relación de fluidos y propiedades de materiales* [23].

Como ya se señaló antes, el desarrollo de microdispositivos, tanto mecánicos como electromecánicos, brinda muchas expectativas a varios campos de la investigación y la industria debido a que, aparte de las formas y materiales que se pueden llegar a obtener, se espera un decremento en la influencia de las variables de error para obtener mejores resultados en el desarrollo de piezas con dimensiones por debajo del milímetro, por lo que *las evaluaciones dimensionales toman un papel preponderante en el desarrollo de microequipo*.

Este decremento en los errores debido a la influencia de factores asociados con los diferentes componentes y los materiales que conforman a las MMH's también se ve altamente influenciado por el tipo de tecnología que se emplea en su desarrollo. Las tecnologías de punta que por lo general tienen un alto costo en el mercado garantizan un comportamiento adecuado por parte del microequipo, mientras que el emplear sistemas de bajo costo lleva consigo el disminuir la garantía de alcanzar altos índices de precisión en el microequipo desarrollado.

A continuación se presentan algunos ejemplos de propuestas desarrolladas para la evaluación de microequipo.

## Evaluación de microequipo

En lo referente a los desarrollos basados en tecnologías empleadas por los MEMS, MST y MMT, es posible mencionar que los equipos utilizados para fabricar dispositivos microelectrónicos están bien estudiados y los fabricantes dan información precisa de las

características de sus productos, tales como resolución, desviaciones máximas, etc. Por otro lado, realizar evaluaciones a los microdispositivos fabricados bajo estas tecnologías ha sido un reto muy importante, ya que no se pueden emplear las mismas tecnologías que se emplean para la evaluación de circuitos integrados, microprocesadores o dispositivos de potencia. Sin embargo, en un microdispositivo electromecánico, las evaluaciones sobre éste, pueden estar referidas a: aceleración, propiedades químicas, corriente, desplazamiento, flujo, humedad, etc, [24]. Dentro de esta línea de investigación se han encontrado varios reportes.

En los Laboratorios Sandia, se reportó en 1997 el desarrollo de un equipo para estudiar la fiabilidad en MEMS. Dicho equipo podía albergar 256 MEMS y contaba con un microscopio óptico de alta tecnología, y una cámara de vídeo para observar el desgaste en los micromecanismos cuando éstos son sometidos al uso [25]. En la figura 19 se ilustra el estudio hecho a un orificio de unión.

Como el ejemplo anterior, existen varios reportes de propuestas para la evaluación de dispositivos MEMS, entre los que se pueden mencionar el trabajo realizado por Theresa Maudie y un grupo de colaboradoras de la empresa Motorola, en el cual se habla acerca de los retos para desarrollar sistemas de evaluación de MEMS; dichos retos se basan principalmente en desarrollar dispositivos inteligentes capaces de incorporar estímulos eléctricos, de temperatura y físicos para realizar tareas de evaluación [26]. Abhijeet Kolpekwar y R.D. Blanton, ambos investigadores de la Universidad de Carnegie Mellon, proponen una metodología para evaluar dispositivos MEMS basada en el estudio de los efectos de contaminaciones puntuales durante su fabricación con el fin de crear un modelo de fallas; esta metodología puede ayudar a verificar otras metodologías de evaluación [27]. Dennis M. Fremman y C. Quentin Davis, proponen una metodología de evaluación mecánica de MEMS basada en un microscopio de luz, un sistema de video y una máquina de visión, este sistema puede medir desplazamientos del orden de nanómetros; esta propuesta de evaluación permite hacer análisis de desplazamientos en tres dimensiones mediante el análisis de desplazamientos en diferentes planos de la microestructura y se utiliza principalmente en la evaluación de acelerómetros [28].

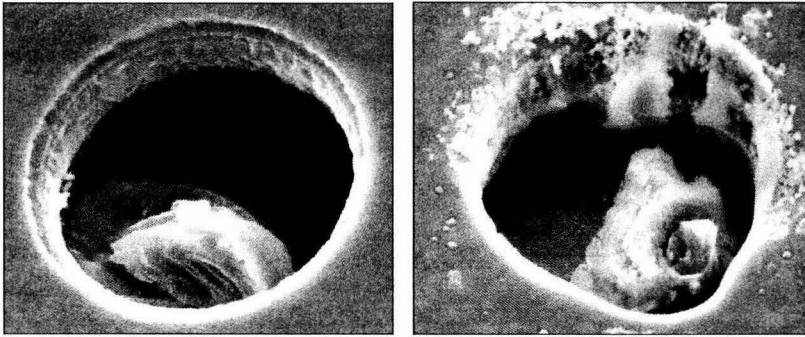


Figura 19. Barreno de unión sin uso (izquierda) y barreno de unión con desgaste natural por uso (derecha) [25].

Como se puede observar, los métodos descritos en párrafos anteriores se encuentran enfocados a la evaluación de dispositivos microelectromecánicos y, debido a la amplia gama de dispositivos MEMS, no existe una metodología general que permita evaluar a todos los tipos.

En el caso de las tecnologías que generan microdispositivos mecánicos a partir de MMH's, los elementos que se manufacturan dependen totalmente de las MMH's desarrolladas y de sus sistemas de control. Por lo anterior, resulta una necesidad primordial el desarrollo de métodos para la evaluación de los componentes de una microfábrica (MMH's y micromanipuladores, principalmente), que permitan conocer su comportamiento para establecer sus características y aprovechar esto para proponer sistemas que permitan mejorar su rendimiento, así como también, brindar características de funcionamiento que permitan establecer las capacidades de aplicación de esta tecnología.

Cuando se habla de máquinas herramienta de tamaño convencional es sencillo encontrar trabajos donde se desarrollan distintas metodologías para su evaluación e inclusive existen normas especiales para evaluarlas, tanto en la Organización Internacional de Estándares (ISO) [29], como en el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI) con estándares desarrollados por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) [30].

Hasta hace algunos años la documentación que existía en el área micromecánica estaba relacionada en su mayoría con el desarrollo de MMH's y otros dispositivos micromecánicos que

forman parte de las microfábricas, por lo que se dejaba un poco de lado las investigaciones para evaluar los rendimientos de este tipo de equipos. La principal prioridad de los investigadores, que se enfocaban alrededor de esta área en ese entonces, estaba relacionada con demostrar la factibilidad y viabilidad de realizar investigaciones y desarrollos en esta nueva área de la ciencia. Por lo general, las evaluaciones de las primeras MMH's desarrolladas, se realizaron con la ayuda de microscopios. Con dichas técnicas era posible establecer las cualidades de las MMH's a partir de piezas producidas en las mismas.

A mediados de los 90's se reportó un método para realizar evaluaciones indirectas de MMH's [31]. Este método fue propuesto por el Profesor Kimiyuki Mitsui de la Universidad de Keio en Japón y se apoya en el uso de un microscopio de efecto túnel. Dicho método está basado en un principio de medición geométrica sin contacto, donde el instrumento aplica un voltaje entre una punta de prueba y una muestra conductora, y mediante el efecto túnel se detecta la pieza a una distancia aproximada de un nanómetro. Se emplean transductores piezoeléctricos para mover los ejes de este dispositivo. En la figura 20 se muestran los resultados obtenidos con este sistema tomando como pieza de prueba un tornillo M2 estándar.

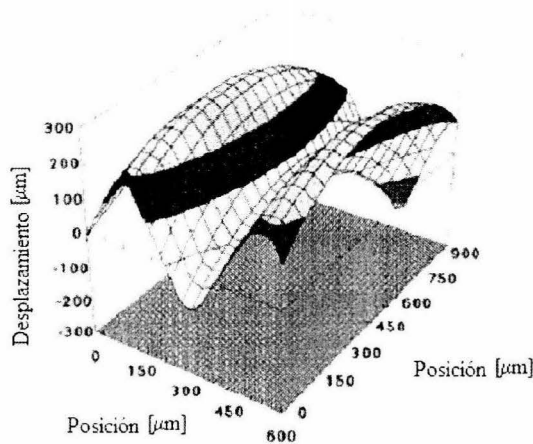


Figura 20. Resultados obtenidos en la medición geométrica de micropiezas utilizando un sistema de efecto *túnel* [31].

En el año de 1997 el Dr. Oiwa de la Universidad de Shizuoka en Japón [32], desarrolló una máquina de medición por coordenadas (MMC) empleando un mecanismo paralelo de tres grados de libertad (ver figura 21), con dimensiones aproximadas de 800 x 800 x 600 mm y espacio de trabajo aproximado de 120 x 120 x 120 mm. Esta máquina emplea, dentro de sus componentes, servomotores de AC acoplados a tornillos de bolas, los cuales se encargan de transmitir movimiento a los puntales. Dichos puntales son barras telescópicas con uniones prismáticas y cada uno cuenta con cuatro rodamientos de bolas lineales que funcionan como guías. Las mediciones de desplazamientos en cada uno de los puntales son realizadas mediante sistemas de codificadores (*encoders*) ópticos con resolución de 50 nm.

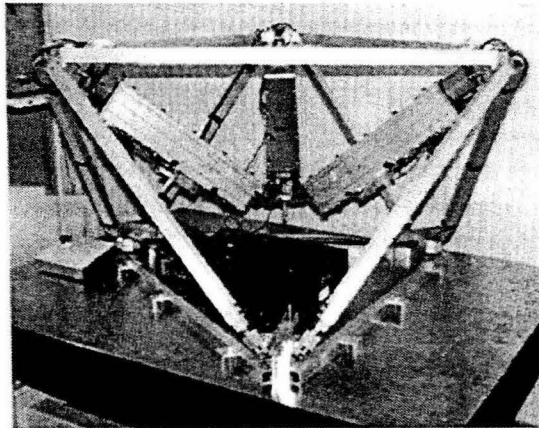


Figura 21. Vista general de la máquina de medición por coordenadas basada en paralelogramos [32].

En el año 1999, este mismo investigador propuso el desarrollo de una micromáquina de medición por coordenadas ( $\mu$ MMC) [33] basada en el mismo principio que su primer desarrollo, solo que de menores dimensiones. En este caso la meta propuesta fue desarrollar una  $\mu$ MMC con un volumen de trabajo de 20x20x20 mm con el fin de medir micropiezas mecánicas. En la figura 22 se muestra un esquema del prototipo propuesto. La propuesta anterior fue publicada en una revista *MicroMachine Center Magazine* en Japón, en el año 2001, pero a la fecha no existe ningún reporte que muestre este desarrollo terminado.

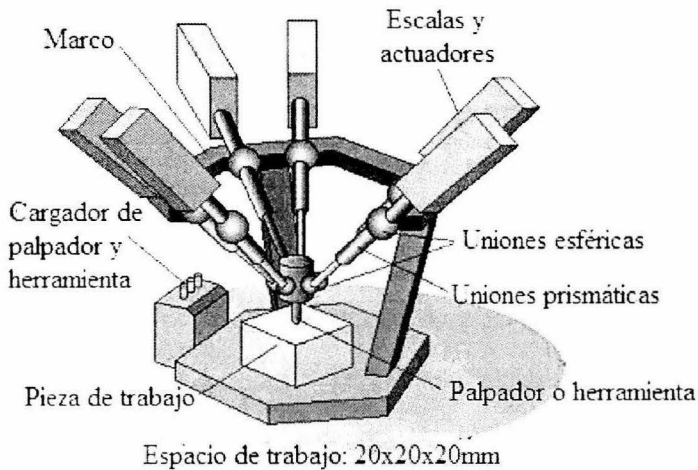


Figura 22. Propuesta de micromáquina de medición por coordenadas basada en paralelogramos [33].

En el año 2002, se presentaron dos trabajos relacionados también con el desarrollo de micromáquinas de medición por coordenadas para evaluar micropartes mecánicas. En dichos trabajos se exponen propuestas similares en lo referente a la configuración de ejes, ya que se tienen ejes ortogonales como en las MMC convencionales; la diferencia de las dos propuestas radica principalmente en los sistemas que emplean para determinar la posición del palpador y el tipo de palpación que realizan.

Uno de los trabajos fue desarrollado por el Dr. Kimiyuki Mitsui y un grupo de investigadores de la Universidad de Keio en Japón. En dicho trabajo se propone emplear actuadores piezoeléctricos para brindar movimiento a los ejes, además de que se cuenta con un cuarto eje rotacional. Todos los ejes de la micromáquina se encuentran controlados mediante codificadores lineales con resolución de  $0.1 \mu\text{m}$  y las mediciones de micropiezas se realizan empleando la técnica de efecto túnel, además de que introducen otra técnica de medición sin contacto de piezas no conductoras empleando una oscilador de cuarzo [34]. En la figura 23 se muestra un esquema de este equipo.

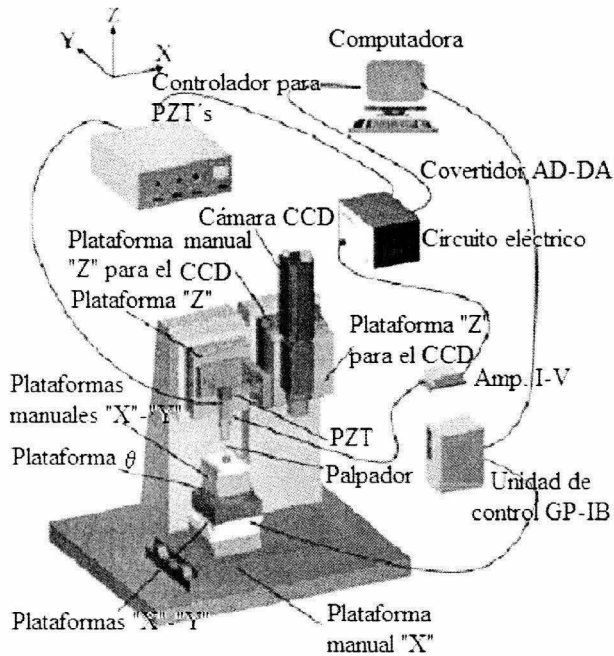


Figura 23. Esquema general de la  $\mu$ MMC desarrollada por el Dr. Mitsui [34].

El otro trabajo fue el presentado por el Dr. Ogura del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* de Japón [35]. En la  $\mu$ MMC presentada en ese trabajo, el investigador propone un método de palpación por contacto en el que el palpador tiene movimiento rotacional, con el cual se determina posición y ángulo de palpación. Al igual que en la otra micromáquina de medición por coordenadas, se emplean elementos piezoeléctricos para transmitir movimiento a sus ejes X-Y y con la ayuda de sensores de fibra óptica miden los desplazamientos de los ejes. Esta  $\mu$ MMC realiza sólo mediciones en el plano X-Y, por lo que realiza evaluaciones en 2D. En la figura 24 se muestra una imagen del esquema de esta micromáquina.

Las técnicas antes descritas tienen como finalidad la evaluación de productos generados dentro de las MMH's. Esto se debe al nivel de tecnología que se encuentra integrado dentro de los desarrollos que existen hasta el momento, donde los investigadores han intentado y logrado desarrollar micromáquinas herramientas muy pequeñas a costa de la integración de sistemas

mecánicos y de control con tecnología de punta. A continuación se presenta un apartado donde se habla de las características de las MMH's desarrolladas hasta nuestros días, con el objetivo de plasmar las diferencias a nivel tecnológico que existen entre las MMH's desarrolladas en el extranjero con respecto a las MMH's desarrolladas en México y reafirmar la necesidad de desarrollar técnicas de medición y metodologías de evaluación que permitan, no solo conocer las prestaciones de dichas máquinas, sino también la generación de herramientas de control para mejorar sus cualidades de comportamiento.

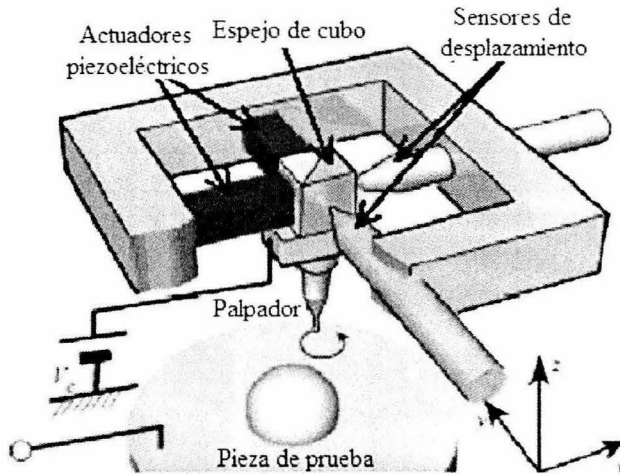


Figura 24. Esquema general de la  $\mu$ MMC desarrollada por el Dr. Ogura [35].

## Características de las micromáquinas desarrolladas hasta nuestros días.

Un aspecto importante que llevó a los investigadores a utilizar métodos de evaluación que hacían uso de las técnicas antes descritas fue la alta tecnología que adaptaron en el desarrollo de las MMH's para obtener, desde sus primeros desarrollos, grandes resultados en precisión. Tal es el caso del microtorno japonés mencionado anteriormente (año 2000), del cual, los carros que conforman sus ejes están constituidos por actuadores piezoeléctricos e incorporan en su sistema de control de lazo cerrado codificadores ópticos (desarrollados expresamente para esta aplicación



por la empresa Olympus Optics Co.), los cuales brindan una resolución de 62.5 nm, logrando una precisión en el microtorno de 1  $\mu\text{m}$  [7]. En la figura 25 se muestra una imagen de los ejes del microtorno japonés. El costo de esta MMH fue de varios miles de dólares y puede manufacturar piezas hasta con un diámetro de 50  $\mu\text{m}$  y 600  $\mu\text{m}$  de longitud (ver figura 26).

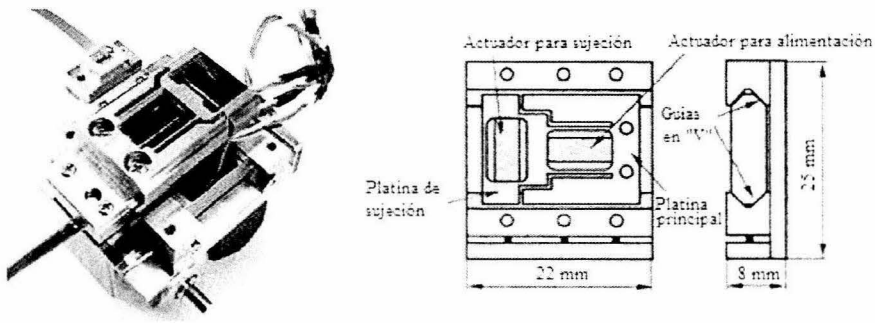


Figura 25. Sistema de ejes del microtorno japonés [7].

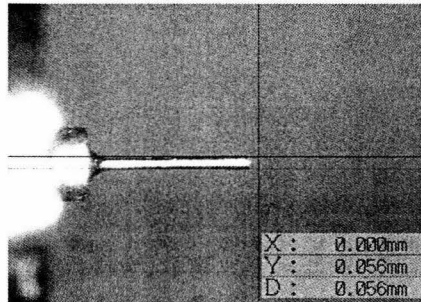


Figura 26. Resultados obtenidos con el microtorno japonés [7]

Otro ejemplo de aplicación de alta tecnología en el desarrollo de MMH's es el caso del microtorno desarrollado y presentado por la empresa Nano Corporation de Japón en el año 2002. Dicho torno incorpora maquinados de alta calidad en sus componentes mecánicos, rodamientos de rodillos cruzados que brindan rigidez y suavidad a los movimientos de cada eje, así como también, utiliza microservoactuadores para la automatización del sistema. El sistema de control es de lazo semicerrado y se basa en el empleo de codificadores angulares que tienen una resolución de 1024 pulsos por revolución y brindan una resolución de desplazamiento al

microtorno de  $0.195 \mu\text{m}$ . En la figura 27 y 28 se muestran algunas de las partes que componen esta MMH y los resultados obtenidos con la misma [10].

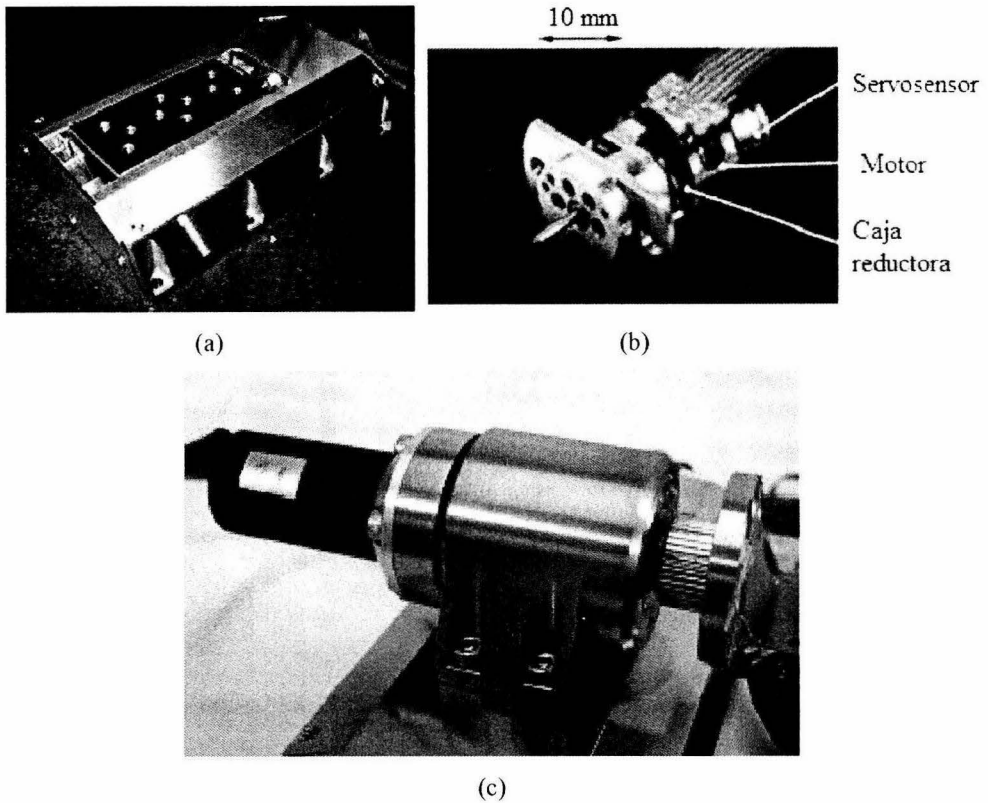


Figura 27. Algunas de las partes del microtorno producido por la empresa Nano Corporation. (a) Ejes X y Z del torno; (b) imagen del microservoactuador; (c) imagen del usillo y su motor [10].

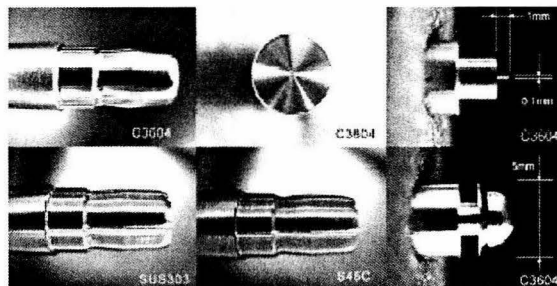
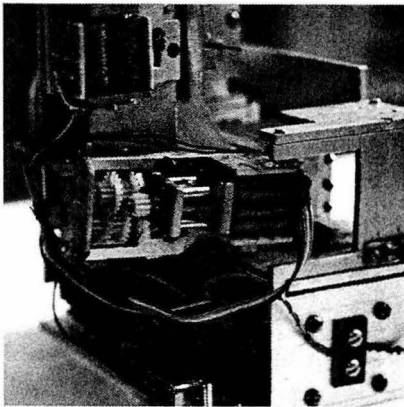
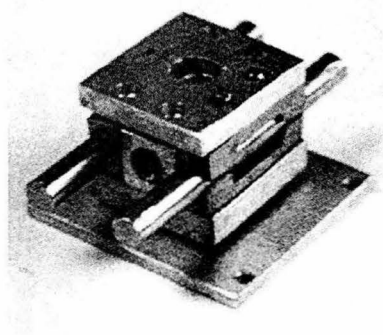


Figura 28. Resultados obtenidos con el microtorno de la empresa Nano Corporation [10].

