



Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo

ISSN: 1665-7381

fjso@servidor.unam.mx

Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
México

Marín Aguilar, E.; Ruiz Huerta, L.; Caballero Ruiz, A.; Kussul, E.
La configuración modular como una aportación al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo
costo
Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, vol. 1, núm. 5, septiembre, 2004, pp. 182-187
Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76810505>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

La configuración modular como una aportación al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo

Marín-Aguilar, E.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Kussul E.

Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.
Circuito Exterior s/n, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, A. P. 70-186.
Tel. +52 (55) 56228602 ext. 1208, e-Mail: epsilon_mi_alfa@web.de, leoruiz@servidor.unam.mx.

ABSTRACT

A proposal in micromechanical field is discussed. This paper describes a new parameter (modular configuration) in the microequipment design guidelines. We describe two modules (actuation and fastening) of a first generation MicroMachine Tool (MMT). The proposed design guidelines include the implementation of simple, functional and low cost mechanical elements which help this MMT to obtain high resolution.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta para el diseño de Microequipo: la Configuración Modular. Como casos de estudio se describen algunas generalidades del diseño de dos módulos, uno de actuación y otro de sujeción para un prototipo de microcentro de maquinado de primera generación. Se presenta la aplicación de una metodología de diseño cuyos parámetros incluyen la implementación de elementos simples, funcionales y de bajo costo, que ayudan a desarrollar micromáquinas herramienta de alta resolución.

Palabras clave: Microingeniería, Microequipo, Micromáquina Herramienta (MMH), Configuración Modular, Modularidad.

1. INTRODUCCIÓN

Una definición común de microingeniería es: *una nueva tecnología de manufactura, concentrada en la aplicación de técnicas desarrolladas en el ámbito de la electrónica para adquirir un alto desempeño, en el rango milimétrico, de estructuras tridimensionales y componentes mecánicos con características micrométricas, así como precisión y bajo costo* [1].

En la actualidad existe una tendencia acentuada en el desarrollo de nuevas tecnologías de miniaturización debido a que diferentes campos industriales han comenzado a incorporar la microingeniería, vista como una estrategia tecnológica, en el desarrollo de sus productos. Industrias tales como la automotriz y la aeroespacial, requieren de microdispositivos: sensores de presión, acelerómetros, sistemas de propulsión para vehículos de combate aéreo, etc., cuyo desarrollo está basado en sistemas micro-electromecánicos (MEMS) [2]. La parte substancial de esta tecnología se apoya en el procesamiento por lotes (*batch process*) utilizado en la microelectrónica para la fabricación de circuitos integrados (IC), que implementa elementos mecánicos simples, fabricados principalmente de silicio [1-4].

Existe otra alternativa que propone emplear sistemas micromecánicos basados en sistemas de manufactura convencionales para generar microdispositivos. Esta línea de investigación se comenzó a desarrollar en Japón y Ucrania, siendo su principal objetivo desarrollar herramientas para el desarrollo de microdispositivos más complejos, como es el caso de manipuladores y otros equipos de tamaño milimétrico, donde: — las formas de dichos microdispositivos son complejas (tres dimensiones), — se requiere de un diseño para ensamble y, — existe la necesidad de que los materiales de fabricación sean diversos [3].

2. ANTECEDENTES

Dentro de las actividades del Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM), del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), UNAM, se encuentra el desarrollo de microequipo mecánico. Dentro de estos equipos se destacan un par de prototipos de centros de maquinado y un par de modelos de manipuladores. Dichos resultados se apoyan en la necesidad de desarrollar microequipo mecánico de bajo costo.

En el año 2000 se terminó el primer prototipo de la primera generación de micromáquinas herramienta (MMH) desarrollado

en México, con dimensiones de 13×16×8.5cm, el cual consta principalmente de una parte estructural (bastidor) y de tres arreglos de: motor de pasos, reductor de velocidad, tornillo de avance y guías con carros. Esta MMH se muestra en la figura 1.

Con base en la experiencia del desarrollo de este primer prototipo se han propuesto ciertas líneas de diseño que conllevan a una metodología para el desarrollo de microequipo de bajo costo. Dichas líneas proponen incluir, durante el proceso de diseño, elementos que puedan ser escalados y que tengan una aplicación general dentro de las máquinas. Se recomienda utilizar elementos simples para obtener desplazamientos suaves que no requieran de especial atención en su ensamble y escalabilidad [5].

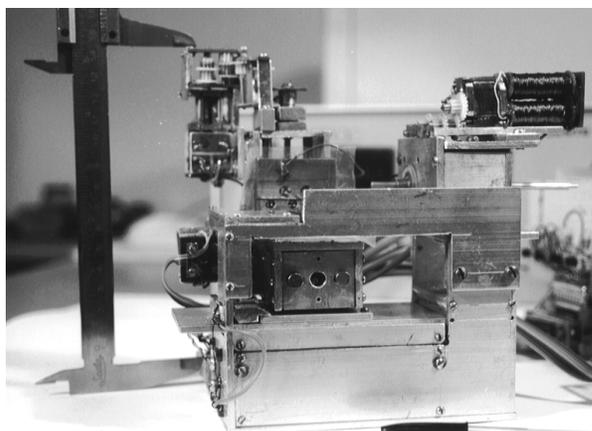


Figura 1. Primer microcentro de maquinado desarrollado en México.

A partir de las ideas antes mencionadas, se propuso el siguiente *checklist* [5]:

1. Uso de sistemas CAD (modeladores de sólidos).
2. Uso de materiales con coeficientes de dilatación térmica semejantes.
3. Diseñar piezas que puedan ser utilizadas en diferentes puntos de las configuraciones planeadas.
4. Diseñar pensando siempre en los procesos de mantenimiento y ensamble.
5. Aplicación de elementos que permitan desplazamientos suaves (como esferas y barras cilíndricas).
6. Uso de elementos para reducir el juego mecánico (*backlash*).
7. En medida de lo posible, resolver problemas de exactitud y precisión mediante *software* y no por medio de *hardware*.

3. LA CONFIGURACIÓN MODULAR

Con la experiencia del LMM en el desarrollo de la primera MMH de primera generación (figura 1), se propusieron las líneas de diseño mencionadas en el punto anterior. Con base

en ello, se propuso el diseño y la construcción de un segundo prototipo para llevar a cabo pruebas y comparaciones de operación y así probar dicha metodología. La simplicidad de la máquina es un aspecto modular en su construcción, y se ha recomendado utilizar el mismo material en la mayoría de las piezas para evitar distorsiones mecánicas estructurales por dilataciones térmicas, lo cual ya había sucedido con prototipos previos [4]. Para elevar sus características, tales como resolución, precisión y exactitud, se han desarrollado sofisticados sistemas de control con el objetivo de minimizar los problemas asociados al *hardware* mecánico.