Finalmente, en el caso de la MMH desarrollada en el CCADET UNAM, se tienen componentes de bajo costo (del orden de los cientos de dólares). Por ejemplo, los actuadores que se emplean en la automatización de esta micromáquina son motores fabricados por los integrantes del mismo laboratorio. Dichos motores tienen una resolución de 4 pasos por revolución. El sistema de control empleado es un sistema de control de lazo abierto, el cual proporciona una resolución en desplazamiento en los ejes X-Y-Z de la máquina de  $1.87 \mu\text{m}$  por paso de motor con la ayuda de cajas de engranes con relación de reducción de 82:1. En la figura 29 se muestran algunos de los componentes de la MMH desarrollada en el CCADET, UNAM.



(a)



(b)

Figura 29. Algunas de las partes de la MMH desarrollada en el CCADET, UNAM. (a) Motores de pasos y cajas de engranes; (b) Sistema de guía de uno de los ejes de la MMH.

En el caso de esta MMH, toda la manufactura de sus partes y el ensamblado se realizaron manualmente, lo que nos lleva a concluir que sus cualidades de precisión no son las más deseables. En un trabajo desarrollado para evaluar el comportamiento de esta micromáquina mediante un método indirecto [36-38], se determinaron algunas de sus características de precisión:

Resolución de la máquina	$1.87 \mu\text{m}/\text{paso de motor}$
Error en eje "Y"	$\pm 18.2 \mu\text{m}$
Error general en maquinados	$\pm 62 \mu\text{m}$

Juego mecánico	345.27 $\mu\text{m}$
Repetibilidad	28.2 $\mu\text{m}$

La pieza más pequeña que se logró manufacturar con esta máquina fue una flecha de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro.

El hecho de desarrollar MMH's de bajo costo, trae como consecuencia no tener buenas características de precisión, por lo cual es necesario recurrir a métodos especiales que permitan disminuir los errores del microequipo desarrollado.

## Métodos existentes para evaluar máquinas herramienta CNC

En lo referente a máquinas herramienta, múltiples métodos de evaluación se han implementado. Dependiendo del tipo de características que se desean conocer, los métodos varían. Por ejemplo, existen métodos para la evaluación aspectos relacionados con la seguridad del equipo, como es el caso de los métodos de evaluación para los sistemas de sujeción y los métodos para evaluar niveles de ruido; otros métodos de evaluación existentes se encargan de evaluar cada uno de los tipos de sistemas que se emplean en la automatización del equipo, dependiendo del tipo de que se trate, por ejemplo: eléctrico, hidráulico o neumático; finalmente, se pueden mencionar los métodos de evaluación que se encuentran relacionados con las características de funcionamiento de las máquinas herramienta, como lo son la precisión, repetibilidad, niveles de vibración, rigidez, etc. [39].

Por lo general, los métodos de evaluación siempre están ligados a normas, lo que garantiza que las evaluaciones puedan ser realizadas en diferentes lugares sin afectar los resultados, así como también, permite comparar en forma confiable máquinas del mismo tipo.

En lo referente a la evaluación de máquinas herramienta, existen normas generadas por entidades de orden nacional e internacional que emiten metodologías de evaluación, tal es el caso de la ISO (*International Organization for Standardization*), la ANSI (*American National Standard Institute*) o el VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*). En el caso de la ISO, ésta cuenta con normas

que cubren el mayor rango de parámetros de evaluación para máquinas herramienta; lo que no sucede en el caso de las otras dos instituciones mencionadas, pero dentro de las normas que emiten cuentan con evaluación de parámetros de precisión y repetibilidad.

La norma ISO 230-2:1997 titulada “*Determinación de precisión y repetibilidad de posicionamiento en ejes de máquinas herramienta de control numérico*” especifica métodos de evaluación para determinar precisión y repetibilidad de los ejes en máquinas herramienta de control numérico mediante mediciones directas. Esta norma describe en forma de ecuaciones cómo obtener características tales como precisión de posicionamiento bidireccional y unidireccional en cada eje de la máquina y desviación sistemática de posicionamiento, entre otros parámetros. Dentro de los puntos que se deben tomar en cuenta para el desarrollo de los métodos de evaluación se encuentra el control de temperatura y humedad dentro del ambiente donde se realizan las pruebas, debido principalmente a los errores generados por el fenómeno de la expansión térmica. Así mismo, se presentan recomendaciones para el desarrollo de los pruebas dependiendo del tamaño del equipo que se desee evaluar, la forma de interpretar los datos experimentales, así como también la forma de presentar los resultados del método de evaluación [40,41].

La ANSI/ASME cuenta también con un estándar para la evaluación de centros de maquinado CNC. La norma ANSI/ASME B5.54 [42] tiene como principal característica el establecer en forma global todos los tópicos que se deben evaluar en máquinas de tipo CNC con la finalidad de determinar su comportamiento general. Tal es el caso la determinación de la histéresis, repetibilidad, precisión de desplazamiento lineal y angular, errores de husillo, errores y respuesta a agentes externos tales como temperatura y vibraciones, etc. Dichas normas se basan en una recopilación de normas de la misma ASME relacionadas con la evaluación de Máquinas de Medición por Coordenadas (ASME B89.4.1), la norma para mediciones dimensionales afectadas por temperatura y humedad ambientales (ANSI/ASME B89.6.2), y la norma para ejes de rotación (ANSI/ASME89.3.4M). Por lo anterior, varios de los trabajos reportados relacionados con la evaluación de errores volumétricos en máquinas CNC están basados en la norma ASME B89.4.1.

En específico, la parte de la norma donde se mencionan las pruebas para determinar parámetros relacionados con la precisión de la máquina herramienta plasma una descripción simple de cómo realizar las pruebas con la ayuda de un interferómetro, así como también se menciona brevemente la forma de manipular los datos experimentales para encontrar los parámetros deseados. Cabe destacar que en esta norma se sugiere también el uso de otras herramientas para determinar los parámetros antes mencionados, como en el caso de la barra de bolas.

## Tipos de técnicas empleadas para la evaluación de máquinas herramienta

En la literatura se pueden encontrar varias técnicas o herramientas que permiten extraer datos experimentales del comportamiento de máquinas herramienta de tipo CNC con tamaños convencionales para realizar tareas de evaluación. En la Norma ISO 230-2 no se menciona algún tipo de herramienta en particular para realizar las pruebas experimentales de posicionamiento. Caso contrario, la Norma ANSI/ASME sugiere el uso de algunas herramientas para realizar este tipo de tareas. Básicamente, las herramientas empleadas para realizar pruebas experimentales de posicionamiento en máquinas herramientas pueden ser divididas en dos grandes grupos. Las herramientas diseñadas para el desarrollo de pruebas unidimensionales, como por ejemplo el interferómetro y las barras graduadas (*encoders*); y las herramientas para pruebas multidimensionales como por ejemplo la barra de dos esferas [43] y los sistemas de interferómetros autoalineados para máquinas multieje [44]. A continuación se presenta la descripción de algunos de estos equipos.

### *Interferómetro láser.*

El interferómetro láser es una herramienta utilizada muy frecuentemente en el desarrollo de pruebas para establecer características de precisión en desplazamientos lineales; comúnmente se emplean en la evaluación tanto de máquinas herramienta como de máquinas de medición por coordenadas. El principio de funcionamiento de este dispositivo está basado en combinar las formas de onda de dos haces coherentes de luz. Los dos haces coherentes de luz se obtienen mediante un divisor de haz, a partir de un láser estabilizado en frecuencia. Los dos haces, el de referencia y el de medición, son enviados de regreso a través de un divisor para formar perfiles de interferencia que son contabilizados en un fotodetector. La fase de uno de los haces de luz es

considerada como la referencia por lo que el perfil contabilizado llega a ser una medida del cambio en posición del segundo haz proveniente del espejo retrorreflector. Para llevar a cabo un proceso de medición de longitud se debe colocar un interferómetro en posición fija y el retrorreflector debe estar sobre el eje que se desea evaluar en una posición inicial definida como el cero, a partir de la cual se moverá para realizar las mediciones correspondientes. La medición se obtiene a partir de contar el número de perfiles multiplicado por la mitad de la longitud de onda del haz de láser empleado en la prueba. En la figura 30 se muestra un esquema de este sistema.

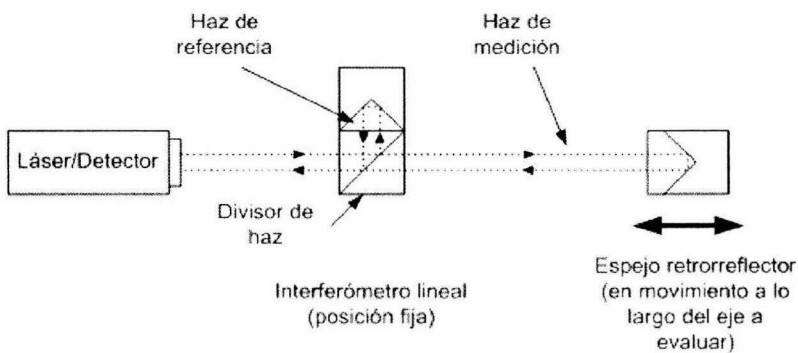


Figura 30. Interferómetro láser.

Cuando se requiere medir desplazamiento en varios ejes en forma simultanea, se han desarrollado algunos sistemas de interferometría con autoalineación para máquinas multieje. Este tipo de sistema basa su principio de funcionamiento en realizar una medición en forma diagonal con un sistema autoalineado. En la figura 31 se muestra dicho sistema.

### ***Barra telescópica con esferas.***

Este sistema es muy recomendado por la norma ANSI/ASME B5.54, puesto que provee una alternativa sencilla y rápida para la evaluación geométrica de ejes en máquinas herramienta de tipo CNC con 5 ejes o más. El sistema consiste en dos esferas conectadas mediante una barra telescópica en cuyo interior se localiza un sensor de desplazamiento de tipo LVDT. La prueba consiste en colocar uno de los extremos de la barra en una posición fija de la bancada de la máquina herramienta y el otro extremo sujeto al husillo. Posteriormente, se genera una rutina

para que la bancada (plano X-Y) realice una trayectoria circular, luego un arco de circunferencia en el plano X-Z y finalmente otro arco de circunferencia en el plano Y-Z. Con la ayuda del sensor de desplazamiento y un sistema de adquisición de datos se envía la información referente a las trayectorias reales que siguen los tres tipos de movimiento a una computadora donde son procesados. Las mediciones son procesadas mediante un software, el cual determina parámetros de error relacionados con juego mecánico, falta de ortogonalidad, errores periódicos, etc. En la figura 32 se muestra un esquema de este sistema.

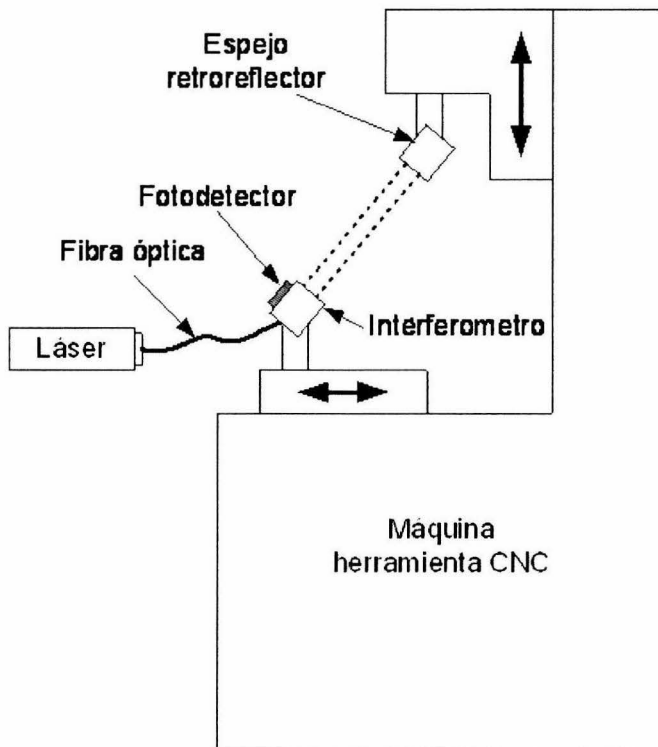


Figura 31. Interferómetro láser autoalineado para mediciones de error en máquinas multieje.



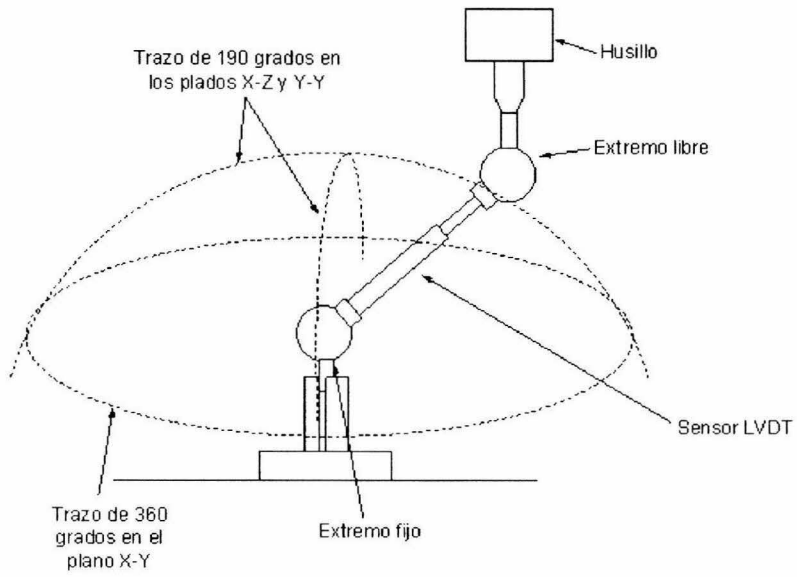


Figura 32. Sistema de barra con esferas

## 2. Planteamiento del problema

En el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del CCADET, UNAM se plantea, como una línea de investigación, el desarrollo de microequipo mecánico para la fabricación de micropiezas con formas tridimensionales complejas. El principal reto que asume el laboratorio como parte de esta línea de investigación, es generar tecnología de bajo costo. Lo anterior conduce a la generación de innovaciones tecnológicas basadas en métodos convencionales de bajo costo.

Una de las principales características de los prototipos desarrollados empleando como principal ideología el bajo costo, es que la eficiencia general de dichos prototipos disminuye debido al empleo de componentes o subsistemas que no brindan las mejores características de prestaciones a nivel precisión y otros aspectos de calidad. Esto puede observarse claramente realizando una comparación entre micromáquinas herramienta diseñadas para manufacturar piezas micrométricas, y siendo más específicos haciendo una comparación entre los componentes que las forman. En la tabla 1 se muestra una comparación entre micromáquinas herramienta: dos de ellas fueron diseñadas en Japón y la tercera es el prototipo de micromáquina herramienta mexicano.

Observando la tabla, se aprecian las diferencias tecnológicas que existen entre los dos microtornos desarrollados en Japón y el microcentro de maquinado mexicano. Los equipos japoneses cuentan con elementos de muy alta calidad y precisión, los cuales permiten controlar con gran exactitud los desplazamientos en los ejes de dichos equipos. Esta diferencia se ve directamente reflejada en el costo de los equipos: mientras que el costo en componentes del microcentro de maquinado mexicano es de unos cientos de dólares, los microtornos japoneses superan con facilidad los miles de dólares.

MICROEQ UIPO	CARACTERÍSTICAS GENERALES	COMPONENTE	ELEMENTO EMPLEADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Microtorno Japonés desarrollado por MEL (1999)	Resolución: 0.2µm Precisión: 1 µm Dimensiones generales: 32x28x30mm Actuadores: PZT's Husillo: Motor DC 15000 rpm Precio aproximado: 35,000 dólares	Actuadores	Piezoelectricos acoplados a platinas	Resolución nanométrica	Costo elevado >1000 dólares por eje
		Tipo de control	Lazo cerrado basado en un microprocesador	Alta capacidad para desarrollar algoritmos de control de posicionamiento.	--
		Sensores	Codificadores ópticos marca Olympus Optics	Alta precisión en movimientos	Costo elevado >2000 dólares por eje
		Elementos mecánicos	Sistemas de guías en "V"	Movimientos suaves y precisos	--
		Software	Control numérico asistido por computadora	Ambiente gráfico para el desarrollo de micropiezas mecánicas	--
Microcentro de Maquinado desarrollado en el LMM (2000)	Resolución: 1.8 µm Precisión: 62 µm Dimensiones generales: 136x160x85mm Actuadores: Motores de pasos acoplados a cajas de engranes	Actuadores	Motores de pasos (4 pasos/rev) acoplados a cajas de engranes desarrollados en el laboratorio.	Bajo costo <30 pesos por eje alta resolución	
		Tipo de control	Lazo abierto vía software	Sólo se cuenta con etapas de potencia como hardware	No se tiene un conocimiento exacto de la

	<p>Husillo: Motor de pasos 1200 rpm.          Precio aproximado: 110 dólares (únicamente materiales).</p>	Sensores	Contacto eléctrico	electrónico.  Bajo costo <1 dólar por eje	magnitud de desplazamiento en cada eje.  Solo permiten sensar la posición de origen y la posición de la materia prima cuando ésta es conductora
		Elementos mecánicos	Sistema de guías con transmisión de tornillos sinfin y cajas de engranes	Fácil alineación. auto ajustable.	Alto juego mecánico $\approx 300 \mu\text{m}$
		Software	C++	Todo es sistema de control esta desarrollado en este lenguaje y no es necesario hardware electrónico de control	Dependencia de una PC por MMH a controla. Es necesario desarrollar un algoritmo de control para cada pieza mecánica a manufacturar.
		Microtorno Japonés desarrollado por	Resolución: $0.195 \mu\text{m}$ Precisión: $5 \mu\text{m}$ Dimensiones generales: $100 \times 150 \times 100 \text{mm}$	Actuadores	Servomotores AC con optosensor de 1024 pasos/rev marca Yaskawa

NanoWave (2002)	Actuadores: Microservo actuadores de AC. Husillo: Motor DC 10000 rpm. Precio aproximado; 30,000 dólares.				los 2000 dólares
		Tipo de control	Lazo cerrado	Control preciso sobre la posición del rotor del motor.	No se tiene conocimiento de las características de movimiento en los sistemas de guías.
		Sensores	Integrados a los servomotores	Alta resolución	--
		Elementos mecánicos	Sistemas carros y guías basados en rodillos cruzados y transmisión de tornillo sinfin	Movimientos suaves y precisos.	Precios elevados
		Software	Control numérico asistido por computadora	Interfase gráfica	--

Tabla 1. Comparativa entre tres tipos de MMH's (Los datos de precios fueron obtenidos de charlas realizadas con miembros de los grupos que desarrollaron dichos microequipos durante el "International Workshop on Microfactories 2004" celebrado en la ciudad de Shanghai, China.)

Una tendencia que se observa en los desarrollos japoneses es el hecho de intentar llegar escalas micro y submicrométricas en las primeras etapas de la investigación. Tal propuesta diverge de la propuesta presentada por el LMM donde se busca llegar al micromundo a partir de una serie de generaciones. Estas tendencias se ven directamente reflejadas en los costos finales de los desarrollos generados, por ejemplo, en el caso de la propuesta presentada por el LMM, el hecho de partir de tecnologías conocidas, con costos comerciales abatidos por su comercialización, representa una de las razones por las cuales el desarrollar microequipo por generaciones es de menor costo que las investigaciones basadas en sistemas novedosos y de alta precisión, donde se requiere de grupos de investigadores más amplios y los componentes que se generan para desarrollar los equipos, al no ser comerciales, resultan caros porque absorben todos los gastos de investigación y desarrollo en sus componentes aunado a la investigación y desarrollo de equipo final. Así mismo, en el caso de desarrollar microequipo mediante generaciones brinda la oportunidad de evaluar, en forma evolutiva, el comportamiento de muchas de las variables físicas que se ven afectadas por la reducción de escala.

La precisión total de una micromáquina recae en las características de cada uno de sus subsistemas, tanto mecánicos como de control. A nivel de sistemas mecánicos y actuadores, algunos investigadores desarrollan técnicas de diseño robusto que auxilian en la elección de componentes y configuraciones para los diferentes subsistemas que componen a las MMH's [38]. Dichas técnicas se basan en aplicar el método de Taguchi para identificar los parámetros de una máquina que influyen sobre la tolerancia de maquinado y sobre las guías de diseño para garantizar que el proceso de miniaturización sea robusto. Con este tipo de teorías de diseño, se busca dejar la menor responsabilidad posible del desempeño del sistema a la parte de control. No obstante, algunos investigadores preocupados por conocer y determinar las características reales de sus MMH's se han dado a la tarea de establecer métodos para evaluar los productos generados por sus microequipos. Dichos métodos representan formas indirectas de evaluación [45].

En un inicio, las principales herramientas empleadas para la evaluación de MMH's fueron los microscopios o sistemas de visión técnica. Actualmente existen algunos métodos para evaluar microequipo siguiendo la misma idea de medir micropiezas manufacturadas, pero las técnicas que ahora se emplean tienen costos muy elevados debido al tipo de sensores que se utilizan

dentro de los dispositivos desarrollados para tales fines [32-35]. Tal es el caso de los codificadores ópticos que pueden alcanzar precios por encima de los 1000 dólares o los sensores de posición basados en fibra óptica cuyos precios son por encima de los tres mil dólares.

A los métodos antes mencionados se les conoce como métodos indirectos, debido a que sólo permiten realizar una cuantificación de la precisión de trabajo y las capacidades de desempeño de la MMH, sin llegar a proporcionar información precisa acerca de las fuentes de errores existentes. Para los investigadores que desarrollan micromáquinas en varios sitios alrededor del mundo ha resultado viable el empleo de este tipo de métodos, ya que los sensores, actuadores y en general los componentes que se emplean dentro de los desarrollos garantizan el desempeño del microequipo, sin la necesidad de llevar a cabo una evaluación directa [33, 39] de su desempeño a nivel precisión. Por lo anterior, el hacer evaluaciones de microequipo por métodos indirectos resulta una fuente de información limitada, puesto que es necesario recurrir a otros métodos de evaluación que permitan conocer las características de precisión de cada uno de los componentes de la micromáquina a evaluar, más aún si se trata de micromáquinas que no cuentan con sensores ni sistemas de control sofisticados que garanticen una determinada precisión dentro de sus especificaciones.

En el caso de las MMH's desarrolladas en el LMM, donde no se cuenta con sensores de alta precisión ni sistemas de control que garanticen el comportamiento del mismo, resulta *una necesidad primordial el conocer las fuentes de error de cada una de sus componentes, con la finalidad de:*

- a) Determinar las características de precisión en micromáquinas herramienta;*
- b) Determinar qué características de las MMH's influyen en su precisión;*
- c) Establecer mecanismos de bajo costo que permitan mejorar sus características de precisión;*
- d) Y finalmente, definir una metodología que sirva como base para la generación de un estándar que permita comparar la precisión de MMH's desarrolladas alrededor de esta línea de investigación en diferentes partes del mundo.*

## Objetivo

Proponer una metodología para la evaluación de micromáquinas herramienta, con el fin de conocer sus características de precisión y aplicarlo en una micromáquina herramienta de primera generación desarrollada en el LMM como caso de estudio.

## Alcances

1. Identificar y definir las principales características de la tecnología para realizar la evaluación geométrica de una MMH.
2. Determinar la viabilidad de compensación de errores mediante software.
3. Definir y desarrollar un sistema de control adaptativo para la compensación de errores en una MMH.
4. Proponer y desarrollar una técnica que permita obtener información sobre las características de precisión en MMH's.
5. Definir el modelo matemático de las fuentes de error relacionadas con la precisión en MMH's.
6. Con base en los puntos 4 y 5, definir y desarrollar el modelo computacional que permita establecer las características de precisión en MMH's.
7. Implementar y validar los puntos 4-6 en caso de estudio.
8. Definir la metodología de evaluación para microequipo.

## Aportaciones del trabajo

La propuesta de este trabajo consiste en establecer una metodología de evaluación para micromáquinas herramienta que permita conocer las características precisión asociados a MMH's, es decir, evaluar estos dispositivos en forma directa para establecer parámetros relacionados con las fuentes de error que permitan el desarrollo de sistemas de control adaptativo para incrementar sus cualidades de precisión.



# 3. Propuesta

## Ventajas del uso de un método de evaluación directa en la optimización de MMH's aplicado a la manufactura de microflechas.

Al emplear métodos indirectos es posible conocer parámetros como precisión y repetibilidad de una máquina herramienta, pero es casi imposible emplear esta información para diseñar mecanismos que permitan mejorar su desempeño. La propuesta que se presenta en este trabajo es la de compensar errores mediante software como una alternativa para generar microequipo de bajo costo y alta eficiencia. Con la finalidad de fundamentar la teoría anterior, como primer paso se demostró cómo es posible aumentar las características de precisión del primer prototipo de MMH desarrollada en el LMM mediante un sistema de control adaptativo basado en software.

El objetivo de este desarrollo fue incrementar las cualidades de precisión de la MMH para manufacturar flechas con diámetros menores que los que hasta ese momento era posible manufacturar (200  $\mu\text{m}$ ), y tratar de igualar el tamaño de las micropartes manufacturadas en el microtorno japonés desarrollado por el Dr. Okazaki y su grupo.

Un sistema de control adaptativo permite compensar variables cuyo comportamiento dinámico es significativo y varía con el tiempo, es decir, que tienen la capacidad de realizar tareas de autoajuste [46]. En el caso de la micromáquina, es posible identificar varios parámetros que varían con el tiempo y que requieren de un sistema que se adapte continuamente. Tal es el caso de la posición de la materia prima, la posición de la herramienta, el desgaste de la herramienta, así como también las características geométricas de los componentes mecánicos de la micromáquina.

Como primer paso se realizó una investigación para determinar cuál es la posición ideal que debe existir entre la herramienta y la pieza de trabajo con la finalidad de mejorar el proceso de manufactura. Para el caso de fabricación de flechas se recomienda que el cortador sea colocado a

una distancia de 10% del diámetro de la flecha que se está manufacturando por debajo de su eje de giro.

El sistema propuesto hace uso de un sensor de contacto eléctrico que se emplea en la MMH para la detección de la materia prima. Básicamente, el sistema de control adaptativo determina la posición relativa que existe entre la materia prima y la herramienta para cumplir, en cada proceso de corte, con la restricción plasmada en el párrafo anterior. Con ello se mejora, a su vez, la precisión de manufactura en la MMH. El procedimiento de control desarrollado se conforma por los siguientes pasos:

1. El primer paso es una rutina que realiza la tarea de desbaste y careado sobre la materia prima, con el fin de garantizar que las características geométricas de la flecha sean uniformes y excluir errores en las mediciones por cuestiones de excentricidad y defectos de la materia prima.
2. El segundo paso consiste en emplear un disco como palpador, del cual se conocen sus características geométricas, para realizar una rutina de mediciones en distintos puntos del perímetro de la flecha, las cuales se almacenan en un archivo de texto.
3. En el tercer paso se determina el diámetro y la posición del centro que corresponde a la flecha que se está manufacturando.
4. En el cuarto paso se realiza otro proceso de toma de mediciones del perímetro de la flecha empleando como palpador el cortador utilizado en el proceso de manufactura y se almacenan en un archivo de texto.
5. En el paso final, se emplean los resultados obtenidos en el tercer paso para determinar la posición relativa que existe entre la punta del cortador y el eje de giro de la flecha. Así mismo, se determina la profundidad de corte y la nueva posición del cortador en relación al eje de giro de la flecha para realizar la siguiente rutina de corte.

El proceso que se conforma por los pasos antes mencionados se repite tantas veces como sea necesario para manufacturar una flecha de un diámetro determinado. En la figura 33 se presenta un diagrama de flujo que ilustra el sistema de control adaptativo propuesto para la manufactura de microflechas.

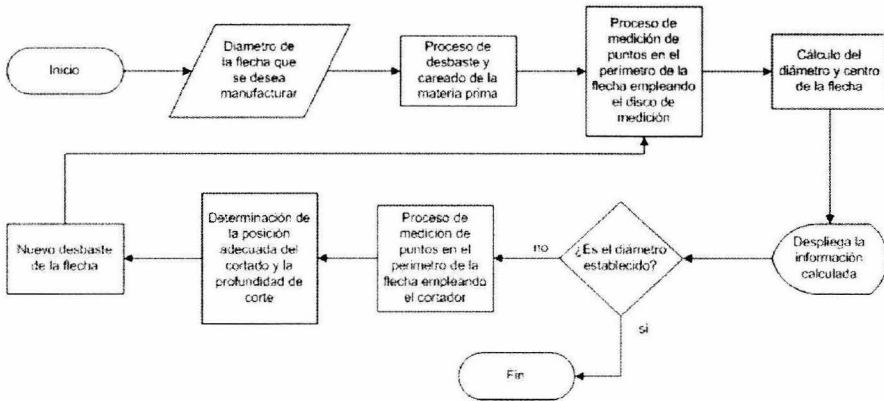


Figura 33. Diagrama de flujo del sistema de control adaptativo.

A continuación se hace una explicación profunda de la propuesta de sistema de control adaptativo para optimizar el rendimiento de una MMH.

### *Proceso de desbaste y careado*

Este proceso consiste en realizar un maquinado preliminar sobre la materia prima para eliminar imperfecciones y problemas de excentricidad derivados de la falta de rectitud de la misma, así como también para anular la desalineación que se presenta a la hora de fijar la materia prima en el mandril. En la figura 34 se muestra una ilustración de este proceso.

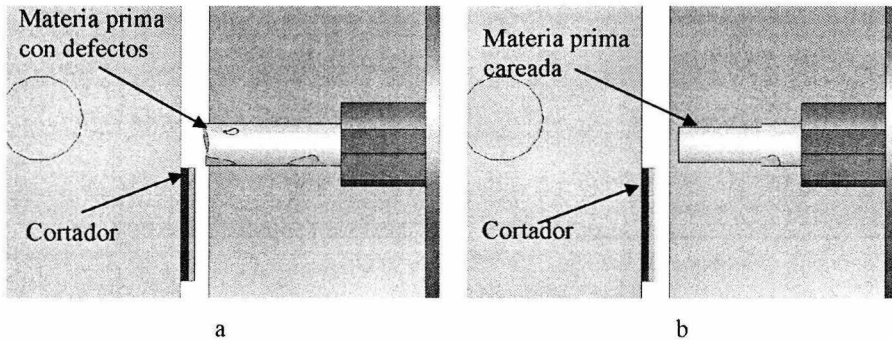


Figura 34. Rectificado de la materia prima. a) Materia prima con defectos; b) Materia prima careada.

### *Medición de la flecha*

El sistema de control adaptativo realiza mediciones sobre la flecha en forma radial para obtener varios puntos de su perímetro, los cuales son empleados en el siguiente proceso. Esta tarea se

desarrolla con la ayuda de un disco de medición. En la figura 35 se muestra una imagen del sistema de medición.

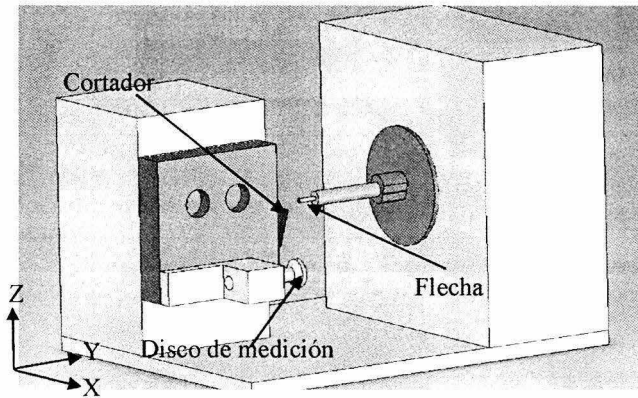


Figura 35. Configuración del sistema de control adaptativo para la manufacturar flechas finas.  
(Flecha, disco de medición y cortador).

El proceso de medición se lleva a cabo mediante un programa de cómputo desarrollado en lenguaje C, el cual realiza la siguiente secuencia de movimientos:

- Como primer paso se coloca el disco de medición por debajo de la flecha que se esté manufacturando y se mueve a lo largo del eje "Z" hasta que exista contacto eléctrico.
- En el siguiente paso, el disco se mueve hacia atrás a lo largo del eje "X" una distancia razonable para compensar errores ocasionados por el juego mecánico existente en la micromáquina y después se mueve sobre el eje "Z" un distancia "dZ".
- A continuación, el disco se mueve hacia adelante sobre el eje "X" y dos condiciones son examinadas: Una de ellas es que haya contacto eléctrico entre la flecha y el disco de medición; y la segunda es que exista un movimiento prolongado del disco sobre el eje "X" sin que aparezca algún contacto eléctrico.
- Si la primera condición se da, las coordenadas (X, Z) del punto donde sucede el evento son almacenadas en un archivo de texto y regresa al paso "a" de la secuencia.
- Si la segunda condición se presenta, el programa se finaliza.

Los datos almacenados en el archivo de texto corresponden a los puntos de una circunferencia cuyo diámetro es la suma de los diámetros del disco de medición y de la flecha manufacturada. En las figuras 36 y 37 se muestra de forma gráfica cómo se lleva a cabo el proceso de medición.

### *Cálculo del diámetro y centro de la flecha*

Por medio de un algoritmo de optimización, se calcula el centro de la flecha y su diámetro tomando en cuenta las mediciones realizadas con el disco metálico. Este algoritmo de optimización está basado en la siguiente ecuación de error,

$$err_i = \sum_{i=1}^k (r_i - r_{mi})^2, \quad i=1,2,\dots, n \quad (70)$$

donde  $err_i$  es el error cuadrático que existe entre el radio esperado y el radio aproximado;  $r_i$  es la distancia que existe entre los puntos experimentales y el centro de la circunferencia buscado; y  $r_{mi}$  es la distancia buscada.

$$r_i = \sqrt{(X_i - x_i^0)^2 + (Z_i - z_i^0)^2}, \quad i=1,2,\dots, n \quad (71)$$

$$r_{mi} = \frac{\sum_{i=1}^k r_i}{k}; \quad i=1,2,\dots, n \quad (72)$$

donde  $k$  es el número de puntos experimentales;  $X_i, Z_i$  son las coordenadas experimentales;  $x_i^0, z_i^0$  son las coordenadas de los puntos que conforman la región que contiene el centro de la flecha; y  $n$  es el número de elementos en la región que contiene el centro.

El algoritmo computacional encuentra, a partir de un punto inicial  $x_1^0, z_1^0$  que es calculado en forma experimental antes de trabajar con este algoritmo, el punto  $x^{0*}, z^{0*}$  para el cual la función de error tiene un valor mínimo. Básicamente, el proceso para encontrar el valor óptimo del centro se enfoca en hacer una tarea de muestreo dentro de una ventana que contiene el centro inicial. Con el valor de  $r_{mi}^*$  se calcula el diámetro de la flecha mediante la siguiente ecuación:

$$d_s = 2 \cdot r_{mi}^* - d_d \quad (73)$$

donde  $d_s$  es el diámetro de la flecha manufacturada y  $d_d$  es el diámetro del disco de medición.

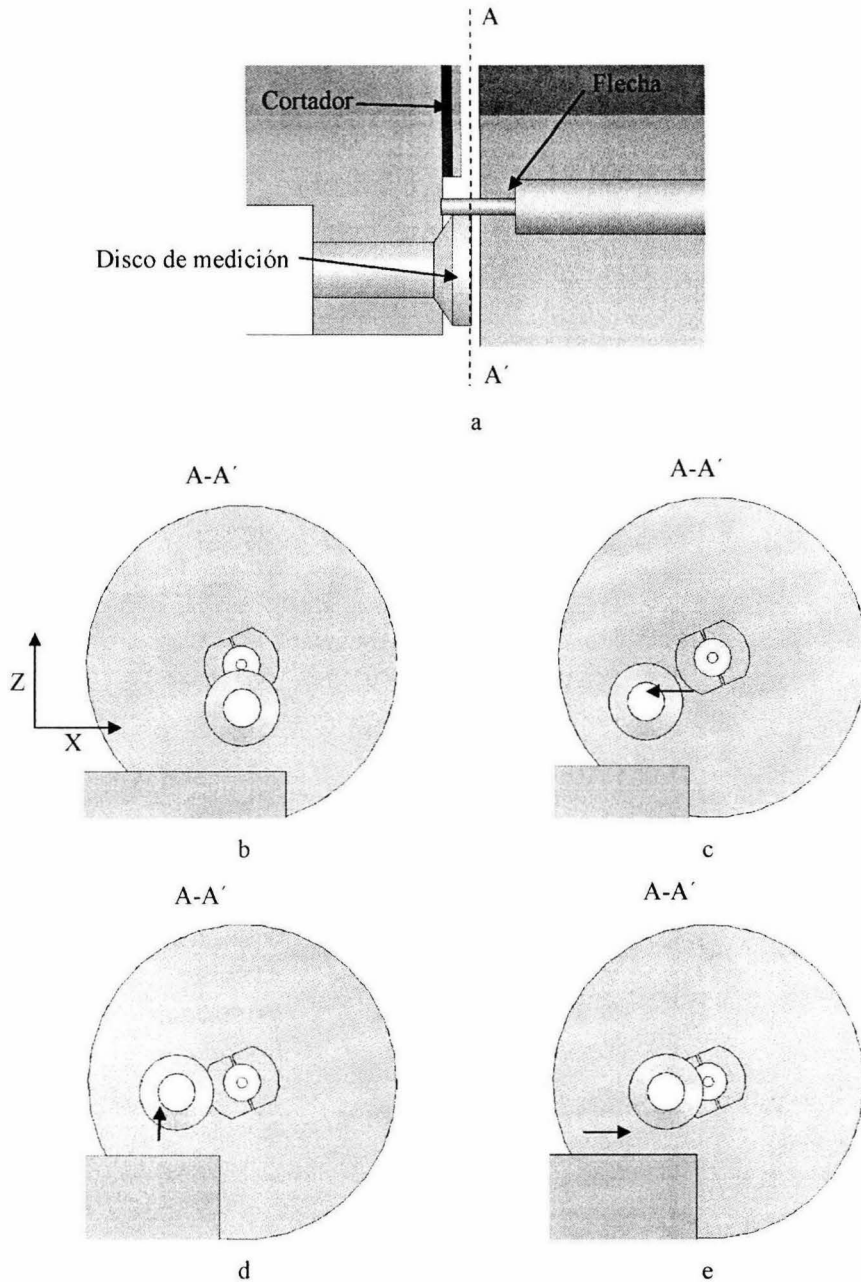


Figura 36. a) Vista transversal del sistema de control adaptativo para la manufactura de flechas finas; b)-e) Secuencia de movimientos que genera el programa cuando se cumple la condición de contacto eléctrico.

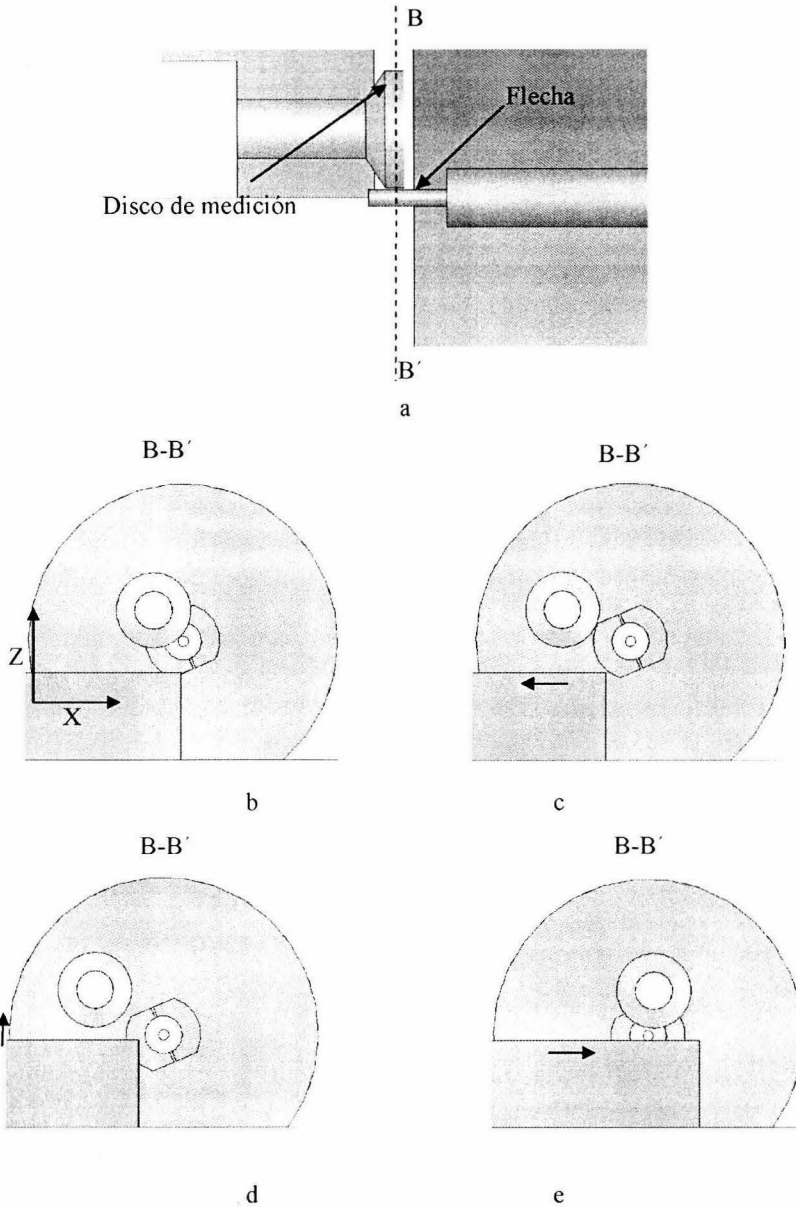


Figura 37. a) Vista transversal del sistema de control adaptativo para la manufactura de flechas finas; b)-e) Secuencia de movimientos que deben cumplirse para que el programa termine su ejecución.

### *Determinación de la posición adecuada del cortador y de la profundidad de corte*

Para determinar la posición relativa de la herramienta con respecto al eje de giro de la flecha manufacturada se realiza una nueva toma de datos ocupando en este caso, como instrumento de medición, el cortador. Empleando en un inicio la siguiente ecuación de error,

$$err_{2j} = \sum_{l=1}^{k_1} (r_{2lj} - r_{2mj})^2 + (d_s - 2 \cdot r_{2mj})^2, \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (74)$$

Donde,  $err_{2j}$  representa la suma del error cuadrático existente entre el radio medido y el radio aproximado, y el error que existe entre el diámetro de la flecha calculado en el proceso anterior y el radio aproximado;  $r_{2lj}$  es la distancia que existe entre los puntos experimentales y el centro de la circunferencia buscado; y  $r_{2mj}$  es el radio aproximado.

$$r_{2lj} = \sqrt{(X_l - x_j^1)^2 + (Z_l - z_j^1)^2}, \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (75)$$

$$r_{2mj} = \frac{\sum_{l=1}^{k_1} r_{2lj}}{k_1}; \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (76)$$

Donde,  $k_1$  es el número de puntos experimentales;  $X_l, Z_l$  son las coordenadas experimentales;  $x_j^1, z_j^1$  son las coordenadas de los puntos que conforman la región que contiene el centro de la flecha con respecto a la herramienta de corte; y  $n$  es el número de elementos en la región que contiene el centro.

En este proceso, el algoritmo computacional encuentra, el punto  $x^{1*}, z^{1*}$ , para el cual la función de error 74 tiene un valor mínimo. A partir de esto se considera  $r_{m2}^*$  como el diámetro de la flecha de corte. Por último la nueva posición del cortador en el eje "Z" está dada por,



$$NPZ = Z^* - 0.1 \cdot ds \quad (77)$$

En la figura 38 se muestra la imagen de la nueva posición.

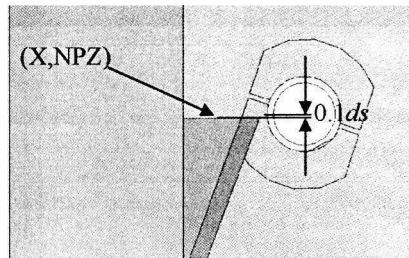


Figura 38. Posición adecuada del cortador con respecto al eje de giro de la flecha.

Como último proceso dentro del algoritmo de control adaptativo se determina la profundidad de corte mediante la siguiente ecuación.

$$PC = x^* - d_s + C_c \quad (78)$$

donde  $C_c$  es una constante que determina la profundidad de corte.

En la figura 39 se muestra una imagen del sistema de control adaptativo para la manufactura de flechas finas implementado en la MMH desarrollada en el LMM.

Con el fin de analizar las capacidades de desempeño del sistema propuesto, se realizaron pruebas para manufacturar, con ayuda del prototipo de MMH de primera generación, la flecha más pequeña posible.

A continuación se explica una de las pruebas desarrolladas al sistema de control adaptativo. En la prueba que aquí se presenta se empleó como materia prima una barra circular de latón de  $1/8''$ , un disco de medición de 2.39 mm y como cortador, la navaja de un cortador de oficina. Los datos de desplazamientos que se emplean dentro de las pruebas experimentales están expresados en pasos

de motor: un paso de motor equivale a  $1.87 \mu\text{m}$  de desplazamiento lineal en el eje correspondiente de movimiento. Después de hacer el proceso de careado para obtener una flecha uniforme, comienza el proceso de medición para encontrar el centro de la flecha manufacturada. En la figura 40 se muestra una gráfica de los datos experimentales obtenidos durante uno de los procesos de medición realizados con el disco.

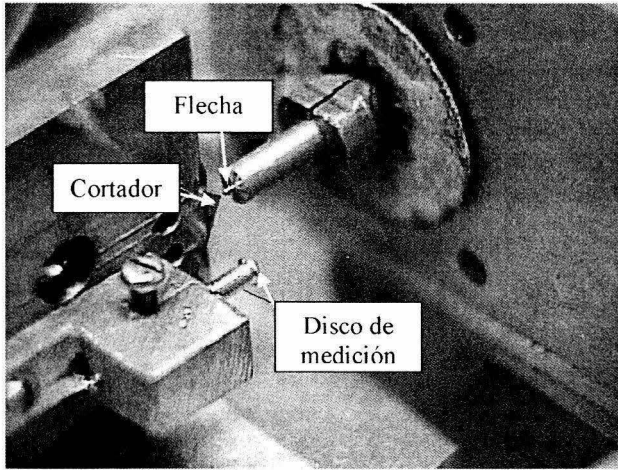


Figura 39. Configuración del Sistema de control para manufacturar flechas finas. (Flecha, cortador y disco metálico).

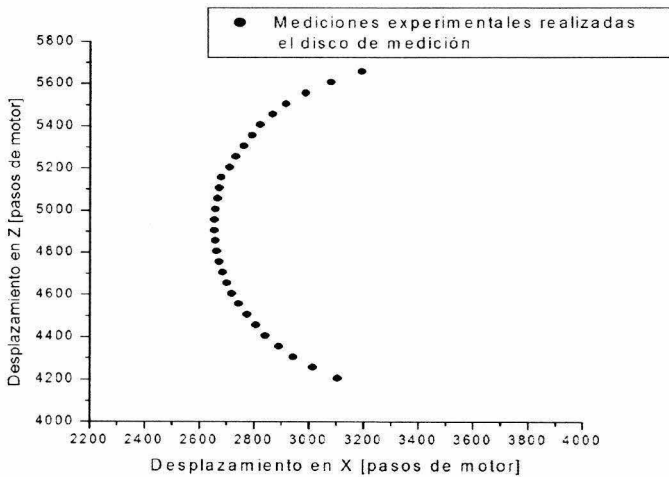


Figura 40. Datos experimentales obtenidos con el disco de medición.