El diseño de este segundo prototipo está basado en tres ejes traslacionales (X, Y, Z) y uno más rotacional. Para cada uno de estos ejes se tiene un desplazamiento de 20mm. La configuración general de la micromáquina es a partir de palancas y esferas que se unen para formar paralelogramos, disminuyendo el juego mecánico entre elementos (*backlash*). Los sistemas basados en paralelogramos permiten obtener una mayor rigidez a lo largo de sus desplazamientos. Para este prototipo, encontramos como principales virtudes para el uso de sistemas de paralelogramos, la facilidad de manufactura que estos elementos conllevan (bajo costo), la posibilidad de incluir elementos de desplazamiento suave (esferas), y la gran ventaja que involucran los nuevos sistemas de cómputo que permiten resolver tareas para cálculo de posición que antiguamente no se aplicaban.

Finalmente esta configuración de paralelogramos, que en máquinas convencionales no podría considerarse debido a los espacios que requeriría, es posible considerarla como una excelente opción en el campo de la micromecánica. Dicha configuración resulta en movimientos con una geometría semejante a casquetes circulares. En la figura 2 se muestra una representación de la configuración de trabajo de esta MMH. La idea principal consiste en utilizar una palanca apoyada en un extremo y con diferentes puntos de anclaje (fulcros). Con estos puntos, es posible utilizar la palanca como un convertidor a baja velocidad y alto par, teniendo en cuenta la ventaja de obtener con ello mayor simplicidad y una mejor resolución (menor a 1.0 μm). En la figura 3 se muestra la configuración estructural de este prototipo.

Los parámetros mencionados en el *checklist* para el diseño de microequipo enfatizan la simplicidad de los componentes, la escalabilidad, el menor número de elementos o piezas empleadas en algún sistema, la facilidad del maquinado, la facilidad de ensamble/ desensamble, etc. Como consecuencia de lo anterior se propone un nuevo parámetro que está en coherencia con dichas líneas de diseño. Éste tiene el siguiente enfoque:

8. Desarrollar subsistemas que permitan la ejecución de funciones específicas: módulos.

En este trabajo, consideramos el diseño de algunos módulos operativos bajo la alternativa tecnológica de la producción

de componentes micromecánicos. Esta tecnología se basa en la idea de la miniaturización del equipo mecánico convencional, como las máquinas herramienta y los manipuladores, produciendo microequipo generacional. Se propone utilizar técnicas convencionales para el tratamiento mecánico de los materiales, y el ensamble automático de dispositivos mecánicos y electrónicos, para la manufactura de componentes micromecánicos y microelectromecánicos en rangos inferiores al milímetro. Esta corriente de máquinas generacionales se denomina *Micro Equipment Technology* (MET) y propone utilizar procesos de producción en paralelo, teniendo como objetivo un decremento en el costo de manufactura. Esto contrasta directamente con el procesamiento por lotes utilizado en la fabricación de MEMS [4]. Por medio de la MET se plantea una configuración mediante células de producción para conformar microfábricas, que tengan como característica la producción masiva de microdispositivos, así como la flexibilidad de producción. Con base en nuestra experiencia, en el LMM definimos una célula de producción como una máquina o conjunto de máquinas destinadas a realizar un determinado número de procesos dentro de una línea de producción.

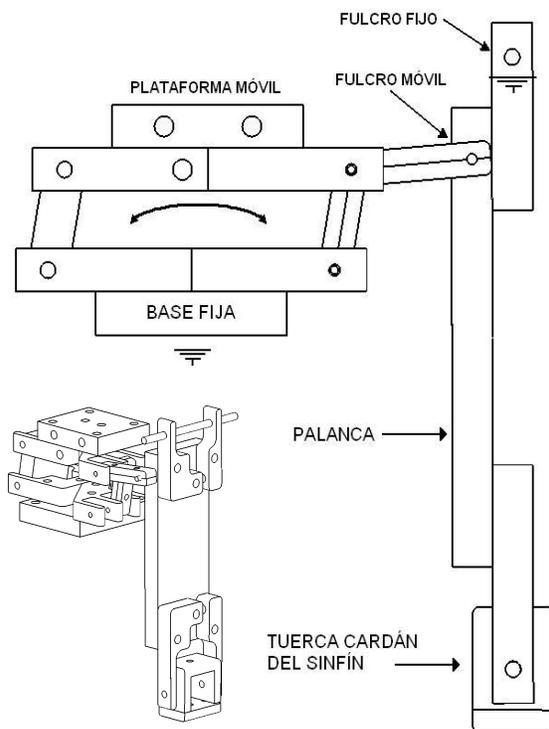


Figura 2. Configuración de trabajo (palancas y paralelogramos).

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

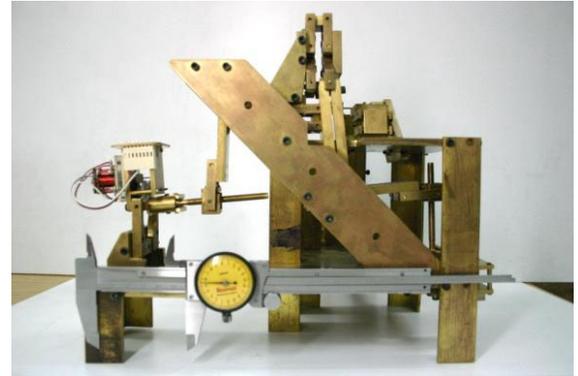


Figura 3. Segundo prototipo de microcentro de maquinado.

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

4. MÓDULO DE ACTUACIÓN

Antes de la constitución del módulo de actuación para los ejes de la MMH, se utilizaron sistemas CAD a lo largo del diseño y el re-diseño ya que ayudan a reducir los tiempos de desarrollo y a contar con un buen plan de manufactura.

El módulo de actuación involucra un pequeño motor de pasos manufacturado en el LMM, una caja de transmisión, una carcasa de acoplamiento, un pequeño circuito *encoder* que trabaja con optoacopladores comunes, algunos conectores, etc. Estos elementos están dispuestos en una base estructural que mantiene una posición adecuada para que el tren se acople al husillo de transmisión. La figura 4 muestra el módulo de actuación.

Los motores de pasos son ideales para el posicionamiento, ya que son de fácil manejo y normalmente no necesitan una constante realimentación (control a lazo cerrado) o monitoreo. Lo único que requieren es un número exacto de pasos para llegar a una posición exacta y repetible. El control a lazo abierto es ideal para sistemas que operan a bajas aceleraciones y cargas estáticas, pero un sistema de lazo cerrado es esencial para altas aceleraciones y cargas variables. Con el fin de obtener ambas virtudes propusimos un sistema

de control *bimodal* que nos permite aproximarnos a un determinado punto en lazo cerrado con alta velocidad relativa al lazo abierto, y cuando el mecanismo está cerca del punto deseado comenzamos a operar los actuadores en lazo abierto. Esto permitirá incrementar la productividad de la MMH, minimizando el tiempo en trayectorias en vacío, manteniendo una alta precisión [6].

Manteniendo la idea de un fácil ensamble y desensamble, se optó por mantener la carcasa "abierta", de forma simple es constituida por dos tapas para la sujeción de pequeñas columnas que mantienen dicha estructura. Y por último, se utiliza un conector entre el motor y el circuito de optoacoplamiento para evitar falsos contactos o cortocircuitos, ayudando así a que el módulo sea más estético y manipulable (figura 4).

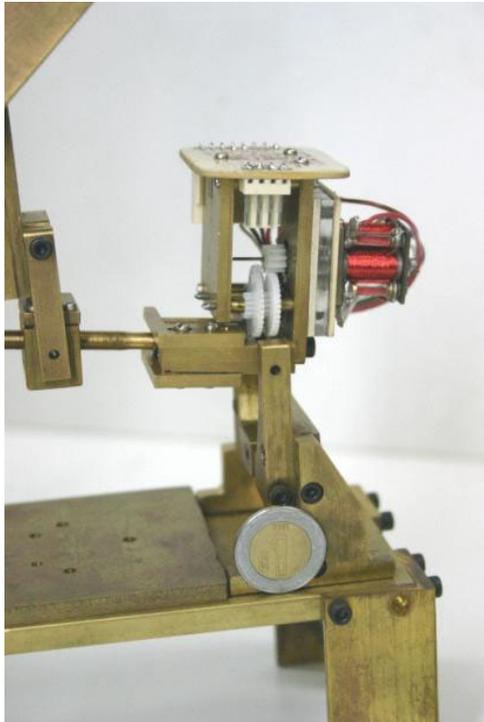


Figura 4. Módulo de actuación.

Los primeros motores se probaron y en ellos se observaron ciertas variaciones en su comportamiento cuando se modificaban las velocidades de trabajo, esto nos llevó a la sospecha de estar trabajando con frecuencias cerca de los rangos de resonancia de los micromotores. El micromotor empleado es de 90° por paso, es decir, de 4 pasos por revolución y emplea un imán permanente cilíndrico como rotor (figura 5).

Uno de los inconvenientes que se observaron fue la temperatura que alcanza el dispositivo después de trabajar cierto tiempo. Por ejemplo, después de aproximadamente 5 minutos de trabajo se alcanza una temperatura cercana a los

60°C , lo cual puede llevarnos a que el dispositivo se queme o a que simplemente sus componentes tengan una vida útil muy corta.

Sobre la temperatura. El ferromagnetismo de los materiales desaparece cerca de la temperatura *Curie*. La capacidad de autoalineamiento de los dipolos, gradualmente va desapareciendo conforme la temperatura aumenta, porque el incremento de energía de las vibraciones térmicas desalinea a los dipolos. Una posibilidad de evitar estos problemas es utilizar imanes permanentes tratados que operan a altas temperaturas. La desventaja es el alto costo de estos materiales, relacionados con sus procesos de producción, como son el sinterizado, la homogenización, etc. [7 y 8].

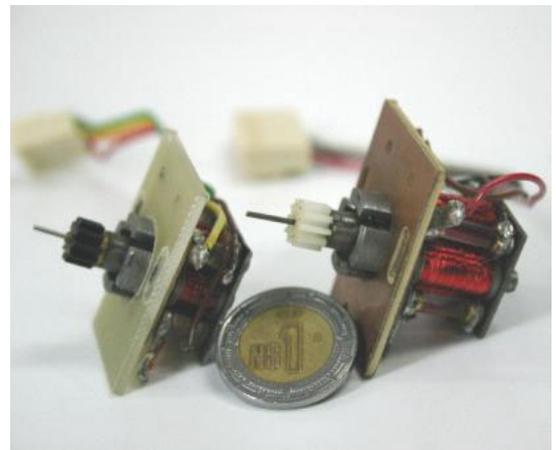


Figura 5. Micromotores con diferentes rotores y estatores.

Modificaciones al Diseño y Soluciones

Para resolver estos problemas se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se construyó un nuevo micromotor con características semejantes a los previos, pero con un aumento en su tamaño para alojar bobinas con casi el doble de resistencia ($\sim 20\Omega$), y se aumentó el diámetro de los núcleos, ensanchando con ello al estator. La temperatura de operación de este micromotor fue menor a la del prototipo previo ($\sim 30^\circ\text{C}$).
- Se utilizan rotores que requieren de un menor trabajo de manufactura (limado) sobre el imán permanente para no minimizar las propiedades magnéticas, la paciencia con la que se lleve a cabo este limado para dar la forma adecuada al imán evitará el calentamiento excesivo; por ello, se utilizará un rotor que no implique tanto trabajo sobre el imán y lo mantenga casi como se obtiene. En la figura 5 se muestran el primer prototipo de micromotor (izq.) y el segundo prototipo (der.), que resultó más adecuado para la actuación del módulo.

El diseño y la manufactura se realizan con ayuda de sistemas computacionales, sin descartar el uso de herramienta convencional, con el cuidado de cumplir las especificaciones de diseño y la calidad de los componentes.

En este momento estamos terminando de ensamblar estos módulos (figura 6) a la MMH, y ya hemos comenzado con la última etapa de diseño y manufactura de la misma (módulo de sujeción de materia prima con alimentación automática).



Figura 6. Segundo prototipo de MMH con los módulos de actuación.

5. MÓDULO DE SUJECIÓN

En las guías de diseño mencionadas, junto con el punto propuesto en este trabajo, se recomienda utilizar piezas que puedan emplearse en diferentes partes de la MMH, y en este caso es una prioridad mantener concéntrica la pieza a maquinar. Para la automatización del sistema de cierre se consideran barras de latón de $\phi 1/8''$ y $\phi 1/16''$, procurando garantizar que los elementos del módulo permitan el escalamiento generacional. Por ello se ha decidido utilizar elementos simples, como los *collets* o collares, que cumplen con dichas necesidades.

Si se pensara en la alternativa de poder maquinar cualquier pieza en un rango de $30\mu\text{m}$ a 4 mm , el sistema tendría características de sujeción general como la universalidad en las piezas de trabajo. Para nuestro propósito se opta por combinar algunas características de los collares con la estructura de transmisión que controlará su actuación. La función modular principal es:

El módulo de sujeción debe ser un dispositivo utilizado para posicionar y sujetar una pieza de trabajo o una herramienta y una contra parte (porta-herramientas o porta-piezas) para llevar a cabo alguna operación de manufactura de manera automática en coordinación con el control del módulo de actuación de la MMH.

Debido a que no existe una gran variedad de barras

comerciales entre $30\mu\text{m}$ y 4 mm , las ventajas de utilizar un *collet* se dan en la automatización del módulo y no tanto en la versatilidad de su sujeción o en la precisión en la concentricidad que pueda ofrecer.

El tipo de collares que proponemos utilizar mantienen las piezas concéntricas al eje de revolución, aunque pierde precisión con piezas demasiado largas (dispuestas en *cantilever*), esto no es un problema significativo ya que nuestra razón de operación común es 5:1 (ϕ de la pieza / largo de la pieza). Estos elementos tienen una geometría simple, adaptable al control automático y su capacidad de concentricidad depende de la precisión con que este dispositivo se manufacture.