En la gráfica anterior se tienen 31 datos con un  $dZ$  igual a 50 pasos de motor entre cada medición. Después de aplicar la primera etapa del algoritmo, se obtuvo el centro teórico de la circunferencia que se ajusta a dichos puntos y el radio de dicha circunferencia. En la figura 41 se muestran los resultados obtenidos.

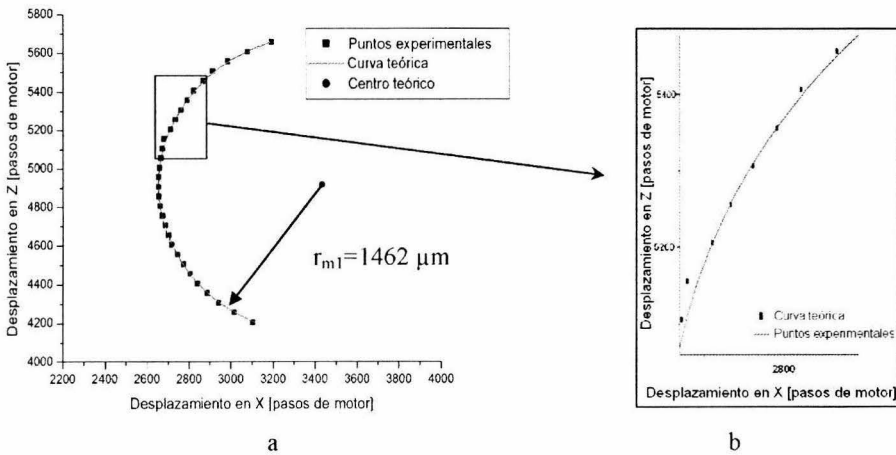


Figura 41. Resultado obtenido con el algoritmo para encontrar los parámetros de la circunferencia que se ajusta a los valores experimentales obtenidos a partir del disco de medición. a) Gráfica completa, b) Acercamiento para observar con más detalle las diferencias que hay entre los valores experimentales y la curva teórica.

Los valores encontrados para la el diámetro de la flecha y la localización de su centro se muestran a continuación.

$$d_s = 534 \mu\text{m}$$

$$(X_i^{0*}, Z_i^{0*}) = (3435, 4916)$$

La siguiente tarea del software es medir puntos del perímetro de la flecha empleando como palpador el cortador. En la gráfica 42 se muestran los valores experimentales obtenidos. En este proceso de medición se obtienen únicamente datos de un cuarto de la circunferencia de la flecha y el proceso comienza en la parte baja de la flecha. Lo anterior se debe a que la información obtenida en la primera parte del algoritmo, referente al diámetro de la flecha, permite determinar

los parámetros necesarios analizando un menor número de puntos. Con este algoritmo se determina nuevamente el diámetro de la flecha y la posición que debe existir entre el cortador y el eje de giro de la flecha para realizar el siguiente proceso de corte. Finalmente, el algoritmo calcula la profundidad de desbaste.

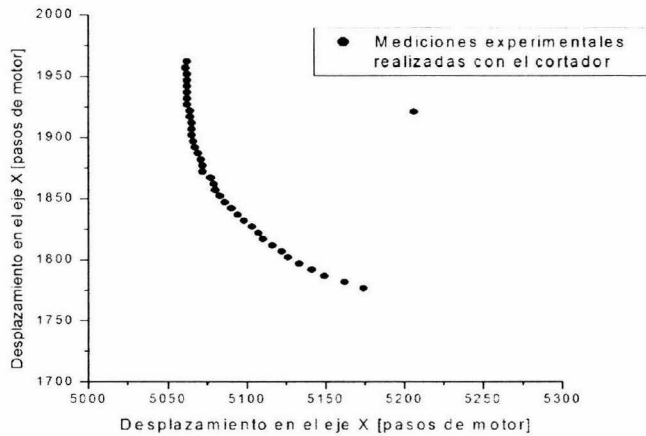


Figura 42. Datos experimentales obtenidos con el cortador.

Con ayuda de las ecuaciones 71-74 se encuentra el centro de la flecha con respecto a la punta del cortador obteniendo los siguientes resultados

$$d_s = 534 \mu m$$

$$(X_i^{1*}, Z_i^{1*}) = (5206, 1921)$$

Como el cortador se encuentra fijo en otra posición distinta a la del disco de medición, la posición relativa entre éste y la flecha es diferente a la que existe entre el disco de medición y la flecha.

En la figura 43 se muestran los resultados obtenidos con este segundo algoritmo.

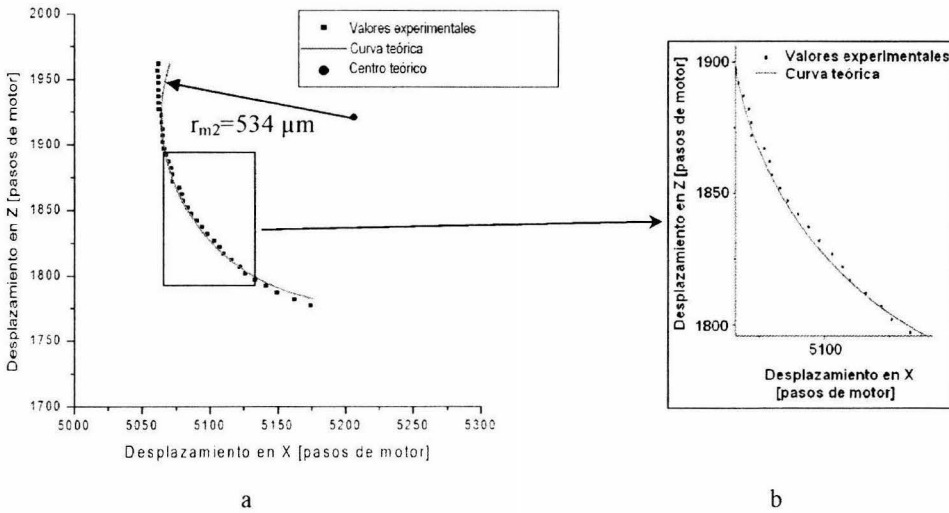


Figura 43. Resultado obtenido con el algoritmo para encontrar los parámetros de la circunferencia que se ajusta a los valores experimentales obtenidos a partir del cortador.

a) Gráfica completa, b) Acercamiento para observar con más detalle las diferencias que hay entre los valores experimentales y la curva teórica.

Este proceso se repite tantas veces como sea necesario. En el caso de este experimento, se repitió hasta que se obtuvo una flecha de  $50 \mu\text{m}$ , con errores generales en el sistema de  $\pm 8 \mu\text{m}$ . Con este resultado se igualó el desempeño del microtorno japonés. En la figura 44 se muestra una imagen de la flecha manufacturada con ayuda del sistema de control adaptativo.

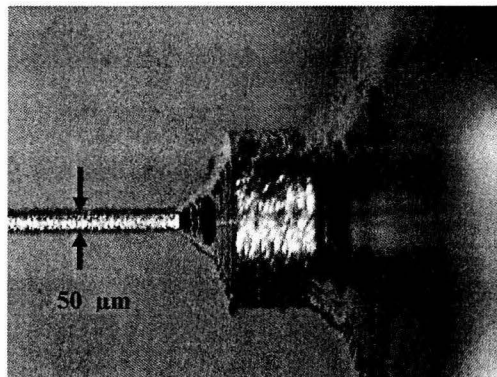


Figura 44. Flecha fabricada en la micromáquina desarrollada en la UNAM.

Con el trabajo anterior se demostró que es posible mejorar las características de precisión de una MMH en más de un 50% con base en la compensación de errores durante el proceso de manufactura, por lo que este tipo de sistemas de control adaptativo resulta una opción viable para incrementar la precisión de microequipo que se desarrolla con tecnología que no permite obtener buenas características de precisión. Así mismo, es posible enfatizar que haciendo uso de mecanismos simples y un sistema de control vía software es posible igualar las características de funcionamiento obtenidas con dispositivos costosos y de alta precisión, como los que incorpora el microtorno japonés.

Por otro lado, una de las principales desventajas del método antes descrito es el tiempo de manufactura de componentes, puesto que el hecho de compensar errores con evaluaciones durante realizadas durante los procesos de manufactura repercute directamente en el tiempo de proceso. Por lo que es necesario desarrollar metodologías de evaluación que permitan conocer características de precisión y repetibilidad en los ejes de micromáquinas herramientas con la finalidad de conocer características de funcionamiento en un principio y, por consecuencia, que permitan implementar técnicas de control para optimizar su funcionamiento.

Una de las principales necesidades del LMM referente a la evaluación de microequipo está relacionada con la evaluación dimensional de precisión y repetibilidad en los ejes de movimiento en las MMH's. Por esta razón a continuación se presenta una propuesta para evaluar dichas características.

## **Propuesta para evaluar MMH's**

Como primer paso dentro del desarrollo de la propuesta para evaluar microequipo se estudió y estableció la técnica que se empleó para obtener los datos experimentales de desplazamientos en los ejes, que posteriormente fueron utilizados para determinar los parámetros comprometidos en dicha evaluación. Para ello fue indispensable analizar algunas alternativas de medición existentes en el mercado.

### Técnicas para medir desplazamientos en MMH's

Las técnicas para medir desplazamientos en los ejes en máquinas herramientas, que fueron mencionadas en los antecedentes, son las más comúnmente empleadas para aplicar las diferentes metodologías de evaluación que se presentan en normas. Cuando se habla de máquinas herramientas convencionales, cuyos volúmenes mínimos de trabajo pueden llegar hasta los 25x25x25 cm en máquinas con dimensiones generales de 1x1x1 m, dichas técnicas resultan funcionales y fáciles de emplear. Implementar dichas técnicas en un equipo con volumen de trabajo de 20x35x20 mm y dimensiones totales de 130x160x85 mm, resulta una tarea complicada y casi imposible. Por ejemplo, si se intenta emplear la técnica de la barra con esferas, se tendría que pensar en colocar un elemento con dimensiones aproximadas de  $\Phi 12 \times 120$  mm en una micromáquina con dimensiones menores.

Una de las alternativas más atractivas es el uso de interferómetros láser de fibra óptica, los cuales son idóneos para obtener información de desplazamientos lineales en espacios reducidos. Este tipo de herramientas de medición son empleados en las micromáquinas de medición por coordenadas. Otra alternativa es el uso de sensores de posición basados en codificadores ópticos como los empleados en el microtorno japonés. En la tabla 2 se muestran algunas de las alternativas más para emplearse como técnicas de medición en la metodología de evaluación de microequipo.

Principio de sensado	Longitud de sensado [mm]	Dimensiones [mm]	Precisión [ $\mu$ m]
Interferometría con fibra óptica	1000	335x176x75	0.632
Codificador óptico	300	34x13.2x12.4	1
Corriente de Eddy	6	14x27x25	0.002
CCD	40	100x45x300	1
LVDT	$\pm 10$	$\phi 11.5 \times 130$	Depende del sistema de adquisición de datos
Capacitivo	Elem. cond.: 10 Elem. no cond.: 20	$\phi 9 \times 24$	0.4

Tabla 2. Alternativas para medir desplazamientos en MMH's [47-50].

Haciendo un análisis de las alternativas presentadas en la tabla 2 es posible observar que los rangos de medición de tres de las alternativas presentadas en la tabla no alcanzan a cubrir los desplazamientos totales de los ejes del primer prototipo de MMH desarrollada en el LMM; y en el caso de los tres sistemas que sí cumplen con la longitud de desplazamiento, dos de ellos tienen un costo muy elevado, como es el caso del codificador óptico y el interferómetro de fibra óptica. En el caso del sensor por CCD, resulta una buena opción y, aunque sus dimensiones exceden por mucho el tamaño de una micromáquina que puede tener como dimensiones máximas 150x150x150 mm, sería posible trabajar en un arreglo para su aplicación. Otro aspecto importante a considerar de los sistemas descritos, es que la información que entregan corresponde a movimientos unidimensionales y en caso de que se desee obtener datos experimentales con información sobre la interrelación de los tres ejes, es necesario contar con un sensor por eje, lo cual incrementa el costo de inversión y hace que se tenga que dejar de lado la posibilidad de tener un sistema de bajo costo.

Con la finalidad de implementar una técnica de medición de bajo costo, se propuso hacer uso de la infraestructura con la que cuenta el Laboratorio de Metrología de este mismo centro; en específico, hacer uso de la máquina de medición por coordenadas (MMC) para llevar a cabo las mediciones experimentales de desplazamientos en los ejes de la MMH. Para tal propósito se propuso la colocación de una esfera en el portaherramientas de la MMH, la cual iba a ser medida con la ayuda del palpador de la MMC (ver figura 45). Para llevar a cabo las mediciones de desplazamiento, se fijó la MMH en un punto dentro del espacio de trabajo de la MMC y se programó para que moviera el portaherramientas a su posición de origen. En ese punto se midió la esfera con ayuda del palpador de la MMC para determinar su centro (en estas pruebas se palpó 4 puntos). A partir de ese punto se desplazó el portaherramientas a una nueva posición y se realizó otra medición del centro de la esfera. El proceso de mediciones se basó en desplazar el portaherramientas por varios puntos del volumen de trabajo de la MMH para medir el centro de la esfera en cada uno de dichos puntos y hacer una comparación entre las lecturas de los desplazamientos experimentales y los desplazamientos programados.



El principio de operación de la MMC es hacer contacto, con la ayuda de un palpador, sobre la superficie del elemento a medir en un sentido. Inmediatamente después ésta da marcha atrás y valida la lectura en el momento que deja de hacer contacto con la superficie del elemento.

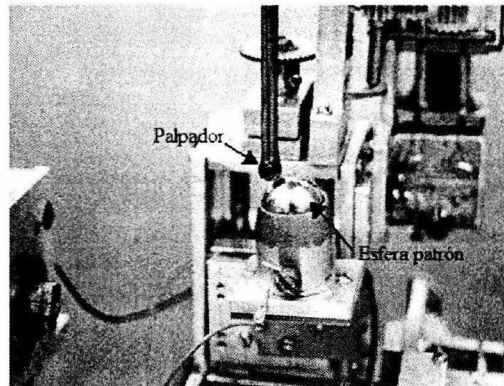


Figura 45. Técnica de medición empleando una MMC.

Tras algunos ensayos que se realizaron con esta técnica, fue evidente que la fuerza de palpación mínima de la MMC (0.4N) era lo suficientemente grande como para mover los carros de los ejes de la MMH. La rigidez estructural de la MMH no soportó la fuerza de contacto del palpador. Por esta razón, las lecturas obtenidas mediante este método arrojaron resultados muy desalentadores.

De la experiencia generada a partir del sistema de control adaptativo y la propuesta de emplear la MMC para la medición de desplazamientos en la MMH, se decidió plantear una técnica de medición que incorporara por un lado, el método de contacto eléctrico para la toma de lecturas y por el otro, el empleo de elementos patrón para la medición de desplazamientos, en el cual se incorporara un palpador y un bloque de referencia.

Finalmente, la propuesta de técnica para la medición de desplazamientos en la MMC es: *“Un sistema de automedición montado en la MMH basado en contacto eléctrico empleando dos elementos patrón: uno con la función de palpador y el otro como elemento de referencia”*.

Para que un elemento sea considerado como elemento patrón o un sensor sea considerado adecuado para emplearse dentro de alguna metodología de evaluación, las desviaciones en el caso

del elemento patrón y la resolución en el caso del sensor debe ser, como mínimo tres veces mayor que la resolución del sistema por analizar.

Un elemento muy común que puede considerarse como elemento patrón es el balín. Los balines comerciales tienen desviaciones muy pequeñas. Para demostrar esto, se evaluaron balines de acero inoxidable con diámetros de 1/8", 3/16", 5/16", 3/8". El dispositivo que se empleó para realizar dichas pruebas fue una máquina de redondez con la que cuenta el Laboratorio de Metrología de este centro. Para dichas pruebas se fabricaron los elementos que posteriormente iban a ser utilizados dentro de la evaluación de la micromáquina. Dichos elementos están conformados por el balín unido a un vástago que permite fijarlo en la posición deseada dentro de la MMH.

Para manufacturar los vástagos se empleó barra redonda de latón y se unieron a los balines con soldadura de estaño. Tras realizar las pruebas de redondez, se detectaron desviaciones del orden de 3  $\mu\text{m}$  en algunos puntos de los balines. En la figura 46 se presenta la imagen de uno de los palpadores desarrollados y las mediciones de error obtenidas. En un principio se concluyó que se debían a la presencia de basuras en la superficie de los balines, pero tras hacer revisiones de las superficies en el microscopio no se detectó ninguna basura. Después se observó que entre más cercana era la medición a la parte de soldadura, las desviaciones se incrementaban, por lo cual se propuso otra técnica de unión.

La siguiente alternativa fue unir los dos elementos mediante resina epóxica. Para ello se diseñó un vástago que en un extremo tuviera una base para contener al balín y tener así un menor problema al pegarlo. Después de hacer mediciones sobre las esferas de diferentes diámetros encontró que las desviaciones eran menores a 1.5  $\mu\text{m}$ , y se optó por emplear el balín de 5/16 que fue el que tuvo desviaciones de aproximadamente 0.6  $\mu\text{m}$ . En la figura 47 se muestra una foto que corresponde al palpador ensamblado con resina epóxica y la hoja de evaluación del balín que ahí aparece.

En la técnica de evaluación propuesta, dos balines se emplean como elementos patrón. Uno de ellos, como ya se mencionó arriba, cumple la función de palpador y el segundo es el elemento de

referencia. El palpador (B1) se fija en el portaherramientas de la MMH y el elemento de referencia (B2) se coloca en distintas posiciones del volumen de trabajo de la misma máquina con el fin de establecer una matriz de posiciones, la cual será posteriormente analizada para obtener los errores de cada una de las posiciones que la conforman. Con la ayuda de B1 se toca la superficie de B2 y se almacenan las coordenadas en que se detecta contacto eléctrico. En la figura 48, se muestra un esquema del sistema propuesto.

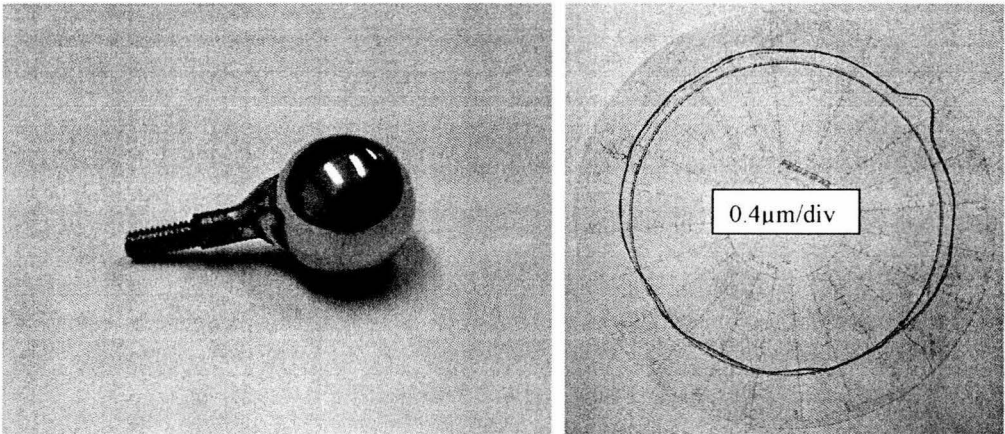


Figura 46. Hoja de desviaciones de un balín de 5/16 pulgadas de diámetro soldado con estaño al vástago.

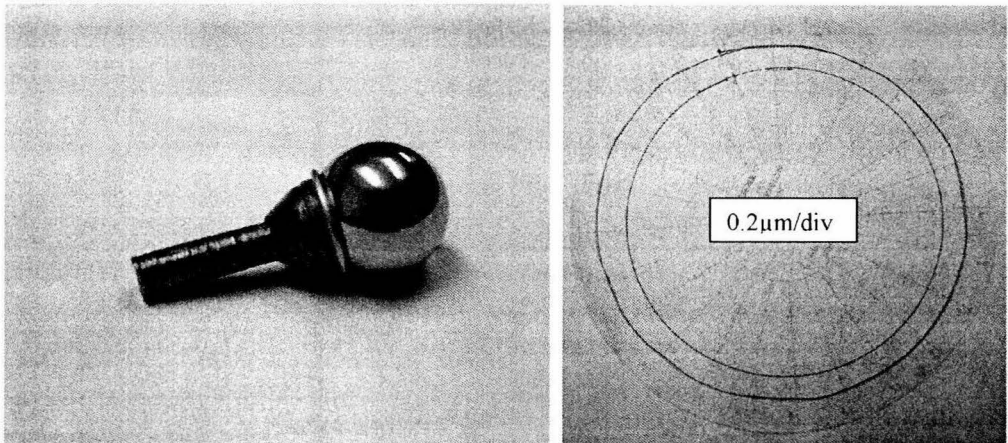


Figura 47. Hoja de desviaciones de un balín de 5/16 pulgadas de diámetro pegado con resina epóxica al vástago.

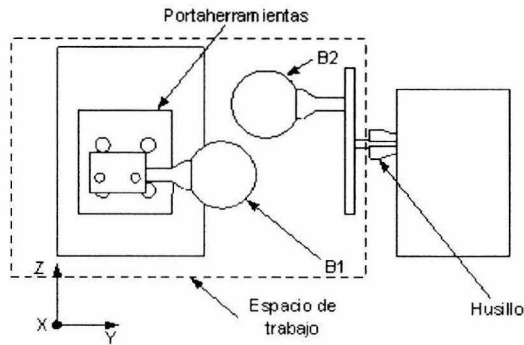


Figura 48. Esquema de sistema de medición de desplazamientos para la MMH.

Con la finalidad de automatizar la toma de lecturas experimentales se diseñó un software de control capaz de realizar las mediciones y generar la base de datos en forma automática. Con objeto de contar con información de varios puntos alrededor de la superficie de la esfera, en el algoritmo de control se dividen las mediciones en tres grupos. Cada uno de estos grupos está conformado por mediciones con dos ejes en movimiento y un eje constante. El primer grupo de mediciones contiene el eje “X” en posición constante y B1 se mueve a lo largo de los ejes “Y” y “Z” para realizar las mediciones con incrementos constantes  $\Delta z$ ; en el segundo grupo, la posición en el eje “Y” es constante y B1 se mueve a lo largo de los ejes “X” y “Z” para realizar las mediciones con incrementos constantes  $\Delta z$ ; y finalmente, en el tercer grupo la posición en el eje “Z” es constante y B1 se mueve a lo largo de los ejes “X” y “Y” para realizar las mediciones con incrementos constantes  $\Delta x$ . En la figura 49 se observan los tres grupos de mediciones.

La forma en que el algoritmo computacional realiza el proceso de medición de desplazamientos se explica a continuación:

- a) Como primera operación, la MMH mueve el portaherramientas a su posición de origen.
- b) A continuación, B1 se mueve sobre el eje “X” hasta una posición similar a la de B2 sobre el eje “Y”.
- c) Como tercer movimiento, B1 se mueve sobre el eje “Y” una distancia preestablecida hasta quedar por debajo de B2.

- d) El siguiente paso es mover a B1 sobre el eje Z hasta que se detecte un contacto eléctrico con B2.
- e) En ese momento la información del punto con coordenadas (X,Y,Z) donde se llevó a cabo el contacto es almacenada en un archivo de texto.
- f) Una vez almacenada la información anterior, B1 se desplaza hacia atrás sobre el eje “Y” una distancia dY, garantizando siempre que dY sea mayor al juego mecánico existente en la MMH.
- g) Después, B1 se mueve sobre el eje “Z” hacia adelante dZ y se desplaza en dirección “Y” hasta hacer nuevamente contacto.
- h) Las operaciones e-g se repiten varias veces hasta un valor de  $Z_{max}$ . En la figura 50 se muestra gráficamente el procedimiento anterior.

La explicación anterior solo hace referencia al grupo de mediciones donde “X” es constante. Para los otros dos grupos de mediciones se emplea un algoritmo computacional similar.