Figura 7. Collar. Dispositivo de sujeción utilizado en la primera MMH de primera generación.

Este dispositivo (figura 7), es una especie de manguito ranurado, cónico en su parte externa, que ajusta en la entrada del mandril, sujetando las piezas de trabajo o pequeñas herramientas circulares. La parte sustancial de este diseño es la disposición en la MMH, por lo que se han comenzado a realizar modelos en CAD (figuras 8, 9 y 10) para su óptima distribución y ensamble. Esto, seguramente, seguirá retroalimentando cambios en el diseño.

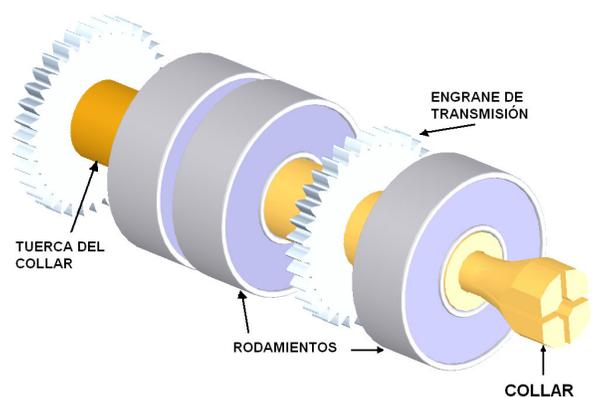


Figura 8. Detalle en CAD del eje de revolución con el collar de sujeción.

Dentro de los elementos a considerar en la automatización del módulo se incluye la manera de revolucionar el collar de forma independiente al mandril, esto con el objetivo de abrir y cerrar la boquilla para dar avance a la barra de trabajo. El

mandril del collar se acoplará mecánicamente mediante un engrane de transmisión o algún otro dispositivo funcional a un módulo de actuación. De manera semejante la tuerca, que es la contra del collar (mostrada en forma de T en la figura 7), o bien el propio collar deberán acoplarse a un módulo de actuación para lograr controlar el cierre y la apertura automáticamente (figuras 8 y 9).

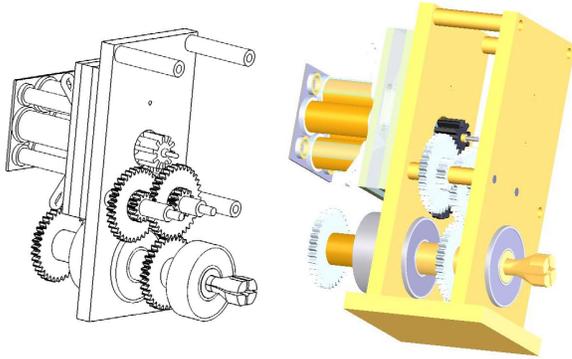


Figura 9. Primeras configuraciones en CAD del módulo de sujeción.

Es importante enfatizar que las alternativas de diseño, conforme se analizan los parámetros, las especificaciones y los recursos, modifican las configuraciones y disposiciones de los elementos funcionales dentro de los prototipos modulares, pero ello enriquece la perspectiva de integración de los diferentes sistemas de la MMH.

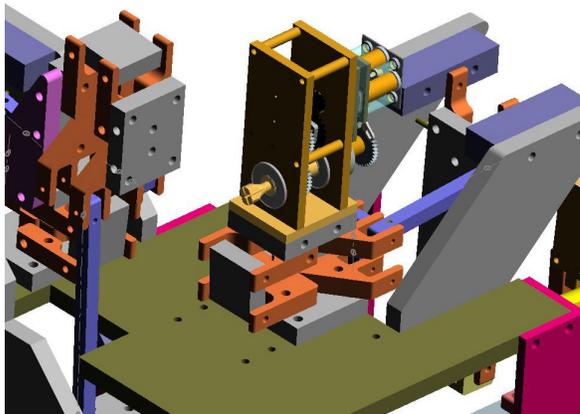


Figura 10. Detalle en CAD de las configuraciones de prueba en el espacio de trabajo de la MMH.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se proporciona una aportación al diseño de microequipo mediante sistemas modulares, tomando como caso de estudio algunos elementos de un microcentro de maquinado. La idea básica de dichas implementaciones descansa en la experiencia del LMM del CCADET en el desarrollo de microequipo automatizado.

Las configuraciones modulares en el desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo encuentran su lugar en la integrabilidad de los sistemas y en la optimización de recursos para su desempeño, es por ello que se ha mostrado el trabajo que se realiza en torno a dichas vertientes tecnológicas.

Es importante señalar que el uso de sistemas CAD, como los modeladores de sólidos, es una herramienta importante para el diseño mecánico al momento de establecer configuraciones, permitiendo optimizar los tiempos de desarrollo y planificar de una mejor manera la manufactura de los prototipos.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es apoyado por el PAPIIT a través de su proyecto IN112102 y por el CONACyT a través de sus proyectos 339944-U y 39395-A (con apoyo de la NSF). Un agradecimiento muy especial a los miembros del LMM del CCADET, UNAM, por sus invaluable consejos y apoyo para realizar este trabajo.

8. REFERENCIAS

- [1] Santilli, R. (1995). "Will Microengineering Affect Your Business?" en *Computing and Control Engineering Journal*, Abril, pp. 93-98.
- [2] Wilson, J. R. (2003). "Major New Thrust for MEMS Engine" en *Aerospace America Magazine*, Febrero, pp. 34-38
- [3] Kussul, E., Rachkovskij, D., Baidyk, T. y Talayev, S. (1996). "Micromechanical Engineering: A Basis for the Low Cost Manufacturing of Mechanical Microdevices Using Microequipment" en *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 410-425.
- [4] Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., y Kasatkina, L. (2002). "Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories" en *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, pp. 1-18.
- [5] Ruiz-Huerta, L., Kussul, E., Caballero-Ruiz, A. (2002). "Guidelines for Low Cost Micromechanics". ASPE XVII Annual Meeting, v. 27, pp. 228-233.
- [6] Muñoz Leines, C.A., Santos Carrasco, C.A. (2003). *Empleo de FPGA's para el Sistema de Control de Motores de Pasos Bimodales en Micromecánica*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Eléctrica Electrónica). Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [7] Matthias, T. et al. (2002). "Sm(Co,Fe,Cu,Zr)_z Magnets for High Temperature Applications: Microstructural and Micromagnetic Analysis" en *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, Septiembre, pp. 2943-2945.
- [8] Main Scientific Results. (2000). *k ational Institute of Materials Physics*. Laboratory of Oxidic Materials // Annual Report.

La configuración modular como una aportación al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo

Marín-Aguilar, E.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Kussul E.

Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.
Circuito Exterior s/n, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, A. P. 70-186.
Tel. +52 (55) 56228602 ext. 1208, e-Mail: epsilon_mi_alfa@web.de, leoruiz@servidor.unam.mx.

ABSTRACT

A proposal in micromechanical field is discussed. This paper describes a new parameter (modular configuration) in the microequipment design guidelines. We describe two modules (actuation and fastening) of a first generation MicroMachine Tool (MMT). The proposed design guidelines include the implementation of simple, functional and low cost mechanical elements which help this MMT to obtain high resolution.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta para el diseño de Microequipo: la Configuración Modular. Como casos de estudio se describen algunas generalidades del diseño de dos módulos, uno de actuación y otro de sujeción para un prototipo de microcentro de maquinado de primera generación. Se presenta la aplicación de una metodología de diseño cuyos parámetros incluyen la implementación de elementos simples, funcionales y de bajo costo, que ayudan a desarrollar micromáquinas herramienta de alta resolución.

Palabras clave: Microingeniería, Microequipo, Micromáquina Herramienta (MMH), Configuración Modular, Modularidad.

1. INTRODUCCIÓN

Una definición común de microingeniería es: *una nueva tecnología de manufactura, concentrada en la aplicación de técnicas desarrolladas en el ámbito de la electrónica para adquirir un alto desempeño, en el rango milimétrico, de estructuras tridimensionales y componentes mecánicos con características micrométricas, así como precisión y bajo costo* [1].

En la actualidad existe una tendencia acentuada en el desarrollo de nuevas tecnologías de miniaturización debido a que diferentes campos industriales han comenzado a incorporar la microingeniería, vista como una estrategia tecnológica, en el desarrollo de sus productos. Industrias tales como la automotriz y la aeroespacial, requieren de microdispositivos: sensores de presión, acelerómetros, sistemas de propulsión para vehículos de combate aéreo, etc., cuyo desarrollo está basado en sistemas micro-electromecánicos (MEMS) [2]. La parte substancial de esta tecnología se apoya en el procesamiento por lotes (*batch process*) utilizado en la microelectrónica para la fabricación de circuitos integrados (IC), que implementa elementos mecánicos simples, fabricados principalmente de silicio [1-4].

Existe otra alternativa que propone emplear sistemas micromecánicos basados en sistemas de manufactura convencionales para generar microdispositivos. Esta línea de investigación se comenzó a desarrollar en Japón y Ucrania, siendo su principal objetivo desarrollar herramientas para el desarrollo de microdispositivos más complejos, como es el caso de manipuladores y otros equipos de tamaño milimétrico, donde: — las formas de dichos microdispositivos son complejas (tres dimensiones), — se requiere de un diseño para ensamble y, — existe la necesidad de que los materiales de fabricación sean diversos [3].

2. ANTECEDENTES

Dentro de las actividades del Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM), del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), UNAM, se encuentra el desarrollo de microequipo mecánico. Dentro de estos equipos se destacan un par de prototipos de centros de maquinado y un par de modelos de manipuladores. Dichos resultados se apoyan en la necesidad de desarrollar microequipo mecánico de bajo costo.

En el año 2000 se terminó el primer prototipo de la primera generación de micromáquinas herramienta (MMH) desarrollado

en México, con dimensiones de 13×16×8.5cm, el cual consta principalmente de una parte estructural (bastidor) y de tres arreglos de: motor de pasos, reductor de velocidad, tornillo de avance y guías con carros. Esta MMH se muestra en la figura 1.

Con base en la experiencia del desarrollo de este primer prototipo se han propuesto ciertas líneas de diseño que conllevan a una metodología para el desarrollo de microequipo de bajo costo. Dichas líneas proponen incluir, durante el proceso de diseño, elementos que puedan ser escalados y que tengan una aplicación general dentro de las máquinas. Se recomienda utilizar elementos simples para obtener desplazamientos suaves que no requieran de especial atención en su ensamble y escalabilidad [5].

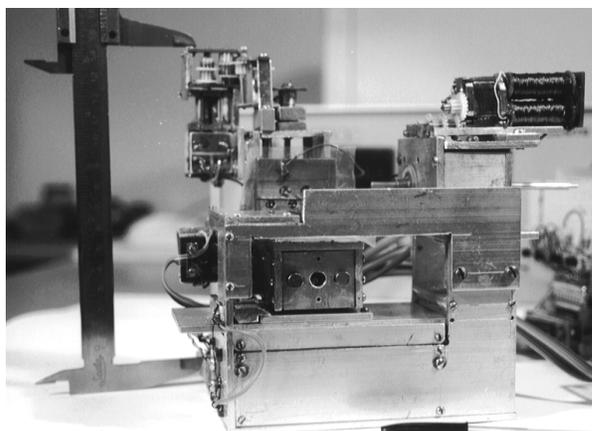


Figura 1. Primer microcentro de maquinado desarrollado en México.

A partir de las ideas antes mencionadas, se propuso el siguiente *checklist* [5]:

1. Uso de sistemas CAD (modeladores de sólidos).
2. Uso de materiales con coeficientes de dilatación térmica semejantes.
3. Diseñar piezas que puedan ser utilizadas en diferentes puntos de las configuraciones planeadas.
4. Diseñar pensando siempre en los procesos de mantenimiento y ensamble.
5. Aplicación de elementos que permitan desplazamientos suaves (como esferas y barras cilíndricas).
6. Uso de elementos para reducir el juego mecánico (*backlash*).
7. En medida de lo posible, resolver problemas de exactitud y precisión mediante *software* y no por medio de *hardware*.

3. LA CONFIGURACIÓN MODULAR

Con la experiencia del LMM en el desarrollo de la primera MMH de primera generación (figura 1), se propusieron las líneas de diseño mencionadas en el punto anterior. Con base

en ello, se propuso el diseño y la construcción de un segundo prototipo para llevar a cabo pruebas y comparaciones de operación y así probar dicha metodología. La simplicidad de la máquina es un aspecto modular en su construcción, y se ha recomendado utilizar el mismo material en la mayoría de las piezas para evitar distorsiones mecánicas estructurales por dilataciones térmicas, lo cual ya había sucedido con prototipos previos [4]. Para elevar sus características, tales como resolución, precisión y exactitud, se han desarrollado sofisticados sistemas de control con el objetivo de minimizar los problemas asociados al *hardware* mecánico.

El diseño de este segundo prototipo está basado en tres ejes traslacionales (X, Y, Z) y uno más rotacional. Para cada uno de estos ejes se tiene un desplazamiento de 20mm. La configuración general de la micromáquina es a partir de palancas y esferas que se unen para formar paralelogramos, disminuyendo el juego mecánico entre elementos (*backlash*). Los sistemas basados en paralelogramos permiten obtener una mayor rigidez a lo largo de sus desplazamientos. Para este prototipo, encontramos como principales virtudes para el uso de sistemas de paralelogramos, la facilidad de manufactura que estos elementos conllevan (bajo costo), la posibilidad de incluir elementos de desplazamiento suave (esferas), y la gran ventaja que involucran los nuevos sistemas de cómputo que permiten resolver tareas para cálculo de posición que antiguamente no se aplicaban.