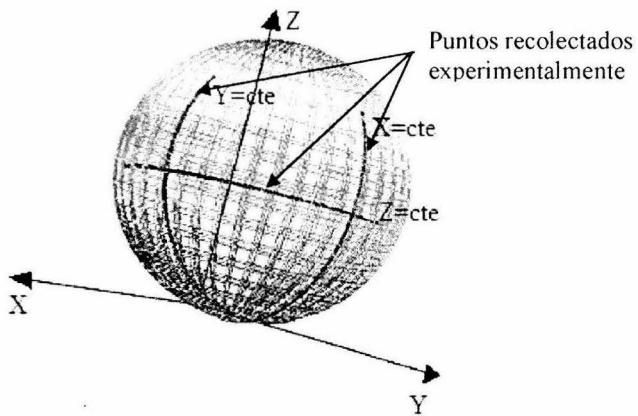


Figura 49. Grupos de mediciones.

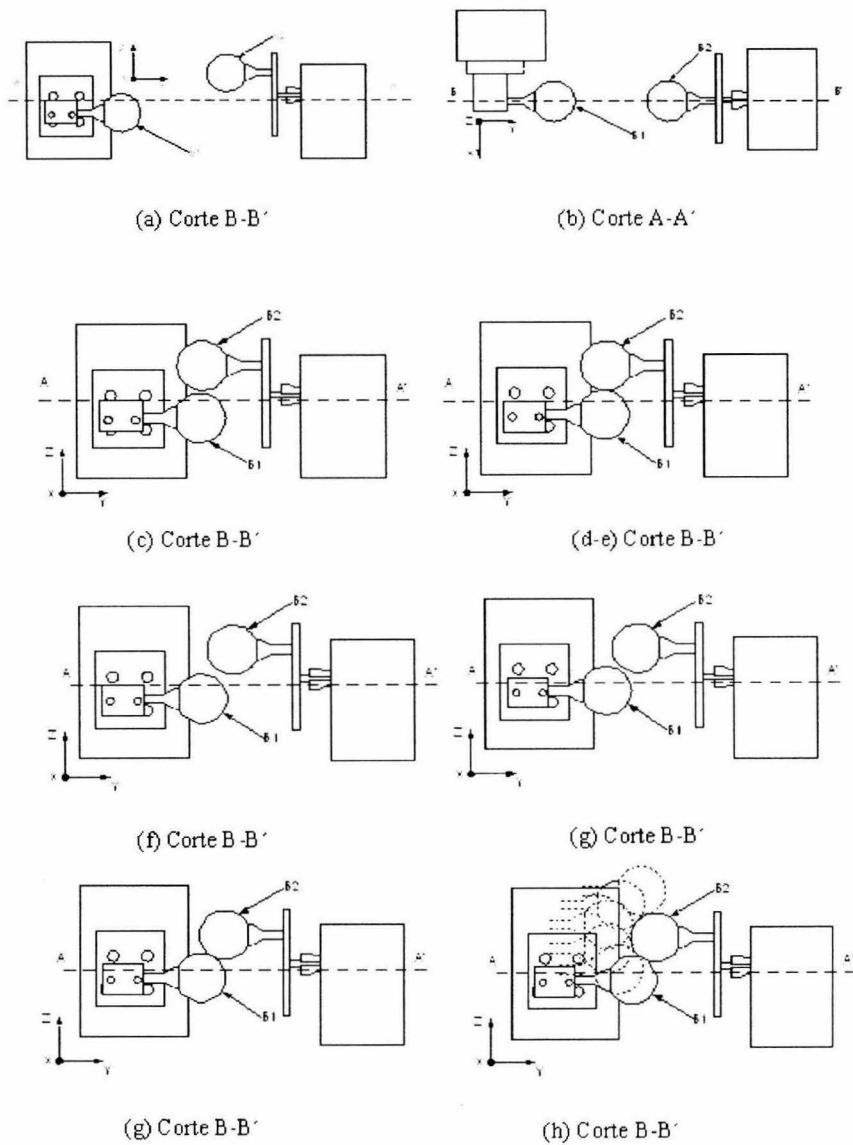


Figura 50. Procedimiento para realizar las mediciones de desplazamiento en la MMH.

El algoritmo computacional mencionado en la parte anterior se repite colocando el balín patrón en varios puntos del volumen de trabajo de la MMH. Puesto que es imposible mover punto a punto el balín patrón dentro del volumen de trabajo de la MMH, en esta propuesta se busca generar una matriz de mediciones que permita, en un principio, conocer en forma general los errores existentes en la MMH. Con dicho objetivo y con la necesidad de automatizar en la medida de lo posible el proceso, se hizo uso del husillo MMH. Se diseñó un disco de soporte para el balín patrón de 26 mm de diámetro, el cual cuenta con 9 orificios colocados a diferentes distancias con respecto a su centro. El primer orificio está a 3 mm del centro y los demás están a 1 mm de separación uno del otro (ver figura 51a). Las mediciones se generan en forma automática, cada vez que se termina de medir superficie de B2 en una determinada posición, el usillo rota un paso equivalente a 10 grados y se realiza una nueva toma de lecturas hasta que se termina la circunferencia (36 lecturas por plano de posición). Cuando finaliza con la operación anterior, el soporte del balín patrón se mueve manualmente sobre el eje Y un incremento constante y se repite la operación. Las operaciones anteriores se repiten colocando el balín a diferentes distancias con respecto al centro del disco, generando así una matriz de posiciones en forma cilíndrica (figura 51b).

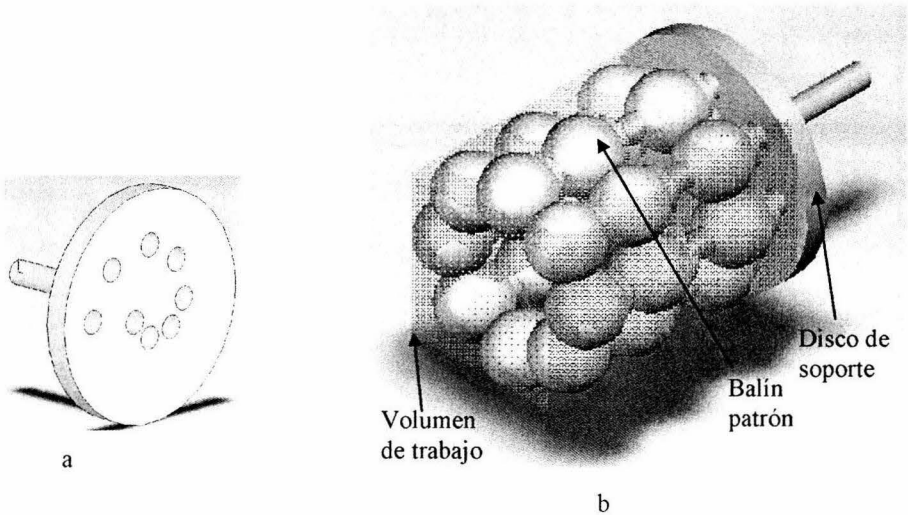


Figura 51. a) Disco para sujetar el balín de referencia; b) Matriz de mediciones

### ***Determinación del error en MMH's.***

Los datos que se generan del proceso anterior son empleados para encontrar los errores asociados a la MMH. Dichos errores generan desviaciones en las mediciones que fueron realizadas. La idea de encontrar las fuentes de errores asociados a la MMH se basa en *“determinar las desviaciones que existen entre las mediciones experimentales de la superficie del balín patrón con respecto a la geometría real del mismo”*, es decir, a partir de conocer la geometría de los elementos que se emplean en la toma de mediciones, es posible determinar los errores de la MMH a nivel volumétrico.

Para ser más claros, en la figura 52 se muestra una imagen de las mediciones experimentales realizadas a un balín de referencia colocado en un lugar dentro del volumen de trabajo de la MMH. Dichas mediciones experimentales tiene influencia de distintas fuentes de error que se ven representados al comparar las mediciones experimentales con respecto a la curva que corresponde al perímetro de la esfera en el plano de medición correspondiente. Las desviaciones existentes se deben a diferentes parámetros de error asociados con los componentes de la MMH que influyen en su precisión.

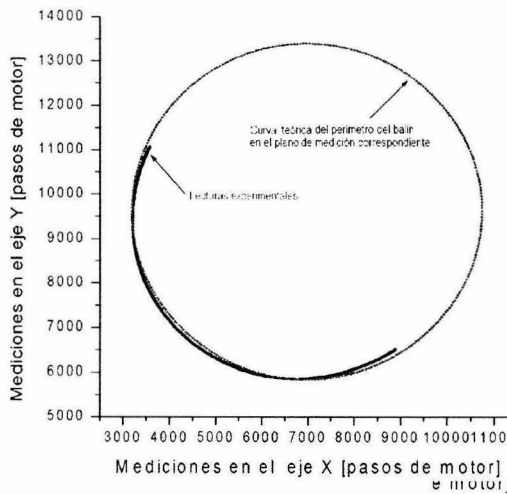


Figura 52. Correlación entre los puntos obtenidos experimentalmente y la curva del perímetro correspondientes al balín real.



Como primer paso para encontrar los errores de la MMH, se debe determinar el centro asociado a las mediciones experimentales que se obtienen a partir de la técnica descrita en el apartado anterior. Existen varios métodos numéricos que permiten encontrar el centro de una esfera asociado a puntos que se encuentran en el perímetro de la misma, desde sistemas de ecuaciones que permiten, a partir de tres puntos contenidos en una esfera, encontrar su centro teórico hasta aquel en el que se emplea la técnica de mínimos cuadrados para resolver esta tarea. La técnica de mínimos cuadrados es la más comúnmente empleada en MMC's. En este trabajo se recurre al uso de una técnica basada en algoritmos genéticos para resolver este problema. Se propone esta técnica debido a que en los cálculos para determinar los errores de las MMH's se emplea una técnica similar y el diseño del algoritmo completo resulta más sencillo.

Los algoritmos evolutivos son métodos de búsqueda adaptativa, los cuales imitan la teoría genética biológica evolutiva para encontrar la solución óptima de problemas donde los métodos numéricos conocidos comúnmente tienen complicaciones en su aplicación. Los algoritmos evolutivos determinan los cambios en una población de individuos cuyos parámetros están determinados por genes, los cuales cambian probabilísticamente con respecto al tiempo (generaciones) gracias a la aplicación de operadores inspirados en la genética evolutiva, tal es el caso de la mutación y cruce, dando lugar a nuevas generaciones de individuos con mayor capacidad de adaptarse al sistema donde se desenvuelven. Durante cada generación se lleva a cabo una selección, entre los padres y descendientes, para determinar cuáles individuos permanecen en la próxima generación. Según las teorías evolutivas, los individuos más aptos de la población tienen mayor probabilidad de sobrevivir y generar descendencia para, de esta manera, transmitir su herencia biológica a las nuevas generaciones [52-55].

En la solución de un problema mediante algoritmos evolutivos se deben considerar tres aspectos importantes, los cuales son: la representación, los operadores genéticos y la función de aptitud

- *La representación.* En los algoritmos evolutivos cada individuo es un candidato para la solución de un problema y su representación está basada en una codificación en forma análoga a los cromosomas de los sistemas biológicos.

- *Los operadores genéticos.* Los operadores genéticos establecen la forma en que se desarrollará una nueva generación. La mutación se considera uno de los operadores básicos, la cual proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en la vecindad (entorno) de los individuos de la población.
- *La función de aptitud.* Dentro de cada algoritmo genético existe un valor de aptitud asociado a cada individuo, el cual determina su capacidad para sobrevivir y para producir descendencia.

El algoritmo que se emplea para encontrar el centro asociado a los puntos medidos está basado en los tres puntos antes mencionados. Como primer paso dentro del diseño del algoritmo, se estableció la codificación de los individuos, los cuales son representados como un conjunto triada de parámetros aleatorios,

$$\begin{array}{ll}
 x_1^0, y_1^0, z_1^0 & \text{– individuo 1} \\
 x_2^0, y_2^0, z_2^0 & \text{– individuo 2} \\
 \dots & \dots \\
 x_n^0, y_n^0, z_n^0 & \text{– individuo } n
 \end{array} \tag{79}$$

Donde  $x_i^0, y_i^0, z_i^0 \quad i = (1, 2, \dots, n)$  - representan las coordenadas aleatorias que se le asignan al centro de la esfera B2, los cuales representan la población cero del algoritmo.

Por otra parte, se tienen los datos experimentales,

$$\begin{array}{ll}
 X_1, Y_1, Z_1 \\
 X_2, Y_2, Z_2 \\
 \dots & \dots \\
 X_m, Y_m, Z_m
 \end{array} \tag{80}$$

donde  $X_l, Y_l, Z_l \quad (l = 1, 2, \dots, m)$  - representan las coordenadas de los puntos en los que B1 tuvo contacto eléctrico con B2.

Para establecer que tanto se adaptan los individuos generados de forma aleatoria a la solución del problema, fue necesario establecer una función aptitud. Dicha función se basa en obtener el error cuadrático correspondiente a la diferencia entre las distancias de los puntos experimentales y los puntos que se generan en forma aleatoria y el radio real, el cual es igual a la suma de los radios de la esfera de referencia y de la esfera de palpación. La siguiente ecuación representa la función aptitud del algoritmo.

$$err_i = -\sum_{l=1}^k \left[ \sqrt{(X_l - x_i^0)^2 + (Y_l - y_i^0)^2 + (Z_l - z_i^0)^2} - (R+r) \right]^2; \quad i = (1,2,\dots,n), l = (1,2,\dots,m) \quad (81)$$

Donde  $err_i$  es el error cuadrático que existe entre el radio que definen las mediciones experimentales  $X_l, Y_l, Z_l$  con respecto al punto  $x_i^0, y_i^0, z_i^0$ ; y  $R+r$  es la suma de los radios de los balines B1 y B2 que definen el radio de la esfera real.

Como ya se mencionó antes, en el algoritmo computacional se genera una población inicial de  $n$  individuos  $x_i^0, y_i^0, z_i^0$  obtenidos a partir de un procedimiento aleatorio, los cuales son sometidos a la función de aptitud representada por la ecuación 81. Como siguiente paso, dentro del algoritmo se buscan  $k$  valores  $x_h^0, y_h^0, z_h^0$  donde  $err_i$  tiene el menor valor. Los individuos elegidos son considerados como los padres de la siguiente generación en el algoritmo computacional. Para desarrollar la siguiente generación se aplica un factor de mutación, el cual describe una composición de padres  $x_h^{0*}, y_h^{0*}, z_h^{0*}$  ( $h=1,2,\dots,k$ ) donde cada padre genera  $s = n/k$  descendientes, los cuales se definen de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} x_{k+p}^0 &= x_h^{0*} + rand_i(\Delta x), \\ y_{k+p}^0 &= y_h^{0*} + rand_i(\Delta y), \\ z_{k+p}^0 &= z_h^{0*} + rand_i(\Delta z), \end{aligned} \quad (82)$$

$$(h = 1, 2, \dots, k)$$

$$(p = 1, 2, \dots, s)$$

donde  $x_{k+p}^0, y_{k+p}^0, z_{k+p}^0$  representan a los hijos de la nueva generación;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  son los pasos de la mutación,  $rand(u)$  es un número aleatorio uniformemente distribuido sobre el rango  $[0, u]$

Los hijos y los padres de cada generación conforman la nueva población de individuos que se somete nuevamente a la función de aptitud. Después de un número definido de generaciones, el individuo  $x_i^0, y_i^0, z_i^0$  para el cual  $err_i$  es mínimo es considerado como el centro teórico de la esfera B1 y es nombrado  $x^0, y^0, z^0$ . A continuación se presenta un diagrama de flujo propuesto de este algoritmo.

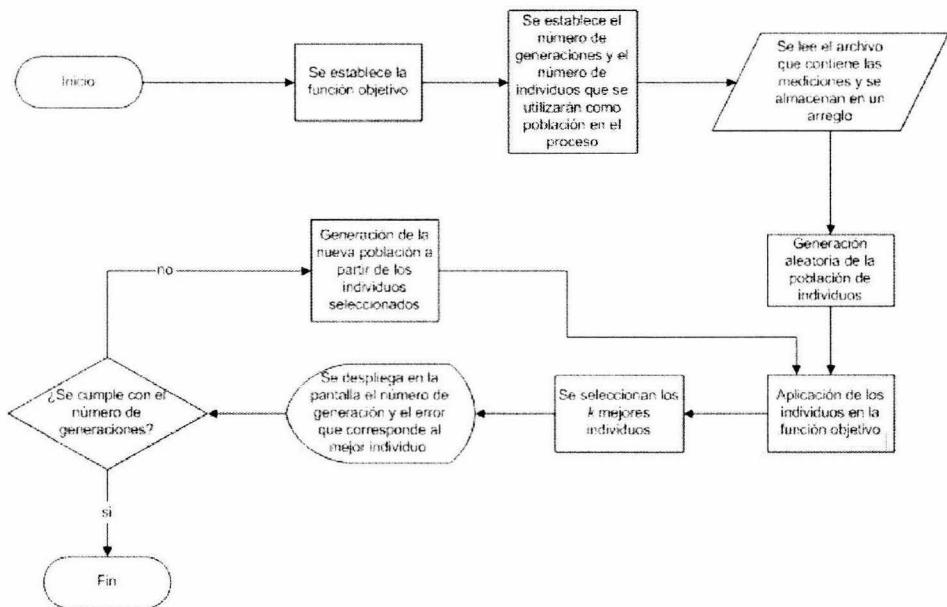


Figura 53. Diagrama de flujo para el algoritmo de localización del centro de la esfera.

Una vez que se ha encontrado el centro teórico del balón B1, se determinan los errores que están asociados a ese punto. Los errores que afectan las mediciones experimentales y finalmente la determinación del centro de la esfera se deben principalmente a tres aspectos: la falta de precisión de los elementos que conforman a la MMH, a su distorsión térmica y a la rigidez.

A los errores que tienen que ver con la posición relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo cuyo valor varían lentamente con respecto al tiempo y dependen directamente de la estructura de la máquina herramienta son conocidos como errores cuasiestáticos. Estos errores pueden ser divididos en tres clases: los resultantes de la geometría y cinemática de la máquina; los resultantes de la variación estática y baja de fuerzas, tal como es caso de peso muerto de la máquina, las guías demasiado ajustadas y el peso de la materia prima; y los resultantes de esfuerzos inducidos térmicamente en la estructura de la máquina [51].

En este trabajo se busca encontrar los errores volumétricos asociados con las características geométricas de los componentes de cada uno de los ejes que conforman a la MMH, así como también se busca establecer en medida de lo posible las fuentes de dichos errores para fincar una base que permita la compensación de errores mediante software.

Por esta razón, para determinar los errores asociados al centro del balín de calibración se trató de establecer, en primera instancia, un modelo matemático que permitiera identificar dichas fuentes de error. Los errores geométricos asociados a los movimientos sobre un eje son seis: tres de ellos corresponden a errores de translación y los otros tres corresponden a errores de rotación. Los errores de translación están compuestos por errores de posicionamiento, y falta de rectitud tanto vertical como horizontal; mientras que los errores rotacionales están definidos por el mandril, la inclinación y la rotación. En el caso de una máquina herramienta multieje a parte de tener estos seis errores por cada eje, se tienen también los errores por falta de perpendicularidad entre ejes, por lo que las variables de error para una máquina con tres ejes de movimiento son 21 [31].

Un modelo matemático general de las fuentes de error asociadas con las componentes de los ejes de las micromáquinas herramienta puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\delta_x = f_1(x, y, z) + \alpha_{xy} + \alpha_{xz} \quad (83)$$

$$\delta_y = f_2(x, y, z) + \alpha_{yx} + \alpha_{yz} \quad (84)$$

$$\delta_z = f_3(x, y, z) + \alpha_{zx} + \alpha_{zy} \quad (85)$$

donde  $\delta$  representa el error asociado a cada eje,  $f$  es la función de error asociada a errores de translación que puede ser representada por polinomios, y  $\alpha$  es la función de error asociada a la falta de perpendicularidad entre los ejes.

Los errores de translación, en el caso de la MMH, pueden ser representados por los errores que se tienen en la caja de reducción, en los tornillos sinfin y la falta de rectitud en guías debido a las componentes normales a cada eje. En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones que expresan dichos errores para el eje X; así mismo, se presenta la ecuación que representa la falta de perpendicularidad.

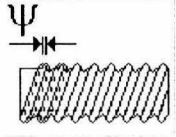
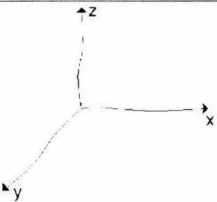
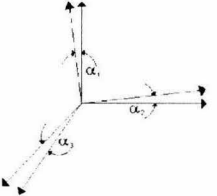
Fuente de error	Ecuaciones	Representación gráfica
Error generado por posicionamiento del eje	$C_{xx1}x + C_{xx2}x^2 + \dots$ $\dots + C_{xxn}x^n + C_{xx(n+1)}x \operatorname{sen}\left(\frac{x\pi}{P_f} + \phi_x\right)$	
Error generado por falta de rectitud en el eje ejes	$C_{yx1}y^2 + C_{zx1}z^2 + C_{yx2}y^3 + C_{zx2}z^3 + \dots$ $\dots + C_{yx(n-1)}y^n + C_{zx(n-1)}z^n$	
Error generado por la falta de perpendicularidad	$y \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_{yx}\right) + z \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_{zx}\right)$	

Tabla 3. Ecuaciones matemáticas para los errores traslacionales.

De la tabla 3, las constantes  $C_{xx1}$ - $C_{xxn}$  y  $\phi_x$  representan algunos de los errores como son; errores de las cajas de engranes, el regreso a la posición de origen y los errores relacionados con los tornillos sinfin; las constantes  $C_{yx1}$ - $C_{yx(n-1)}$  y  $C_{zx1}$ - $C_{zx(n-1)}$  representan la falta de rectitud entre

ejes; las constantes  $\alpha_{yx}$  y  $\alpha_{zx}$  representan la desviación de ángulo de los ejes Y y Z sobre el eje X; y finalmente  $P_r$  es el paso del tornillo sinfin que forma parte de la transmisión de cada eje. Todas las constantes antes descritas corresponden al modelo por determinar. Para el caso de los otros dos ejes se emplean representaciones similares. A continuación se presenta el modelo propuesto para determinar las fuentes de error asociadas a una MMH.

$$\delta_x = \sum_{i=1}^n \left[ C_{xxi} x^i + C_{xyi} y^{(i+1)} + C_{zxi} z^{(i+1)} \right] + C_{x(i+1)} \text{sen} \left( \frac{z}{P_r} + \phi_x \right) + y \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{yx} \right) + z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{zx} \right) \quad (86)$$

$$\delta_y = \sum_{i=1}^n \left[ C_{yyi} y^i + C_{xyi} x^{(i+1)} + C_{zyi} z^{(i+1)} \right] + C_{y(i+1)} \text{sen} \left( \frac{x}{P_r} + \phi_y \right) + x \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{xy} \right) + z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{zy} \right) \quad (87)$$

$$\delta_z = \sum_{i=1}^n \left[ C_{zxi} z^i + C_{xzi} x^{(i+1)} + C_{yzi} y^{(i+1)} \right] + C_{z(i+1)} \text{sen} \left( \frac{y}{P_r} + \phi_z \right) + x \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{xz} \right) + y \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{yz} \right) \quad (88)$$

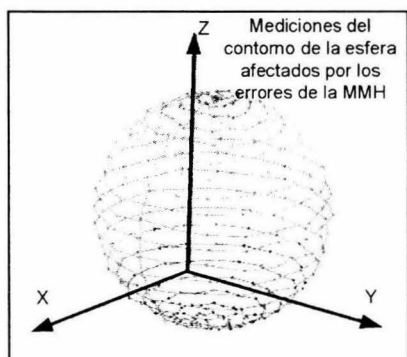
Para obtener el sistema de ecuaciones de la MMH, consideramos que dada la magnitud de errores que presenta la micromáquina, los componentes de los polinomios con orden mayor a dos tienden a ser muy pequeños, además de que pueden llegar a influir con inestabilidades al sistema; en otras palabras, este tipo de polinomios incrementa el riesgo de compensar errores aleatorios. Por lo anterior, las ecuaciones que definen los errores existentes en la micromáquina quedan de la siguiente forma.

$$\delta_x = C_{xx1}x + C_{yx1}y^2 + C_{zx1}z^2 + C_{xx2}x \text{sen} \left[ \frac{z}{P_r} + \phi_x \right] + y \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{yx} \right) + z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{zx} \right) \quad (89)$$

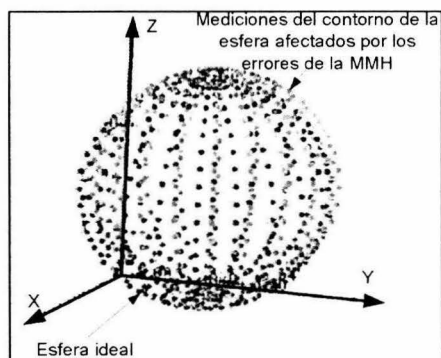
$$\delta_y = C_{yy1}y + C_{xy1}x^2 + C_{zy1}z^2 + C_{yy2}y \text{sen} \left[ \frac{x}{P_r} + \phi_y \right] + x \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{xy} \right) + z \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{zy} \right) \quad (90)$$

$$\delta_z = C_{zz1}z + C_{xz1}x^2 + C_{yz1}y^2 + C_{zz2}z \text{sen} \left[ \frac{y}{P_r} + \phi_z \right] + x \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{xz} \right) + y \cos \left( \frac{\pi}{2} + \alpha_{yz} \right) \quad (91)$$

En la figura 54 se muestra un esquema de dos esferas, una de ellas es la esfera teórica, mientras que la otra es una esfera generada con los errores asociados a la MMH.