Finalmente esta configuración de paralelogramos, que en máquinas convencionales no podría considerarse debido a los espacios que requeriría, es posible considerarla como una excelente opción en el campo de la micromecánica. Dicha configuración resulta en movimientos con una geometría semejante a casquetes circulares. En la figura 2 se muestra una representación de la configuración de trabajo de esta MMH. La idea principal consiste en utilizar una palanca apoyada en un extremo y con diferentes puntos de anclaje (fulcros). Con estos puntos, es posible utilizar la palanca como un convertidor a baja velocidad y alto par, teniendo en cuenta la ventaja de obtener con ello mayor simplicidad y una mejor resolución (menor a 1.0 μm). En la figura 3 se muestra la configuración estructural de este prototipo.

Los parámetros mencionados en el *checklist* para el diseño de microequipo enfatizan la simplicidad de los componentes, la escalabilidad, el menor número de elementos o piezas empleadas en algún sistema, la facilidad del maquinado, la facilidad de ensamble/ desensamble, etc. Como consecuencia de lo anterior se propone un nuevo parámetro que está en coherencia con dichas líneas de diseño. Éste tiene el siguiente enfoque:

8. Desarrollar subsistemas que permitan la ejecución de funciones específicas: módulos.

En este trabajo, consideramos el diseño de algunos módulos operativos bajo la alternativa tecnológica de la producción

de componentes micromecánicos. Esta tecnología se basa en la idea de la miniaturización del equipo mecánico convencional, como las máquinas herramienta y los manipuladores, produciendo microequipo generacional. Se propone utilizar técnicas convencionales para el tratamiento mecánico de los materiales, y el ensamble automático de dispositivos mecánicos y electrónicos, para la manufactura de componentes micromecánicos y microelectromecánicos en rangos inferiores al milímetro. Esta corriente de máquinas generacionales se denomina *Micro Equipment Technology* (MET) y propone utilizar procesos de producción en paralelo, teniendo como objetivo un decremento en el costo de manufactura. Esto contrasta directamente con el procesamiento por lotes utilizado en la fabricación de MEMS [4]. Por medio de la MET se plantea una configuración mediante células de producción para conformar microfábricas, que tengan como característica la producción masiva de microdispositivos, así como la flexibilidad de producción. Con base en nuestra experiencia, en el LMM definimos una célula de producción como una máquina o conjunto de máquinas destinadas a realizar un determinado número de procesos dentro de una línea de producción.

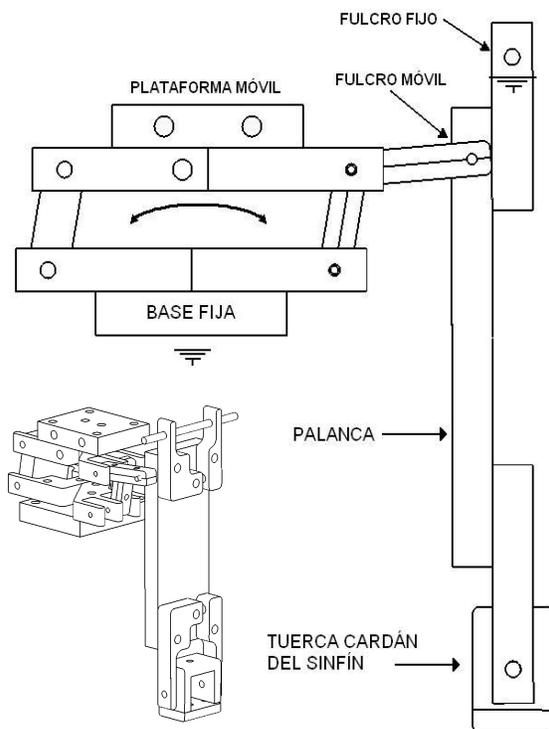


Figura 2. Configuración de trabajo (palancas y paralelogramos).

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

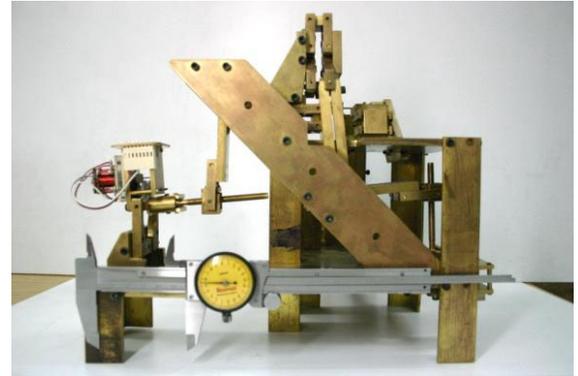


Figura 3. Segundo prototipo de microcentro de maquinado.

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

4. MÓDULO DE ACTUACIÓN

Antes de la constitución del módulo de actuación para los ejes de la MMH, se utilizaron sistemas CAD a lo largo del diseño y el re-diseño ya que ayudan a reducir los tiempos de desarrollo y a contar con un buen plan de manufactura.

El módulo de actuación involucra un pequeño motor de pasos manufacturado en el LMM, una caja de transmisión, una carcasa de acoplamiento, un pequeño circuito *encoder* que trabaja con optoacopladores comunes, algunos conectores, etc. Estos elementos están dispuestos en una base estructural que mantiene una posición adecuada para que el tren se acople al husillo de transmisión. La figura 4 muestra el módulo de actuación.

Los motores de pasos son ideales para el posicionamiento, ya que son de fácil manejo y normalmente no necesitan una constante realimentación (control a lazo cerrado) o monitoreo. Lo único que requieren es un número exacto de pasos para llegar a una posición exacta y repetible. El control a lazo abierto es ideal para sistemas que operan a bajas aceleraciones y cargas estáticas, pero un sistema de lazo cerrado es esencial para altas aceleraciones y cargas variables. Con el fin de obtener ambas virtudes propusimos un sistema

de control *bimodal* que nos permite aproximarnos a un determinado punto en lazo cerrado con alta velocidad relativa al lazo abierto, y cuando el mecanismo está cerca del punto deseado comenzamos a operar los actuadores en lazo abierto. Esto permitirá incrementar la productividad de la MMH, minimizando el tiempo en trayectorias en vacío, manteniendo una alta precisión [6].

Manteniendo la idea de un fácil ensamble y desensamble, se optó por mantener la carcasa "abierta", de forma simple es constituida por dos tapas para la sujeción de pequeñas columnas que mantienen dicha estructura. Y por último, se utiliza un conector entre el motor y el circuito de optoacoplamiento para evitar falsos contactos o cortocircuitos, ayudando así a que el módulo sea más estético y manipulable (figura 4).