(a)



(b)

Figura 54. (a) Esfera afectada por los errores de la MMH; (b) Comparación de la esfera con errores con respecto a la esfera ideal.

Al igual que el algoritmo computacional empleado para determinar el centro de la esfera asociado a las mediciones experimentales, el algoritmo computacional para encontrar los coeficientes de las funciones mostradas en las ecuaciones 89-91 está basado en el método de algoritmos evolutivos. Este método es utilizado con la finalidad de demostrar su aplicación en la solución de este tipo de problemas, así como también debido a que los algoritmos evolutivos son una herramienta muy empleada para resolver problemas donde las soluciones están representadas por ecuaciones no lineales.

Como en el cálculo del centro, en este algoritmo se realiza una codificación de individuos, los cuales son representados como un conjunto de constantes que forman parte de las ecuaciones de error y se les asignan valores aleatorios,



$$\begin{aligned}
& C_{xx1-1} \cdot C_{xx2-1} \cdot C_{yx1} \cdot C_{zx1} \cdot \phi_{x1} \cdot \alpha_{yx1} \cdot \alpha_{zx1} \cdot C_{yy1-1} \cdot C_{yy2-1} \cdot C_{xy1} \cdot \\
& C_{zy1} \cdot \phi_{y1} \cdot \alpha_{xy1} \cdot \alpha_{zy1} \cdot C_{zz1-1} \cdot C_{zz2-1} \cdot C_{xz1} \cdot C_{yz1} \cdot \phi_{z1} \cdot \alpha_{xz1} \cdot \alpha_{yz1} \quad - \text{individuo 1} \\
& C_{xx1-2} \cdot C_{xx2-2} \cdot C_{yx2} \cdot C_{zx2} \cdot \phi_{x2} \cdot \alpha_{yx2} \cdot \alpha_{zx2} \cdot C_{yy1-2} \cdot C_{yy2-2} \cdot C_{xy2} \cdot \\
& C_{zy2} \cdot \phi_{y2} \cdot \alpha_{xy2} \cdot \alpha_{zy2} \cdot C_{zz1-2} \cdot C_{zz2-2} \cdot C_{xz2} \cdot C_{yz2} \cdot \phi_{z2} \cdot \alpha_{xz2} \cdot \alpha_{yz2} \quad - \text{individuo 2} \\
& \dots \dots \dots \\
& C_{xx1-n} \cdot C_{xx2-n} \cdot C_{yxn} \cdot C_{zxn} \cdot \phi_{xn} \cdot \alpha_{yxn} \cdot \alpha_{zxn} \cdot C_{yy1-n} \cdot C_{yy2-n} \cdot C_{xyn} \cdot \\
& C_{zyn} \cdot \phi_{yn} \cdot \alpha_{xyn} \cdot \alpha_{zyn} \cdot C_{zz1-n} \cdot C_{zz2-n} \cdot C_{xzn} \cdot C_{yzn} \cdot \phi_{zn} \cdot \alpha_{xzn} \cdot \alpha_{yzn} \quad - \text{individuo n}
\end{aligned} \tag{92}$$

donde  $C_{xx1-i}, C_{xx2-i}, C_{yxi}, \dots, C_{yzi}, \phi_{zi}, \alpha_{xzi}, \alpha_{yzi} \quad i=1,2,\dots,n$  representan los coeficientes de las ecuaciones matemáticas que modelan los errores contenidos en la MMH, las cuales representan la población cero, son definidas en forma aleatoria y variarán con el tiempo debido a la aplicación del operador de mutación.

Por otra parte, se tienen los datos experimentales,

$$\begin{aligned}
& X_1, Y_1, Z_1 \\
& X_2, Y_2, Z_2 \\
& \dots \dots \dots \\
& X_m, Y_m, Z_m
\end{aligned} \tag{93}$$

Donde  $X_l, Y_l, Z_l \quad (l=1,2,\dots,m)$ - representan las coordenadas de los puntos en los que B1 tuvo contacto eléctrico con B2.

Como siguiente paso, los valores experimentales son afectados por las ecuaciones de error,

$$\begin{aligned}
X_l' &= X_l + \delta x_i \\
Y_l' &= Y_l + \delta y_i \quad , \quad i=(1,2,\dots,n), \quad l=(1,2,\dots,m) \\
Z_l' &= Z_l + \delta z_i
\end{aligned} \tag{94}$$

donde  $X'_b, Y'_b, Z'_l$  representan los valores experimentales corregidos.

Con la ayuda de los valores que definen al centro de la esfera  $x^0, y^0, z^0$ , la función de aptitud correspondiente a este algoritmo genético se define como el error cuadrático existente entre las distancias de los puntos experimentales corregidos y el centro obtenido en el algoritmo anterior con respecto al radio teórico que corresponde a las mediciones realizadas. La siguiente ecuación representa la función aptitud del algoritmo genético sigue.

$$err'_i = -\sum_{l=1}^k \left[ \sqrt{(X'_l - x_0)^2 + (Y'_l - y_0)^2 + (Z'_l - z_0)^2} - (R + r) \right]^2, \quad i = (1, 2, \dots, n), l = (1, 2, \dots, m) \quad (95)$$

Donde  $err'_i$  es el error cuadrático que existe entre el radio que definen las mediciones corregidas  $X'_b, Y'_b, Z'_l$  con respecto al punto  $x_0, y_0, z_0$  y la suma de los radios de los balines B1 y B2 que definen el radio de la esfera teórica representados por  $R+r$ .

En el algoritmo computacional se genera una población de  $n$  individuos  $C_{xx1-i}, C_{xx2-i}, C_{yxi}, \dots, C_{yzi}, \phi_{zi}, \alpha_{xzi}, \alpha_{yzi}$  obtenidos a partir de un procedimiento aleatorio. Dichos individuos son sometidos a la función de aptitud representada por la ecuación (95).

El algoritmo busca  $k$  valores  $C_{xx1-i}, C_{xx2-i}, C_{yxi}, \dots, C_{yzi}, \phi_{zi}, \alpha_{xzi}, \alpha_{yzi}$  donde  $err'_i$  tiene el menor valor. Los individuos elegidos son considerados como los padres de la siguiente generación en el algoritmo computacional.

En este punto del algoritmo computacional se vuelve a utilizar en algoritmo para calcular el centro de la esfera. Los nuevos puntos que se utilizan en este algoritmo son los puntos de las mediciones experimentales afectados por el mejor individuo de corrección de error. Lo anterior se hace con la finalidad de mantener libre el centro para encontrar así, tanto los coeficientes de las ecuaciones de error, como también el centro real correspondiente a los puntos del balón de referencia.

Una vez encontrado el nuevo centro de la esfera  $x_0, y_0, z_0$ , la siguiente generación se desarrolla aplicando un factor de mutación, el cual describe una composición de padres  $C_{xx1-h}^*, C_{xx2-h}^*, C_{yxh}^*, \dots, C_{yzh}^*, \phi_{zh}^*, \alpha_{xzh}^*, \alpha_{yzh}^*$  ( $h = 1, 2, \dots, k$ ) donde cada padre genera  $s = n/k$  descendientes, los cuales se definen de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 C_{xx1-(k+o)} &= C_{xx1h}^* + rand_h(\Delta C_{xx1}), \\
 C_{xx2-(k+o)} &= C_{xx2h}^* + rand_h(\Delta C_{xx2}), \\
 C_{yx1(m-o)} &= C_{yxh}^* + rand_h(\Delta C_{yx}), \\
 &\vdots \\
 C_{yz(k+o)} &= C_{yzh}^* + rand_h(\Delta C_{yz}), \\
 \phi_{z(k-o)} &= \phi_{zh}^* + rand_h(\Delta \phi_z), \\
 \alpha_{xz(k+o)} &= \alpha_{xzh}^* + rand_h(\Delta \alpha_{xz}), \\
 \alpha_{yz(k+o)} &= \alpha_{yzh}^* + rand_h(\Delta \alpha_{yz}) \\
 &\quad (h = 1, 2, \dots, k) \\
 &\quad (o = 1, 2, \dots, s)
 \end{aligned} \tag{96}$$

donde  $C_{xx1-(k+o)}, C_{xx2-(k+o)}, C_{yx(k+o)}, \dots, C_{yz(k+o)}, \phi_{z(k+o)}, \alpha_{xz(k+o)}, \alpha_{yz(k+o)}$  representan a los hijos de la nueva generación;  $\Delta C_{xx1}, \Delta C_{xx2}, \Delta C_{yx}, \dots, \Delta C_{yz}, \Delta \phi_z, \Delta \alpha_{xz}, \Delta \alpha_{yz}$  son los pasos de la mutación,  $rand(u)$  es un número aleatorio uniformemente distribuido en el rango  $[0, u]$

Los hijos y los padres de cada generación conforman la nueva población de individuos que se somete nuevamente a la función aptitud. Una vez que se encuentran los padres de la siguiente generación, el centro de la esfera se ajusta nuevamente a los valores experimentales corregidos por el mejor individuo.

El proceso descrito anteriormente se repite un número definido de generaciones y al final se selecciona el mejor individuo,  $C_{xx1-i}, C_{xx2-i}, C_{yxi}, \dots, C_{yzi}, \phi_{zi}, \alpha_{xzi}, \alpha_{yzi}$ , para el cual  $err'_i$

es mínimo, calculándose también el nuevo centro para las mediciones experimentales corregidas.

A continuación se presenta un diagrama de flujo propuesto de este algoritmo.

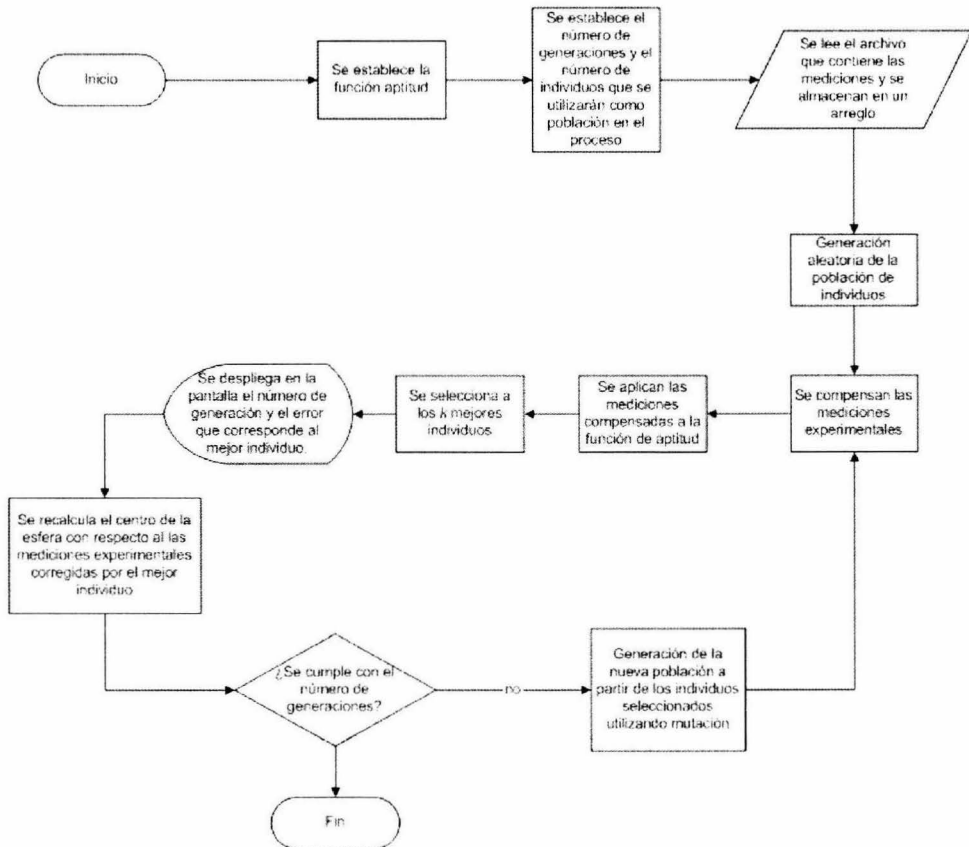


Figura 55. Diagrama de flujo para el algoritmo que determina los coeficientes asociadas a las ecuaciones de error en MMH's.

Tanto la información del error asociado al centro de la esfera en cada una de las posiciones, como las constantes de error encontradas para minimizar dicho error, son parámetros que serán empleados para el desarrollo de sistemas de control que permitan incrementar las prestaciones de precisión en MMH's

En el siguiente capítulo se desarrollan las pruebas que se realizaron a las propuestas citadas en este apartado.

# 4. Pruebas y resultados

El desarrollo de los algoritmos propuestos en este trabajo de tesis fue realizado empleando la herramienta de programación Borland C++ Builder. Como primera etapa del sistema de evaluación, se generó un programa para realizar las mediciones experimentales del perímetro de la esfera de referencia en forma automática. En la figura 56 se ilustra la configuración de la técnica implementada para evaluar la micromáquina herramienta. Dentro de las pruebas desarrolladas a las herramientas propuestas, se emplearon dos esferas con dimensiones iguales de 5/16 de pulgada de diámetro y desviaciones de redondez de aproximadamente  $0.6 \mu\text{m}$ . Antes de realizar las mediciones experimentales, se limpiaron cuidadosamente las esferas que se utilizaron.

El caso de estudio que se eligió para desarrollar las pruebas fue el primer prototipo de micromáquina herramienta desarrollado en el LMM.

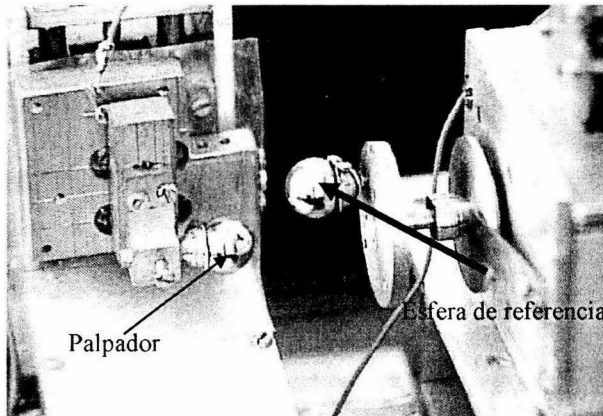


Figura 56. Sistema de esferas para evaluar una micromáquina herramienta.

Durante el desarrollo del sistema automático de medición, fue necesario realizar pruebas experimentales para determinar parámetros iniciales relacionados con la posición relativa entre el palpador y la esfera de referencia para, como primer paso, localizar la posición inicial de la toma de mediciones. Con tal propósito, se empleó el software de control de la MMH que fue

desarrollado hace algunos años cuando se terminó ésta [38]. Dicho software permite, a través de una ventana con diversos botones, controlar todos los grados de libertad de la MMH, así como también brinda información en pantalla sobre la posición de cada uno de los ejes que se encuentren en movimiento. En la figura 57 se muestra una imagen del programa para controlar los ejes de la MMH.

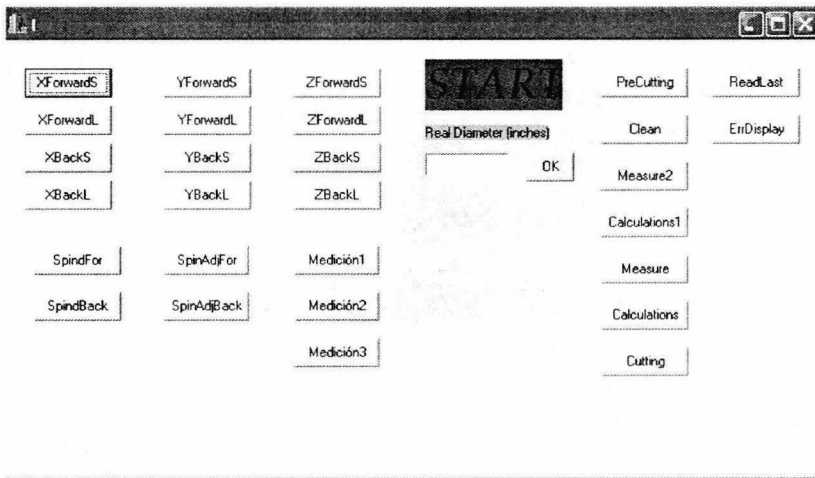


Figura 57. Software de control del primer prototipo de MMH.

Una vez que se desarrolló el software se realizaron algunas pruebas para determinar el número de mediciones a recolectar. En un inicio, se realizaron mediciones con intervalos, entre una medición y otra, de 10 pasos de motor equivalentes a  $18.7 \mu\text{m}$ , lo que generaba más de 1500 mediciones por posición de la esfera de referencia. Por cuestiones de duración en el tiempo de proceso (de hasta 1.5 hrs en la toma de lecturas por cada posición de la esfera), se decidió aumentar el intervalo entre mediciones, quedando finalmente un total de 233 mediciones con intervalo entre mediciones de 70 pasos de motor. El tiempo de proceso para realizar esta rutina es de 25 a 30 minutos. En la figura 58 se muestra una gráfica con mediciones experimentales. Dichas mediciones se obtuvieron a partir de contabilizar el número de pulsos que son enviados desde la PC a cada uno de los motores de pasos, los cuales se encuentran acoplados a cada uno de los ejes de la MMH. Lo anterior obedece a que se tiene un sistema de control de lazo abierto en la micromáquina y, al no tener un sistema de medición de desplazamiento en los ejes, se hacen

pruebas de velocidad máxima de operación a los motores de pasos para que, durante los procesos de manufactura y posicionamiento, no existan problemas por pérdidas de pasos. Para garantizar esto, se hacen trabajar los motores, a un régimen menor al 70% de su velocidad máxima de operación. Así mismo, se realizaron pruebas a los motores de la MMH con la ayuda de dos optosensores que detectaron las posiciones de un codificador óptico acoplado al rotor de cada motor (figura 58); y se comparó el número de vueltas que realizaba el motor con respecto a al numero de pulsos que se programó en la ventana del programa de control. Como resultado de esto se trabajó con el motor en un régimen de 1875 rpm.

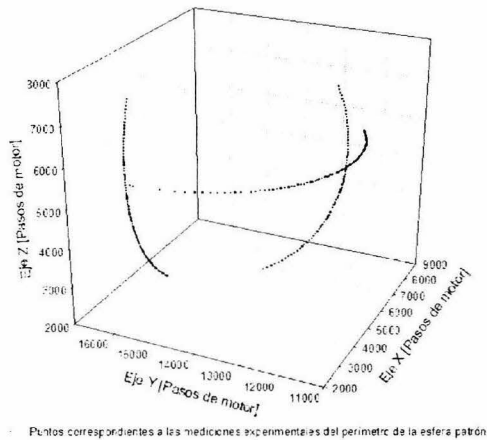


Figura 58. Mediciones experimentales de la superficie de la esfera patrón en una posición fija dentro del volumen de trabajo de la MMH.

El proceso antes mencionado se sincronizó con el movimiento del husillo para generar mediciones experimentales de 36 diferentes posiciones de la esfera de referencia.

Para realizar pruebas al software que determina, en primera instancia, el centro de la esfera asociada a las mediciones experimentales y, posteriormente, las constantes de error que definen el modelo matemático de errores de la MMH, se consideró trabajar con la esfera de referencia colocada en un punto fijo dentro del volumen de trabajo de la misma máquina, así como también

se consideró emplear pasos de motor como unidades de posición, cada paso de motor es equivalente a  $1.87 \mu\text{m}$ .

Una vez que se contó con el sistema automático para realizar las mediciones, se prosiguió con el desarrollo del software para determinar el centro de la esfera patrón. Uno de los puntos esenciales para obtener un buen funcionamiento del algoritmo evolutivo, el cual permita obtener resultados confiables en un número de operaciones aceptable (generaciones), está relacionado con establecer de forma adecuada parámetros tales como: el número de individuos por población, el número de generaciones y el tipo de mutación a realizarse. Como primera aproximación del software, se establecieron las siguientes condiciones:

- Número de individuos igual a 500
- Número de generaciones igual a 1000
- Rango para la elección de individuos: X [0,15000], Y [0,20000] y Z [0,15000]
- Rango de mutación [-2,2] con incrementos de 0.2 pasos

Tras algunas pruebas del software que determina el centro de la esfera (alrededor de veinte), fue evidente la presencia de un error en la determinación del centro. Dicho error estuvo relacionado con el número de mínimos que existen para la solución del problema, es decir, la solución del valor óptimo para el centro de la esfera puede estar en dos posiciones: una de ellas se encuentra dentro del perímetro de la esfera, mientras que la otra solución es un punto que se encuentra fuera del perímetro de la misma. Con el objeto de eliminar este error, se empleó un método basado en introducir varias mutaciones distribuidas a lo largo de las generaciones que componen al algoritmo computacional, partiendo de mutaciones grandes en las primeras generaciones hasta llegar a mutaciones muy pequeñas hacia la etapa final de mismo. Con este procedimiento se mejoró considerablemente el desempeño del software desarrollado. Finalmente, se dividieron las generaciones dentro del algoritmo genético en cinco grupos, donde cada grupo fue afectado por una mutación variante con respecto al tiempo de acuerdo a la siguiente relación;

- Generación 1-200: mutación de 4 pasos de motor en un rango de [-2000,2000] pasos;
- Generación 201-400: mutación de 2 pasos de motor en un rango de [-1000,1000] pasos;



- Generación 401-600 : mutación de 1 paso de motor en un rango de [-100,100] pasos;
- Generación 601-800: mutación de 0.1 pasos de motor en un rango de [-10,10] pasos;
- Generación 801-1000: mutación de 0.01 pasos de motor en un rango de [-1,1] pasos.

Con este procedimiento se mejoró el rendimiento del algoritmo y permitió encontrar el mínimo que se buscaba dentro de esta prueba. En la figura 59 se muestra una gráfica que representa los puntos de las mediciones experimentales, el centro de la esfera asociado a esos puntos y los valores teóricos del perímetro de la esfera correspondiente a los planos de medición. El centro de la esfera para esta posición se encuentra en XYZ (6825, 16047, 6048) con un error cuadrático en la determinación del mismo de 448069 que corresponde a un error promedio en las mediciones de  $\pm 43$  pasos de motor equivalente a  $\pm 82 \mu\text{m}$ .

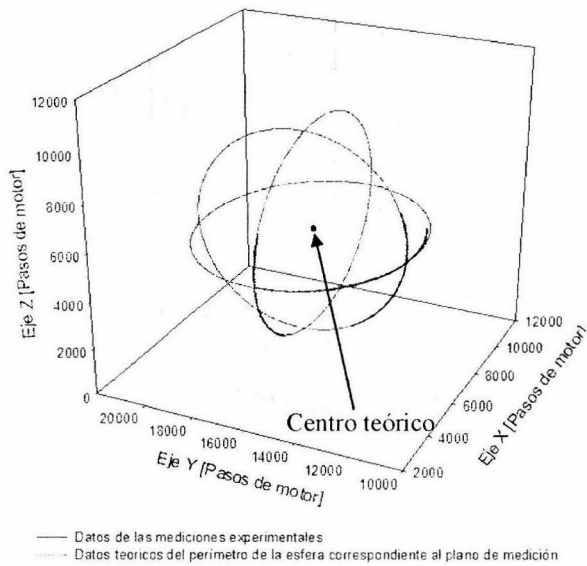


Figura 59. Sistema de esferas para evaluar una micromáquina herramienta.

Al comparar los grupos los puntos medidos con respecto a los valores teóricos obtenidos a partir del centro de la esfera encontrado, es fácil identificar la presencia de fuentes de error en las mediciones realizadas, las cuales se ven reflejadas en la presencia de diferencias entre dichos puntos. Dichas desviaciones contienen información que contribuye a la determinación de los

errores asociados a la MMH. En la figura 60 se presentan las gráficas correspondientes a los tres planos de medición para observar los errores que presentan.

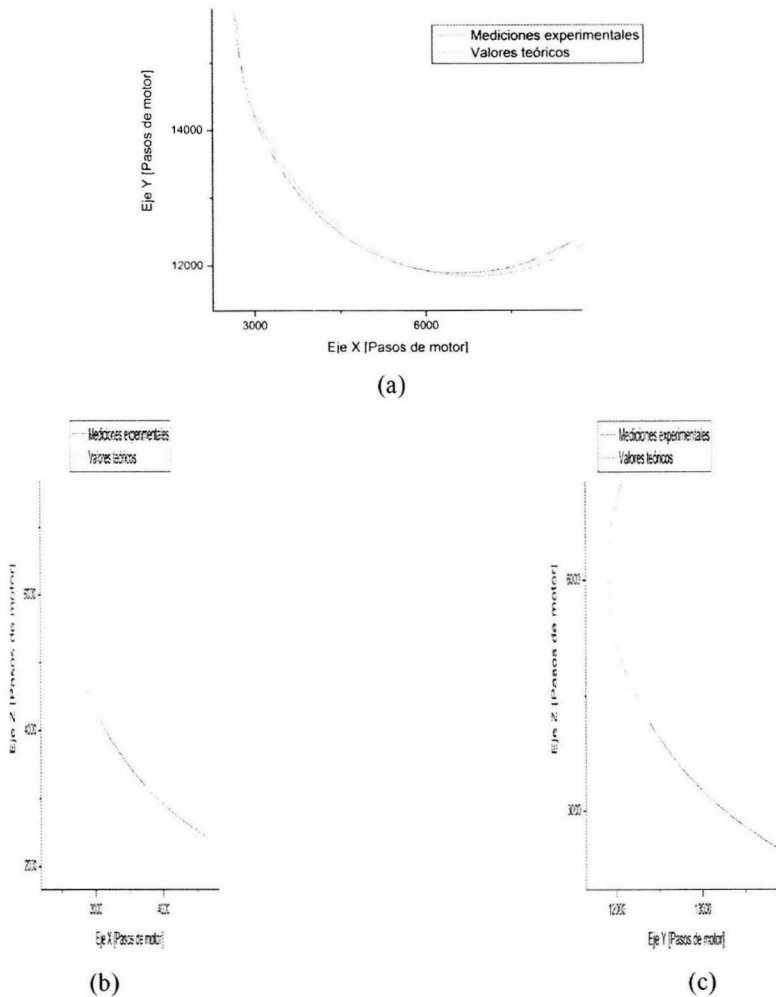


Figura 60. Diferencia entre mediciones y puntos teóricos. (a) Plano de medición X-Y; (b) plano de medición X-Z; (c) plano de medición Y-Z.

Con la finalidad de analizar que tan robusto era el algoritmo computacional, se realizaron repeticiones del algoritmo para determinar la repetibilidad del mismo. En la prueba de repetibilidad se realizaron 10000 experimentos para observar las desviaciones existentes en la

determinación del centro de la esfera. Los resultados de dichas pruebas se muestran en la gráfica de la figura 61.

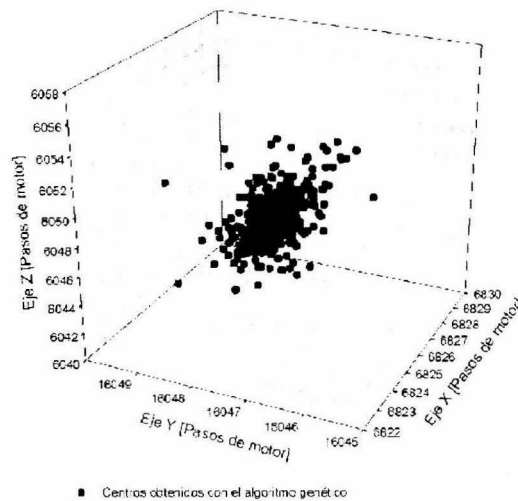


Figura 61. Variaciones en la determinación del centro de la esfera patrón en 10000 experimentos.

El centro buscado se encuentra en (6825, 16047,6048) con errores en  $E_x=\pm 4$ ,  $E_y=\pm 2$  y  $E_z=\pm 8$  pasos de motor. Con el objetivo de incrementar la confiabilidad del algoritmo computacional se realizaron aproximadamente 50 pruebas, en las cuales se modificaron los siguientes parámetros: número de individuos, número de generaciones y distribución de las mutaciones. Al final, se seleccionaron los parámetros de aquella prueba donde las variaciones en el cálculo del centro fueron mínimas. A continuación se presentan los parámetros de la mejor prueba.

- Número de individuos igual a 500
- Número de generaciones igual a 100
- Rango de elección de individuos: X [0,15000], Y[0,20000] y Z[0,15000]
- Distribución de mutaciones:
  - Generación 1-15: mutación de 4 pasos de motor en un rango de [-2000,2000] pasos;

- Generación 16-30: mutación de 2 pasos de motor en un rango de [-1000,1000] pasos;
- Generación 31-50 : mutación de 1 paso de motor en un rango de [-100,100] pasos;
- Generación 51-75: mutación de 0.1 pasos de motor en un rango de [-10,10] pasos;
- Generación 76-100: mutación de 0.01 pasos de motor en un rango de [-1,1] pasos.

Con estos parámetros se obtuvieron los resultados que a continuación se presentan (ver gráfica 62).

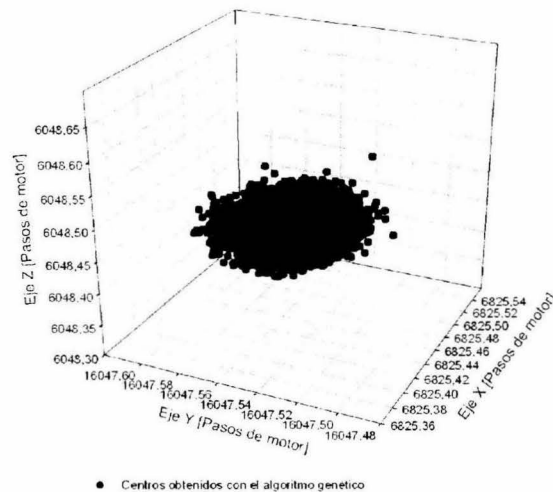


Figura 62. Variaciones en la determinación del centro de la esfera patrón en 10000 experimentos con el algoritmo genético optimizado.

Después de repetir 10000 veces el algoritmo genético optimizado se apreció una reducción significativa en la diferencia de posiciones de los centros encontrados. El centro buscado se encuentra en (6825, 16047,6048) con errores en  $E_x \leq \pm 1$ ,  $E_y \leq \pm 1$  y  $E_z \leq \pm 1$  pasos de motor.

Una vez garantizado el funcionamiento del algoritmo computacional que calcula el centro de la esfera de referencia en una posición fija, se desarrollaron experimentos con la esfera colocada en diversas posiciones dentro del espacio de trabajo de la MMH. En los experimentos, se colocó la esfera de referencia a una distancia constante con respecto al eje del disco de sujeción y se

modificó la posición de la esfera de acuerdo a dos aspectos: por un lado, se modificó la posición angular del husillo para hacer mediciones en 14 posiciones diferentes; y por el otro, se modificó la distancia entre el disco de sujeción y el husillo para obtener 5 diferentes eventos a 11, 13, 14 17, 19 mm de distancia. Los experimentos generaron información sobre 70 diferentes posiciones de la esfera. En la figura 63 se muestran los resultados de los experimentos obtenidos con el disco de sujeción colocado a 17 mm de distancia del husillo.

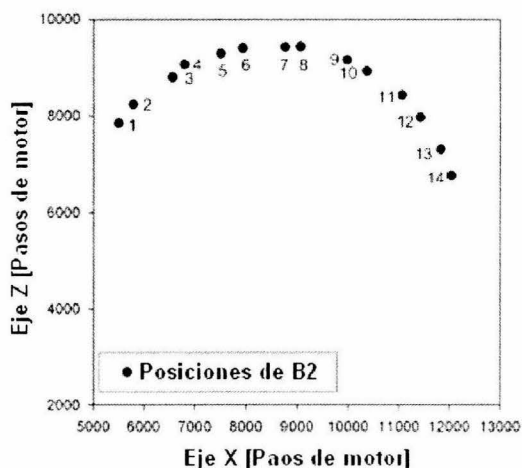


Figura 63. Posiciones de B2 dentro del espacio de trabajo de la MMH.

Posición	Hubicación del centro de B2			Error cuadrático	Error [Pasos de motor]	Error [ $\mu\text{m}$ ]
	X	Y	Z			
1	5502	14670	7851	38909	11.4	21.4
2	5791	14658	8240	54686	13.6	25.4
3	6560	14728	8800	64690	14.8	27.6
4	6797	14712	9062	74224	15.8	29.6
5	7503	14741	9288	82353	10.4	19.5
6	7936	14784	9400	40172	11.6	21.7
7	8765	14754	9426	31697	10.3	19.3
8	9066	14692	9432	207968	26.5	49.5
9	9978	14755	9153	81438	16.6	30.9
10	10367	14824	8925	170327	23.9	44.8
11	11062	14797	8431	115352	19.7	36.9
12	11424	14909	7972	591308	44.6	83.4
13	11834	14973	7309	339525	19.1	35.8
14	12038	15046	6766	627448	45.9	85.9

Tabla 4. Error de las posiciones de B2 cuando el disco de sujeción se encuentra a una distancia de 17 mm del husillo.

El arreglo de posiciones mostrado en la figura 63 entrega información sobre los errores volumétricos existentes en la MMH sobre una región específica. Dentro de esa región el error máximo encontrado fue de  $\pm 85.9 \mu\text{m}$  mientras que el error mínimo fue de  $\pm 19.3 \mu\text{m}$ . Realizando un análisis sobre las setenta posiciones de la esfera se determinó que el error promedio para el arreglo de posiciones fue de  $\pm 33.5 \mu\text{m}$ , con un valor máximo de  $\pm 108.1 \mu\text{m}$  y un error mínimo de  $\pm 7.1 \mu\text{m}$ .

Una vez que se determinan los errores de la MMH, la información sobre las mediciones experimentales fue introducida al algoritmo encargado de determinar las constantes de error que conforman el modelo matemático de los errores asociados a la micromáquina herramienta. El algoritmo está compuesto por el algoritmo que calcula el centro de la esfera anidado dentro del algoritmo evolutivo que se encarga de encontrar los coeficientes de las ecuación de error presentadas en el capítulo anterior. Al igual que en el algoritmo anterior, el primer paso consistió establecer los parámetros que definen dicho algoritmo. En el caso del cálculo del centro se mantiene los parámetros antes mencionados y para el cálculo de los constantes que intervienen en las ecuaciones de error se tienen los siguientes parámetros:

- Número de individuos igual a 800
- Número de generaciones igual a 1000
- Rango para la elección de individuos:
  - $C_{xx1}, C_{yy1}, C_{zz1}, C_{xx2}, C_{yy2}, C_{zz2}$   $[-.002, 0.002]$ ;
  - $C_{yx}, C_{zx}, C_{xy}, C_{zy}, C_{xz}, C_{xy}$   $[-2 \times 10^{-8}, 2 \times 10^{-8}]$ ;
  - $\phi_1, \phi_2, \phi_3$   $[0, 3.1416]$ ;
  - $\alpha_{yx}, \alpha_{zx}, \alpha_{xy}, \alpha_{zy}, \alpha_{xz}, \alpha_{yz}$   $[-0.04386, 0.04386]$
- Distribución de mutaciones :
  - Generación 1-100 individuos con factor de mutación igual a 1
  - Generación 101-200 individuos con factor de mutación igual a 0.5
  - Generación 201-400 individuos con factor de mutación igual a 0.25
  - Generación 401-500 individuos con factor de mutación igual a 0.12
  - Generación 501-550 individuos con factor de mutación igual a 0.06

- Generación 551-650 individuos con factor de mutación igual a 0.03
- Generación 651-750 individuos con factor de mutación igual a 0.015
- Generación 751-850 individuos con factor de mutación igual a 0.007
- Generación 851-900 individuos con factor de mutación igual a 0.003
- Generación 901-1000 individuos con factor de mutación igual a 0.0015

Tras aplicar este algoritmo a los datos de las mediciones experimentales, se lograron obtener los valores para las constantes de las ecuaciones de error que ayudan a ajustar los datos experimentales con respecto a los datos teóricos. En un inicio, la reducción en el error de los datos experimentales con respecto a los datos teóricos fue de casi un 50 %, lo que reflejado en pasos de motor representa un error promedio de  $\pm 25$  pasos, equivale a  $\pm 46.75 \mu\text{m}$ . Un aspecto evidente durante el análisis de los resultados fue la variación que existe entre los centros y entre las constantes encontradas durante la ejecución de procesos repetidos. El fenómeno anterior hace que se incremente el error en el ajuste de los valores experimentales debido a que no se puede garantizar la reducción del error con respecto a un centro fijo de la esfera.

A consecuencia de lo anterior se buscó corregir el problema presentado. Dicho problema se relacionó con la existencia de varios mínimos que satisfacen a las ecuaciones de error. Dependiendo de la zona por la cual comienza la aproximación a los valores buscados, se afectan tanto la posición del centro como los valores de las constantes de error. Para solucionar este problema se determinó realizar modificaciones al algoritmo propuesto que permitieran no dar tanta libertad al centro que se determina con los valores compensados, todo esto con el fin de tratar de encontrar un solo mínimo. Con este propósito se propuso el desarrollo de un algoritmo evolutivo, el cual trabaja con la compensación de errores con un centro fijo durante un número determinado de generaciones  $G1$ , para después recalcular el centro y repetir el mismo ciclo por un número determinado de generaciones  $G2$ , donde el número total de generaciones del algoritmo está representado por el producto entre  $G1$  y  $G2$ . Esto hace que el algoritmo evolutivo converja a una zona más estrecha de mínimos. En la figura 64, se muestra el nuevo diagrama de flujo para el algoritmo propuesto.

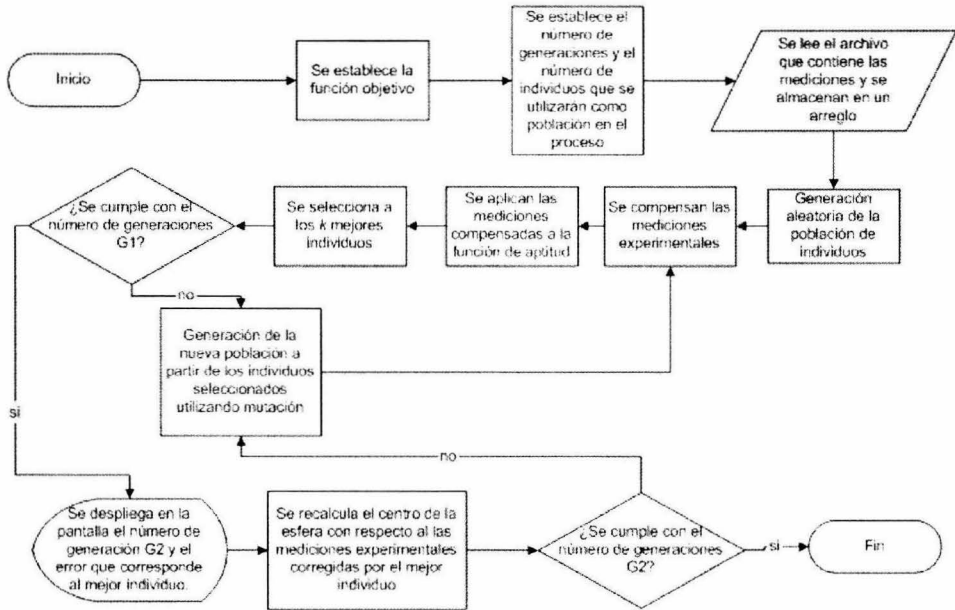


Figura 64. Diagrama de flujo del algoritmo para determinar los coeficientes de las ecuaciones de error.

Para el nuevo algoritmo también se modificaron las ecuaciones de error por las presentadas en (97), con la finalidad de observar su repercusión en los resultados y eliminar dependencia entre variables.

$$\begin{aligned}
 \delta_x &= C_x x + C_{xy} y^2 + C_{xz} z^2 + y \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_y\right) + z \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_z\right) \\
 \delta_y &= C_y y + C_{xy} x^2 + C_{yz} z^2 + x \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_x\right) + z \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_z\right) \\
 \delta_z &= C_z z + C_{xz} x^2 + C_{yz} y^2 + x \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_x\right) + y \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_y\right)
 \end{aligned}
 \tag{97}$$

donde  $C_x$ ,  $C_y$  y  $C_z$  representan errores de posicionamiento,  $C_{xy}$ ,  $C_{yz}$  y  $C_{xz}$  representan errores de rectitud en los ejes y  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$ , representan falta de ortogonalidad en los ejes.

Los parámetros para el nuevo algoritmo evolutivo se presentan a continuación:

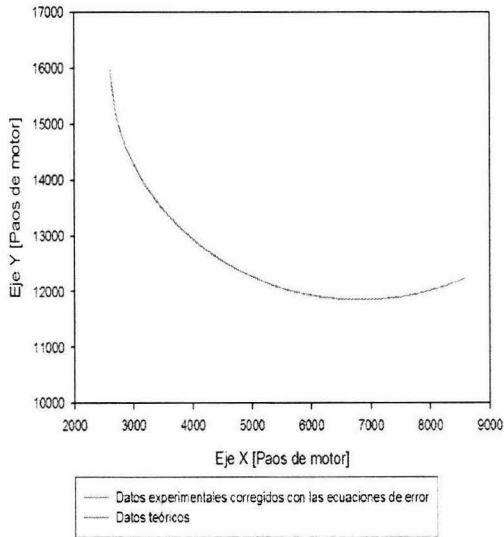
- Número de individuos igual a 800



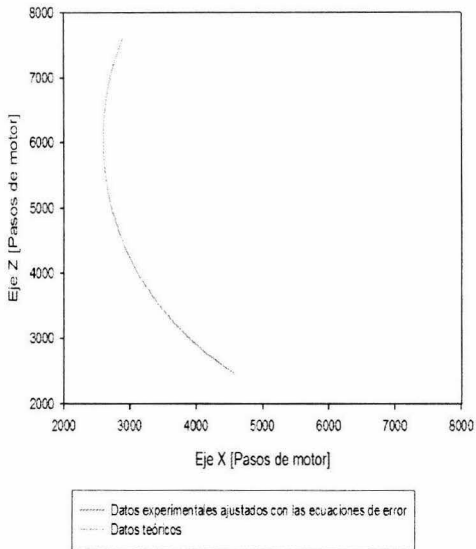
- Número de generaciones 20000 (G1=100, G2=200)
- Rango para la elección de individuos:
  - $C_x, C_y, C_z$  [-.002,0.002];
  - $C_{xy}, C_{yz}, C_{xz}$  [ $-2 \times 10^{-8}, 2 \times 10^{-8}$ ];
  - $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  [-0.04386,0.04386]
- Distribución de mutaciones para G1:
  - Generación 1-10 individuos con factor de mutación igual a 1
  - Generación 11-20 individuos con factor de mutación igual a 0.5
  - Generación 21-40 individuos con factor de mutación igual a 0.25
  - Generación 41-50 individuos con factor de mutación igual a 0.12
  - Generación 51-55 individuos con factor de mutación igual a 0.06
  - Generación 56-65 individuos con factor de mutación igual a 0.03
  - Generación 66-75 individuos con factor de mutación igual a 0.015
  - Generación 76-85 individuos con factor de mutación igual a 0.007
  - Generación 86-90 individuos con factor de mutación igual a 0.003
  - Generación 91-100 individuos con factor de mutación igual a 0.0015

Con el nuevo algoritmo propuesto, se mejoraron los resultados obtenidos con la primera propuesta. El error promedio de los valores experimentales ajustados, con respecto a los valores teóricos, fue de  $\pm 3$  pasos de motor con diferencias en el cálculo del centro de  $\pm 5$  pasos de motor. Los datos plasmados en este párrafo están obtenidos a partir de realizar un total de 45 ensayos al algoritmo genético propuesto para determinar parámetros de repetibilidad del mismo. En la figura 65, se presentan tres gráficas correspondientes a los tres planos de medición de la esfera de referencia. Dichas graficas muestran los resultados del algoritmo de ajuste mediante las ecuaciones de error propuestas en el capítulo anterior. Como se observa, los ajustes de las curvas experimentales con respecto a las curvas teóricas de la superficie de la esfera resultan muy satisfactorios, ambas trayectorias se enciman.

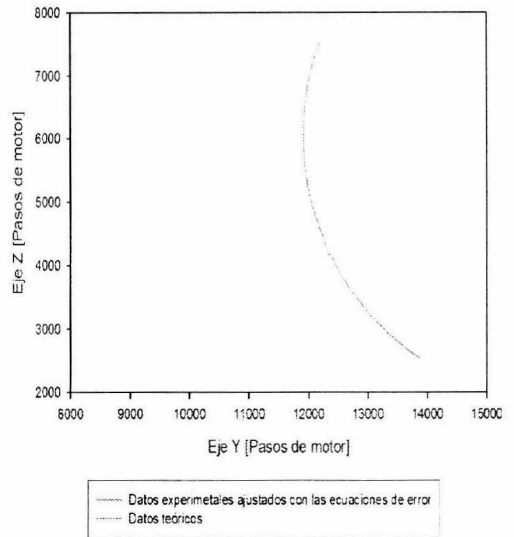
Finalmente en la tabla 5 se muestran las constantes de error obtenidas en cinco corridas del algoritmo final. Así mismo, en la tabla 6 se presentan los centros encontrados después de haber aplicado las ecuaciones de error a los datos experimentales en dichas corridas.



(a)



(b)



(c)

Figura 65. Diferencia entre mediciones ajustadas mediante as ecuaciones de error y los puntos teóricos. (a) Plano de medición X-Y; (b) plano de medición X-Z; (c) plano de medición Y-Z.

$C_x$	$C_y$	$C_z$	$C_{xy}$	$C_{yz}$	$C_{xz}$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_z$
0,015	0,024	-0,104	-2,39E-07	-1,41E-07	-4,95E-07	-0,0031	0,0032	0,034
0,014	0,021	-0,0079	-4,71E-07	2,27E-07	-3,62E-07	-0,006	0,0017	0,036
0,015	0,022	-0,0079	-4,24E-07	1,75E-07	-2,46E-07	-0,006	0,0013	0,037
0,017	0,022	-0,008	-3,97E-07	3,31E-07	-5,84E-08	-0,0058	0,0014	0,037
0,016	0,022	-0,0071	-3,98E-07	3,31E-07	-2,33E-07	-0,0056	0,0032	0,037
0,015	0,023	-0,008	-3,57E-07	9,32E-08	-3,06E-07	-0,0049	0,0018	0,036

Tabla 5. Constantes de error calculadas en cinco procesos para una posición de la esfera de referencia

Centro corregido			Error cuadrático	Error [Pasos de motor]	Error [ $\mu\text{m}$ ]
X	Y	Z			
6902	16079	5836	7036	3.17	5.93
6911	16070	5839	6386	3.02	5.65
6910	16074	5835	6410	3.02	5.66
6909	16074	5835	6600	3.07	5.74
6903	16076	5836	6510	3.05	5.70
6901	16080	5836	5,680	2.84	5.32

Tabla 6. Centros corregidos de cinco procesos para una posición de la esfera de referencia.