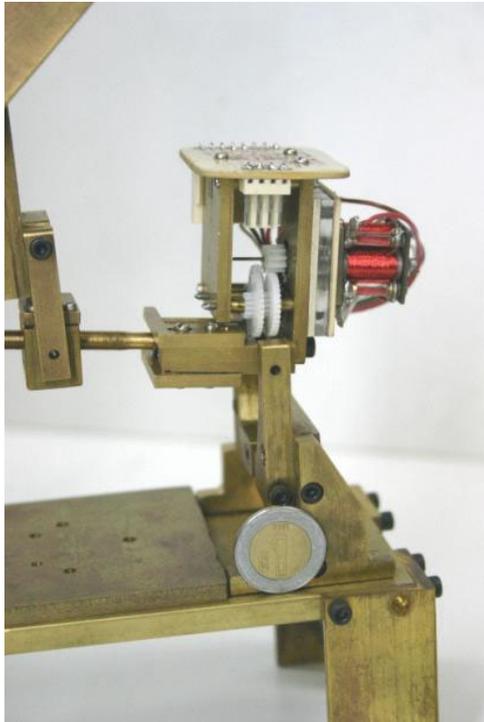


Figura 4. Módulo de actuación.

Los primeros motores se probaron y en ellos se observaron ciertas variaciones en su comportamiento cuando se modificaban las velocidades de trabajo, esto nos llevó a la sospecha de estar trabajando con frecuencias cerca de los rangos de resonancia de los micromotores. El micromotor empleado es de 90° por paso, es decir, de 4 pasos por revolución y emplea un imán permanente cilíndrico como rotor (figura 5).

Uno de los inconvenientes que se observaron fue la temperatura que alcanza el dispositivo después de trabajar cierto tiempo. Por ejemplo, después de aproximadamente 5 minutos de trabajo se alcanza una temperatura cercana a los

60°C , lo cual puede llevarnos a que el dispositivo se queme o a que simplemente sus componentes tengan una vida útil muy corta.

Sobre la temperatura. El ferromagnetismo de los materiales desaparece cerca de la temperatura *Curie*. La capacidad de autoalineamiento de los dipolos, gradualmente va desapareciendo conforme la temperatura aumenta, porque el incremento de energía de las vibraciones térmicas desalinea a los dipolos. Una posibilidad de evitar estos problemas es utilizar imanes permanentes tratados que operan a altas temperaturas. La desventaja es el alto costo de estos materiales, relacionados con sus procesos de producción, como son el sinterizado, la homogenización, etc. [7 y 8].

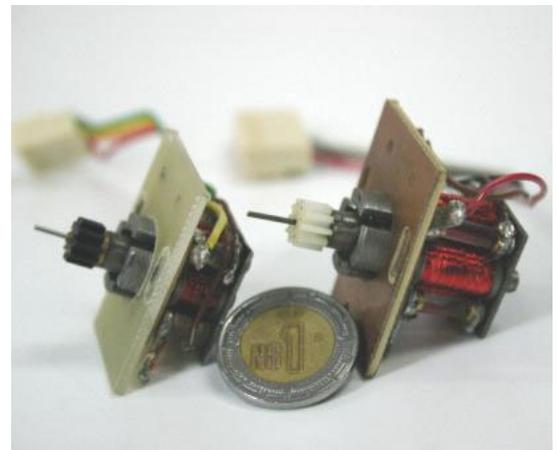


Figura 5. Micromotores con diferentes rotores y estatores.

Modificaciones al Diseño y Soluciones

Para resolver estos problemas se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se construyó un nuevo micromotor con características semejantes a los previos, pero con un aumento en su tamaño para alojar bobinas con casi el doble de resistencia ($\sim 20\Omega$), y se aumentó el diámetro de los núcleos, ensanchando con ello al estator. La temperatura de operación de este micromotor fue menor a la del prototipo previo ($\sim 30^\circ\text{C}$).
- Se utilizan rotores que requieren de un menor trabajo de manufactura (limado) sobre el imán permanente para no minimizar las propiedades magnéticas, la paciencia con la que se lleve a cabo este limado para dar la forma adecuada al imán evitará el calentamiento excesivo; por ello, se utilizará un rotor que no implique tanto trabajo sobre el imán y lo mantenga casi como se obtiene. En la figura 5 se muestran el primer prototipo de micromotor (izq.) y el segundo prototipo (der.), que resultó más adecuado para la actuación del módulo.

El diseño y la manufactura se realizan con ayuda de sistemas computacionales, sin descartar el uso de herramienta convencional, con el cuidado de cumplir las especificaciones de diseño y la calidad de los componentes.

En este momento estamos terminando de ensamblar estos módulos (figura 6) a la MMH, y ya hemos comenzado con la última etapa de diseño y manufactura de la misma (módulo de sujeción de materia prima con alimentación automática).

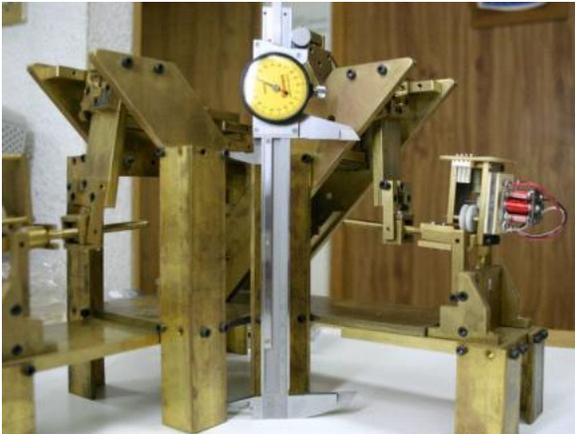


Figura 6. Segundo prototipo de MMH con los módulos de actuación.

5. MÓDULO DE SUJECIÓN

En las guías de diseño mencionadas, junto con el punto propuesto en este trabajo, se recomienda utilizar piezas que puedan emplearse en diferentes partes de la MMH, y en este caso es una prioridad mantener concéntrica la pieza a maquinar. Para la automatización del sistema de cierre se consideran barras de latón de $\phi 1/8''$ y $\phi 1/16''$, procurando garantizar que los elementos del módulo permitan el escalamiento generacional. Por ello se ha decidido utilizar elementos simples, como los *collets* o collares, que cumplen con dichas necesidades.

Si se pensara en la alternativa de poder maquinar cualquier pieza en un rango de $30\mu\text{m}$ a 4 mm , el sistema tendría características de sujeción general como la universalidad en las piezas de trabajo. Para nuestro propósito se opta por combinar algunas características de los collares con la estructura de transmisión que controlará su actuación. La función modular principal es:

El módulo de sujeción debe ser un dispositivo utilizado para posicionar y sujetar una pieza de trabajo o una herramienta y una contra parte (porta-herramientas o porta-piezas) para llevar a cabo alguna operación de manufactura de manera automática en coordinación con el control del módulo de actuación de la MMH.

Debido a que no existe una gran variedad de barras

comerciales entre $30\mu\text{m}$ y 4 mm , las ventajas de utilizar un *collet* se dan en la automatización del módulo y no tanto en la versatilidad de su sujeción o en la precisión en la concentricidad que pueda ofrecer.