# Conclusiones

En este trabajo se plasma la importancia que tiene el desarrollo de métodos de evaluación para microequipo. Las tendencias a nivel mundial en el desarrollo de microequipo muestran el énfasis que se tiene en emplear tecnología de punta a altos costos para garantizar las prestaciones de precisión en los prototipos desarrollados. Este tipo de técnicas encarece el precio final de dichos prototipos, además de que deja pocas oportunidades para desarrollar investigaciones de este tipo en México. En el LMM se propone desarrollar microequipo de bajo costo y reemplazar altas inversiones en tecnología de punta por sistemas de evaluación para conocer el comportamiento de las MMH's, con el fin de hacer uso de técnicas de control computacional que permitan mejorar las características de precisión de las mismas.

La implementación de un sistema de control adaptativo demostró que es una opción viable para la corrección de errores en los procesos de manufactura de MMH's, reduciendo el error de la micromáquina que se tomó como caso de estudio en aproximadamente un 80%. Con el sistema de control propuesto se lograron obtener los mismos resultados que los obtenidos con un microtorno japonés a un costo varias veces menor. Mientras que el torno japonés supera con facilidad las decenas de miles de dólares en su desarrollo, el microtorno mexicano apenas supera las decenas de miles de pesos. La desventaja de este tipo de sistemas de control se ve reflejada principalmente en el tiempo de proceso, puesto que las operaciones de optimización se llevan a cabo durante el mismo proceso de manufactura de la pieza y, debido al tipo de sistema de control que se está empleando actualmente, un proceso de manufactura puede durar hasta ocho veces más en tiempo que un proceso normal, por ejemplo, la manufactura de una flecha en el microtorno sin emplear un sistema de control adaptativo tarda aproximadamente 25 minutos, mientras que el proceso de manufactura de la misma flecha empleando el sistema de control adaptativo puede llegar a tardar poco más de tres horas.

El desarrollo de una metodología de evaluación de microequipo que haga uso de una técnica de bajo costo representa una necesidad del LMM para mejorar las características de precisión de sus

prototipos generados, así como también para sentar las bases de métodos de evaluación que permitan comparar el trabajo de este laboratorio con el de otros alrededor del mundo.

La propuesta de este proyecto de tesis se basa en el desarrollo de una metodología de evaluación que hace uso de una técnica de bajo costo para extraer información referente a los errores presentes en los ejes de una micromáquina herramienta. La metodología de evaluación básicamente se basa en los siguientes puntos:

- 1) Hacer uso de elementos de referencia (esferas de acero inoxidable) para la evaluación de microequipo.
- 2) Emplear contacto eléctrico para sensar el punto de contacto entre la esfera de referencia y la esfera de palpación.
- 3) Antes de realizar la prueba se deben limpiar perfectamente los elementos de referencia, de preferencia, utilizando equipos de ultrasonido para eliminar cualquier residuo en la superficie de los mismos.
- 4) Realizar varias mediciones de la superficie de la esfera patrón con ayuda de la esfera de palpación (un mínimo de 100 mediciones).
- 5) Hacer este procedimiento en varios puntos del volumen de trabajo de la MMH para extraer información general.
- 6) Someter la información obtenida a un algoritmo computacional que determina el centro que corresponde a la esfera de referencia en cada una de sus posiciones, así como también el error promedio de las mediciones con respecto a los datos teóricos de dicha esfera.
- 7) Finalmente, Someter la información de mediciones de la esfera de referencia junto con los resultados del cálculo de centro a otro algoritmo computacional que determina los coeficientes de las ecuaciones de error asociadas a cada uno de los ejes de la MMH.

Dentro de la alternativa de evaluación se propone el uso de algoritmos evolutivos para la solución del problema. Dichos algoritmos representan una alternativa para la solución de problemas donde métodos matemáticos comunes representan deficiencias o el uso de algoritmos computacionales extensos. Dicho método demostró ser una alternativa adecuada para la solución del problema.

La alternativa presentada en este proyecto es una propuesta de bajo costo y alta rentabilidad. Los componentes que integran esta metodología son económicos y su implementación dentro de una MMH resulta sencilla en comparación con otro tipo de metodologías que emplean técnicas de medición más sofisticadas como lo pueden ser aquellas que hacen uso del interferómetro láser.

Aplicando los algoritmos para la determinación de errores en la MMT, fue posible encontrar que dentro de una zona, dentro del espacio de trabajo de la MMH donde se midió la esfera de referencia en 70 posiciones distintas, se detectó un error volumétrico promedio de  $\pm 33.5 \mu\text{m}$ . Este valor es comparable con los resultados obtenidos en [36], con la diferencia que en ese trabajo solo se logró hacer la evaluación en el eje “Y” de la MMH, ya que la evaluación en ese caso lo hizo a partir de piezas manufacturadas en la misma.

La determinación de las constantes que forman parte de las ecuaciones de error permiten ajustar los datos experimentales a los datos teóricos con un error promedio de  $\pm 5.6 \mu\text{m}$  para una posición de la esfera de referencia.

Los sistemas que se desarrollaron permitirán continuar las investigaciones para el diseño y desarrollo de sistemas de control que mejoraren las características de precisión de las MMH's desarrolladas dentro del LMM.

Las aplicaciones de este tipo de métodos no solo se presentan en el ámbito de la micromecánica, sino también en la mecánica para evaluar máquinas herramienta de tamaño convencional o también para evaluar características de movimiento en manipuladores.

## Recomendaciones

Uno de los puntos críticos del sistema de evaluación propuesto es el tiempo de procesamiento que le lleva determinar las constantes correspondientes a las ecuaciones de error, el cual actualmente oscila entre una y dos horas dependiendo de la velocidad de la computadora donde se esté ejecutando. Este aspecto tiene que ver directamente con los parámetros que definen al

algoritmo evolutivo, así como también con el número de datos que se recolecten en cada una de las posiciones de la esfera. En un inicio de los experimentos se llegaron a recolectar hasta 1200 datos para una sola posición de la esfera y tras varias pruebas se recomendó que el sistema puede trabajar adecuadamente con un número total de datos por posición de la esfera igual a 233. Es necesario continuar con las pruebas del algoritmo genético para optimizarlo y reducir los tiempos de proceso. Así mismo, resulta conveniente muestrear todo el volumen de trabajo de la máquina para averiguar su comportamiento general.

Otro punto importante es lo referente al tipo de esferas que se utilizan como esfera palpadora y esfera patrón, en este trabajo se recomienda el uso de esfera de acero inoxidable para evitar problemas relacionados con oxidación. Además, dentro de las pruebas realizadas para determinar la redondez de dichas esferas fue notorio que, a medida que el diámetro de las esferas decrece, decrece también su nivel de esfericidad. Por lo tanto, si se requiere emplear este método en MMH's de menores dimensiones es necesaria la compra de esferas calibradas.

## Trabajo a futuro

Dentro del trabajo a futuro que se piensa desarrollar relacionado con este trabajo, se encuentran los siguientes puntos:

- Se continuará el trabajo de evaluación y optimización del software que garantice un sistema de evaluación robusto, además de que se buscará reducir en la medida de lo posible el tiempo de procesamiento en la tarea de evaluación.
- Se planea el desarrollo de una interfaz computacional que permita un uso sencillo del sistema de evaluación.
- En este trabajo se determinaron las ecuaciones de error en base a la experiencia que se tuvo durante la construcción de la MMH que fue caso de estudio en este trabajo y en base a modelos matemáticos que definen las ecuaciones de error en máquinas herramientas convencionales. En un futuro se propone emplear el método de grupos para el manejo de datos que fue propuesto por el Dr. Ivakhnenko en la década de los sesenta y que representa una alternativa para la solución de problemas por métodos de aproximación. El

método de grupo para manejo de datos representa una alternativa para la solución de problemas con representación polinomial. Como resultado de esto, modelos complicados y su parametrización, los cuales son indispensables en estrategias de modelado convencional, pueden ser eliminados. El método se basa en técnicas de autoorganización heurística aplicadas a análisis de regresión no lineales. A partir de diferentes capas donde se definen polinomios de orden bajo, se encuentran las soluciones a dichos polinomios y se lleva a cabo un proceso de selección para elegir los mejores polinomios que serán mezclados en las capas superiores. Este proceso se repite en forma iterativa hasta llegar a un polinomio que modela al sistema propuesto y se compone de la combinación de los polinomios de cada una de las capas [56].

- Como parte de trabajo a futuro se piensa continuar con el desarrollo de nuevas técnicas que permitan la medición de desplazamientos en micromáquinas herramientas. Actualmente, se está comenzando a trabajar en el desarrollo de una nueva técnica basada en el tratamiento de imágenes con resolución menor al pixel, la cual se ha comenzado a utilizar en la evaluación de una nueva propuesta de micromáquina herramienta con resolución submicrométrica y ha dado buenos resultados hasta este momento.
- Este trabajo está enfocado a la evaluación de los ejes de desplazamiento en micromáquinas herramienta, por lo que resulta necesario el desarrollo de métodos de evaluación para la determinación de errores en el husillo y sus influencias sobre los errores totales de las micromáquinas herramientas.



# Referencias

- [1] Trimmer, W. S.; *Micromechanics and MEMS, Classic and Seminal Papers to 1990*; IEEE; 1996.
- [2] Ishikawa Yu., Kitahara T. Present and Future of Micromechatronics. 1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.13-20.
- [3] E Kussul, D Rachkovskij, T Baidyk and S Talayev 1996 Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment J. Micromech. Microeng. 6 410-425.
- [4] <http://www.mems-exchange.org/MEMS/applications.html>.
- [5] Takayuki Hirano, Future Prospect of Micromachine, Marina Congress Center, Helsinki, Finland, 1997.
- [6] MicroMachine Center, Application of Micromachine Technology (II), MicroMachine Magazine, No. 18, 1997, Japón (<http://www.mmc.or.jp/magazine.htm>).
- [7] Okazaki Yuichi, Kitahara Tokio. Micro-Lathe Equipped with Closed-Loop Numerical Control. Proceedings of the 2-nd International Workshop on Microfactories, Switzerland, Oct.9-10, 2000, pp.87- 90.
- [8] E.M.Kussul, L.M.Kasatkina. Los problemas de desarrollo de maquinas herramientas controladas con computadora para fábricas micro mecánicas sobre mesa. // Sistemas de control y computadoras. 1998, N5, V.28, pp.32-39. (en ruso).
- [9] Nozomu Mishima, Microfactory Project, M4 Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing, May 16 – 17, 2000, NORTHWESTERN UNIVERSITY Evanston, IL, USA. (<http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Mishima/>)
- [10] Ito, S.; Iijima, D.; Hayashi, A. , Aoyama, H. , and Yamanaka, M. ,Micro Turning System: A Super Small CNC Precision Lathe for Microfactories, proceedings of ASPE's (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting, pp295-298, USA,2002.
- [11] Yu-Chong Tai, MEMS Manufacturing at The Caltech Micromachining Lab, M4 Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing, May 16 – 17, 2000, NORTHWESTERN UNIVERSITY Evanston, IL, USA. (<http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Tai/index.htm>).
- [12] M.Tanaka, Development of desktop machining microfactory, RIKEN REVIEW, No. 34, April 2001, Japan.
- [13] <http://www.olympus.co.jp/Special/OTF80/mifaE.html>
- [14] Bleuler, H.; Clavel, R.; Breguet, J.-M.; Langen, H.; Pernette, E.; Issues in precision motion control and microhandling, Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00, IEEE International Conference on, Vol 1, 24-28 April 2000, pp 959 – 964.
- [15] Azzam Yasseen, A.; Mitchell, J.N.; Klemic, J.F.; Smith, D.A.; Mehregany, M.; A rotary electrostatic micromotor 1×8 optical switch, Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, Vol 5, Issue: 1, 1999, pp 26 - 32
- [16] <http://mems.sandia.gov/scripts/images.asp>
- [17] <http://www.yaskawa.co.jp/en/technology/topics/index.htm>
- [18] Yuichi OKAZAKI, Nozomu MISHIMA and Kiwamu ASHIDA, Microfactory and Micro Machine Tools, Reported in The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, Korea, 2002.
- [19] Kaysutoshi Kuribayashi, Study of Mechatronics, Micromachine Magazine, Micromachine Center, No. 12, 1995, Japón (<http://www.mmc.or.jp/magazine.htm>).

- [20] J. Fukuda and W. Menz, Handbook of sensor and microactuators, Micromechanical systems: principles and technology, 1998, Elsevier, Vol. 6, Holanda. pp.268.
- [21] Alberto Caballero Ruiz. Caracterización de un microcentro de maquinado de bajo costo, División de estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, 2000. Maestría. Ingeniería mecánica.
- [22] Kussul E., Ruiz L., Caballero A., Kasatkina L., Baydyk T. CNC Machine Tools for Low Cost Micro Devices Manufacturing.- Proc. of First Int. Conf. on Mechatronics and Robotics (M&R'2000), Saint-Petersburg, May 29-June 2, 2000, Vol.1. – pp. 98-103.
- [23] Kimiyuki Mitsui, The technical report: "Measurement and evaluation methods of micromachine", Micromachine Magazine No. 33, 2000, Japón.
- [24] Trimmer W.S.N. Microrobots and micromachanical systems. In: Sensors and Actuators, 19 (1989), p.267-287
- [25] Report: Testing 'invisible' machines Sandia's reliability tests advance future of micromachine systems. Sandia National Laboratories.  
<http://www.sandia.gov/media/memsrel.htm>
- [26] Maudie, T.; Miller, T.; Nielsen, R.; Wallace, D.; Ruehs, T.; Zehrbach, D., Challenges of MEMS device characterization in engineering development and final manufacturing, AUTOTESTCON '98. IEEE Systems Readiness Technology Conference, 1998 IEEE , 24-27 Aug 1998 pp. 164 –170.
- [27] Kolpekwar, A.; Blanton, R.D., Development of a MEMS testing methodology Test Conference, 1997. Proceedings, International , 1-6 Nov 1997 pp. 923 –931.
- [28] Freeman, D.M.; Davis, C.Q., Using video microscopy to characterize micromechanical systems, Broadband Optical Networks and Technologies: An Emerging Reality/Optical MEMS/Smart Pixels/Organic Optics and Optoelectronics. 1998 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings , 20-24 Jul 1998, pp. II/9 -III10.
- [29] ISO 10360-1, Geometrical Product Especificatios (GPS) Acceptance and Verification Tests for Coordinate Measurement Machine (CMM), ISO, Suiza, 2000.
- [30] ASME B89.4.1, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measurement Machines an American National Standard. ASME, pp 78, USA, 1997.
- [31] Kimiyuki Mitsui, The technical report: "Measurement and evaluation methods of micromachine", Micromachine Magazine No. 33, 2000, Japón.
- [32] T.Oiwa, Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism, Proc. Int. Conf. MECHATRONICS 2000, Sep. 21-23, Warsaw, Poland, Vol. 2, 423-426.
- [33] [http://oiwa.eng.shizuoka.ac.jp/field/microcmm/microcmm\\_e.htm](http://oiwa.eng.shizuoka.ac.jp/field/microcmm/microcmm_e.htm)
- [34] Mintsui K., Shiramatsu T., Kawada M., DEVELOPMENT OF MEASUREMENT METHOD FOR 3D SHAPES AND DIMENSIONS OF MICRO-COMPONENTS, proceedings of ASPE's (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting, pp343-348, USA,2002.
- [35] Ogura I., Okazaki Y., DEVELOPMENT OF MICRO PROBE FOR MICRO-CMM, proceedings of ASPE's (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting, pp349-352, USA, 2002.
- [36] Caballero Ruiz A., CARACTERIZACIÓN DE UN MICROCENTRO DE MAQUINADO DE BAJO COSTO, Tesis de Maestría, DEPEFI UNAM, 2002.
- [37] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Kasatkina L., 2002, Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, Journal of Micromechanics and Microengineering, 12, pp. 795-813.
- [38] Ruiz Huerta Leopoldo, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MICROCENTRO DE BAJO COSTO, Tesis de Maestría, DEPEFI UNAM, 2002.

- [39] Weck, Manfred; Handbook of Machine Tools; Vol. 1, 2 y 3; John Wiley & Sons; 1984.
- [40] ISO 230-2:1997, Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes, ISO, Suiza, 1997.
- [41] ISO 10360-1 Geometrical Product Specifications (GPS) Acceptance and Verification Tests for Coordinate Measurement Machine (CMM), ISO, Suiza, 2000.
- [42] ASME B5.54-1992, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measurement Machines an American National Standard. ASME, pp 78, USA, 1997.
- [43] Glos Rick, MACHINE TOOL INSPECTION, Technical article, Heidenhain Corporation, USA.
- [44] Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou, Shen Hwa Chiou, Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer, Precision Engineering, Volume 23, Issue 4, October 1999, Pages 243-252
- [45] Nozomu Mishima, Development of a design tool for conceptual design stages of machine tools, (American Society for Precision Engineering) 16th Annual Meeting, pp184-187, USA,2001.
- [46] K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall Internacional, 1980.
- [47] Sensores Micro Epsilon (Corriente de Eddy, CCD's), <http://www.micro-epsilon.com> .
- [48] Sensores Honeywell (LVDT), <http://www.sensotec.com/pdf/ms3s3c.pdf>.
- [49] Mark Chapman, Optical fibres deliver interferometer position feedback for new applications, Technical article, Rainshaw 2002, <http://www.renishaw.com/UserFiles/acrobat/UKEnglish/GEN-NEW-0134.pdf> .
- [50] Sensores Numerik Jena (*Encoders* ópticos), <http://www.numerikjena.de/en/pages/linsys/os-komponenten.html> .
- [51]
- [52] Davidor, Y., Genetic Algorithms and Robotics, World Scientific, London, 1991.
- [53] Estivill, V.; Wood, D., A Survey of Adaptive Sorting Algorithms, Computing Surveys, Vol. 24, 1992.
- [54] Koza, J.R., Genetic Programming, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [55] Michaalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992.
- [56] Makoto Iwasaki, Hiroto Takci, and Nobuyuki Matsui. GMDH-Based Modeling and Feedforward Compensation for Nonlinear Friction in Table Drive Systems, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 50 No. 6, pp. 1172-1178, Dec. 2003.

# Anexos

## Publicaciones realizadas durante este proyecto de investigación.

### Artículos publicados en revistas internacionales

1. KUSSUL, E., RUIZ, L., CABALLERO, A., BAYDYK, T., VELASCO, G., Kasatkin, A., Kasatkina, L., (2004), **CNC Machine Tools for Low Cost Microdevices Manufacturing**, *Journal of Applied Research and Technology*, Vol (2.), pp.76-91.
2. Baidyk T., Kussul E., Makeyev O., Caballero A., Ruiz L., Carrera G., Velasco G., 2004, **Flat image recognition in the process of microdevice assembly**. *Pattern Recognition Letters*, Volume 25, Issue 1, 5, pp 107-118.
3. Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero A., Velasco G., Kasatkina L., 2002, **Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories**, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, pp. 795-813, 2 citas.

### Artículos publicados en revistas nacionales

1. Kussul, E., Ruiz, L., Caballero, A., Marín, E., (2004), **La configuración modular como una aportación al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo**, *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, Vol (1.), pp.182 – 187.

### Capítulos en libros

2. Lara, F., Kussul, E., Baydyk, T., Ruiz, L., Caballero, A., Velasco, G., (2004) **IFIP 18 TH world computer congress tc12 first international conference on artificial applications and innovation**. *Artificial Intelligence And Innovations, Kluwer Academic Publishers*, pp.1-10.
3. Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., Velasco G., 2002, **CNC Micromachine Tool: Design & Metrology Problems**, in: *Advances in Systems Theory, Mathematical Methods and Applications*, A. Zemliak, N.Mastorakis (ed.), Greece, WSEAS Press, pp. 93-97.

### Publicaciones en congresos internacionales

1. Ruiz, L., Caballero, A., Marín, E., Velasco, G., Baydyk, T., Kussul, E., (2004), **Parallelogram Micromachine For Low Cost Micromechanics**. *2004 ASME International Mechanical Engineering Congress*, ASME (Eds.), Anaheim, California, USA, 13/11 - 19/11, IMECE 2004-62186.
2. Ruiz, L., Caballero, A., Ascanio, G., Baydyk, T., Kussul, E., (2004), **In The Way Of The Second Generation Of Microequipment**. *4th International Workshop On Microfactories*,

- University Of Science And Technology Of China (Eds.), Shanghai, China, 15/10 - 17/10, pp. 86-91.
3. Caballero, A., Ruiz, L., Baydyk, T., Ascanio, G., Kussul, E., Heredia, F., Álvarez, F., (2004), **An Application Of Micromechanics: Microdrive To Automate Extracellular Studies Of Neural Response In Rats**. *4th International Workshop On Microfactories*, University Of Science And Technology Of China (Eds.), Shanghai, China, 15/10-17/10, pp.664-669.
  4. Kussul E., Baidyk T., Ruiz L., Caballero A., Velasco G., 2002, *Development of Low-cost Microequipment*. **2002 International Symposium on Micromechatronics and Human Science**, IEEE, Nagoya, Japan, Oct. 20-23, pp.125-134.
  5. L. Ruiz-Huerta, A. Caballero Ruiz, E. Kussul, 2002, **Guidelines for design low cost micromechanics**, *17TH Annual Meeting ASPE*, St. Louis, Missouri, Octubre 20-25, pp 228-233.
  6. Caballero-Ruiz, L. Ruiz-Huerta, E. Kussul, T. Baidyk, G. Velasco, 2002, **Micromachine tool: Measurement and control**, *17TH Annual Meeting ASPE*, St. Louis, Missouri, Octubre 20-25, pp 377-382.
  7. E. Kussul, T. Baidyk, L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Velasco, 2002, **CNC micro machine tool: Design & metrology problems**, *Advances in systems theory, mathematical methods and applications*. Congreso WSEAS, Cancun, México, mayo 12-15, pp. 93-97.

#### Publicaciones en congresos nacionales

1. Silva, H. H., Caballero, A., Ruiz, L., Kussul, E., (2004), **Sistema de Control para Micromáquinas Herramienta Basado en un Microcontrolador PIC**. *XIX Congreso de Instrumentación SOMI*, SOMI (Eds.), Pachuca, México, 25/10-29/10, Pp. Hsl19128.
2. Kussul E., Baidyk T., Caballero A., Ruiz L., Velasco G., 2003, **Correlaciones entre el tamaño de microequipo y su precisión**, *Congreso SOMI XVIII*, Ciudad de México, México, 6-10 octubre, pp.5.
3. L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, E. Kussul, 2003, **Herramienta de diseño para micromecánica**, *Congreso SOMI XVIII*, Ciudad de México, México, 6-10 octubre, pp.6.
4. Velasco H.G, Ruiz H.L, Caballero R.L, Kussul E., Baydyk T., 2003, **Cinemática de un microcentro de maquinado**, *Congreso SOMI XVIII*, Ciudad de México, México, 6-10 octubre, pp.6.
5. Caballero A., Kussul E., 2002, **Compensación de errores en una maquina herramienta**”, *Congreso SOMI XVII*, Mérida, Yucatán, México, 14-18 octubre, pp.8.
6. Ruiz-Huerta L., Kussul E., Caballero-Ruiz A., Santos-Carrasco C. Muñoz-Leines C., 2002, **Diseño de un equipo para medir fuerzas de adherencia en micropiezas**, *Congreso SOMI XVII*, Mérida, Yucatán, México, octubre 14-18, pp.5.
7. Caballero, G. Velasco, 2001, **Caracterización de un microcentro de maquinado mediante esferas**, *SOMI XVI*, Querétaro, Qro, México, octubre 15-19, pp 7.