El tipo de collares que proponemos utilizar mantienen las piezas concéntricas al eje de revolución, aunque pierde precisión con piezas demasiado largas (dispuestas en *cantilever*), esto no es un problema significativo ya que nuestra razón de operación común es 5:1 (ϕ de la pieza / largo de la pieza). Estos elementos tienen una geometría simple, adaptable al control automático y su capacidad de concentricidad depende de la precisión con que este dispositivo se manufacture.



Figura 7. Collar. Dispositivo de sujeción utilizado en la primera MMH de primera generación.

Este dispositivo (figura 7), es una especie de manguito ranurado, cónico en su parte externa, que ajusta en la entrada del mandril, sujetando las piezas de trabajo o pequeñas herramientas circulares. La parte sustancial de este diseño es la disposición en la MMH, por lo que se han comenzado a realizar modelos en CAD (figuras 8, 9 y 10) para su óptima distribución y ensamble. Esto, seguramente, seguirá retroalimentando cambios en el diseño.

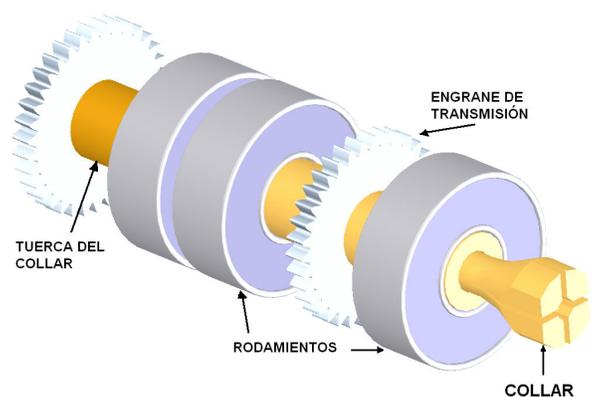


Figura 8. Detalle en CAD del eje de revolución con el collar de sujeción.

Dentro de los elementos a considerar en la automatización del módulo se incluye la manera de revolucionar el collar de forma independiente al mandril, esto con el objetivo de abrir y cerrar la boquilla para dar avance a la barra de trabajo. El

mandril del collar se acoplará mecánicamente mediante un engrane de transmisión o algún otro dispositivo funcional a un módulo de actuación. De manera semejante la tuerca, que es la contra del collar (mostrada en forma de T en la figura 7), o bien el propio collar deberán acoplarse a un módulo de actuación para lograr controlar el cierre y la apertura automáticamente (figuras 8 y 9).

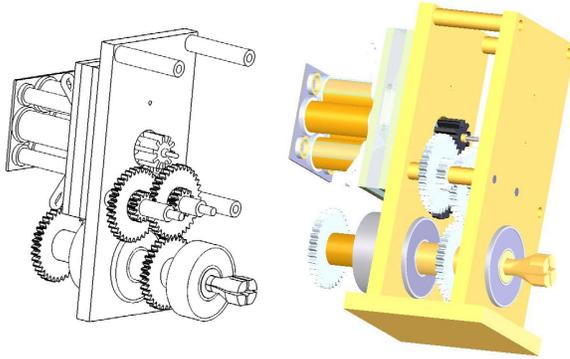


Figura 9. Primeras configuraciones en CAD del módulo de sujeción.

Es importante enfatizar que las alternativas de diseño, conforme se analizan los parámetros, las especificaciones y los recursos, modifican las configuraciones y disposiciones de los elementos funcionales dentro de los prototipos modulares, pero ello enriquece la perspectiva de integración de los diferentes sistemas de la MMH.

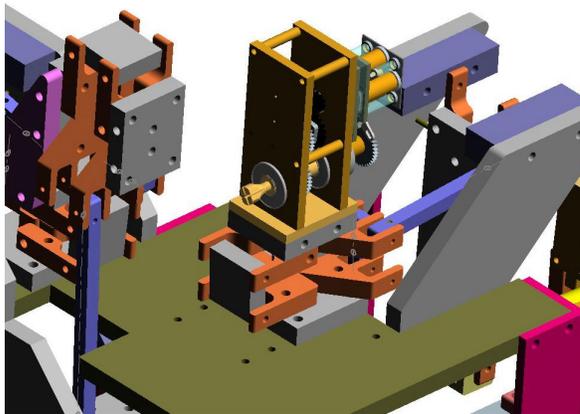


Figura 10. Detalle en CAD de las configuraciones de prueba en el espacio de trabajo de la MMH.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se proporciona una aportación al diseño de microequipo mediante sistemas modulares, tomando como caso de estudio algunos elementos de un microcentro de maquinado. La idea básica de dichas implementaciones descansa en la experiencia del LMM del CCADET en el desarrollo de microequipo automatizado.

Las configuraciones modulares en el desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo encuentran su lugar en la integrabilidad de los sistemas y en la optimización de recursos para su desempeño, es por ello que se ha mostrado el trabajo que se realiza en torno a dichas vertientes tecnológicas.

Es importante señalar que el uso de sistemas CAD, como los modeladores de sólidos, es una herramienta importante para el diseño mecánico al momento de establecer configuraciones, permitiendo optimizar los tiempos de desarrollo y planificar de una mejor manera la manufactura de los prototipos.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es apoyado por el PAPIIT a través de su proyecto IN112102 y por el CONACyT a través de sus proyectos 339944-U y 39395-A (con apoyo de la NSF). Un agradecimiento muy especial a los miembros del LMM del CCADET, UNAM, por sus invaluable consejos y apoyo para realizar este trabajo.

8. REFERENCIAS

- [1] Santilli, R. (1995). "Will Microengineering Affect Your Business?" en *Computing and Control Engineering Journal*, Abril, pp. 93-98.
- [2] Wilson, J. R. (2003). "Major New Thrust for MEMS Engine" en *Aerospace America Magazine*, Febrero, pp. 34-38
- [3] Kussul, E., Rachkovskij, D., Baidyk, T. y Talayev, S. (1996). "Micromechanical Engineering: A Basis for the Low Cost Manufacturing of Mechanical Microdevices Using Microequipment" en *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 410-425.
- [4] Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., y Kasatkina, L. (2002). "Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories" en *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, pp. 1-18.
- [5] Ruiz-Huerta, L., Kussul, E., Caballero-Ruiz, A. (2002). "Guidelines for Low Cost Micromechanics". ASPE XVII Annual Meeting, v. 27, pp. 228-233.
- [6] Muñoz Leines, C.A., Santos Carrasco, C.A. (2003). *Empleo de FPGA's para el Sistema de Control de Motores de Pasos Bimodales en Micromecánica*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Eléctrica Electrónica). Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [7] Matthias, T. et al. (2002). "Sm(Co,Fe,Cu,Zr)_z Magnets for High Temperature Applications: Microstructural and Micromagnetic Analysis" en *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, Septiembre, pp. 2943-2945.
- [8] Main Scientific Results. (2000). *k ational Institute of Materials Physics*. Laboratory of Oxidic Materials // Annual Report.