



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERIA MECÁNICA E  
INDUSTRIAL

***“APLICACIÓN DE SISTEMAS CAD  
Y CAM PARA EL DESARROLLO  
DE UNA MICROMÁQUINA  
HERRAMIENTA”***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO  
PRESENTA:  
**GERMÁN HERRERA GRANADOS**



DIRIGIDA POR:  
**DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA  
DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ**

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



*Este trabajo fue realizado en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta y del Dr. Alberto Caballero Ruiz. Apoyado por CONACYT a través de sus proyectos 52416-Y, 2005-C02-51843/A-1 y 50231.*

# ***AGRADECIMIENTOS***

*A mi mamá Rosa...*

Por todo tu amor, apoyo y comprensión, no se como pagarte todo lo que haces por mía día con día. Lo logramos.

*A mi papá Reynaldo...*

Por darme un ejemplo de responsabilidad en el trabajo, por todo tu cariño y apoyo, por estar ahí. Ese trabajo es tuyo también.

*A mi hermana Claudia...*

Por el ejemplo de vida y superación que me has dejado, por tu cariño, tu comprensión y regaños.

*A mi hermano Oscar...*

Por darme un gran ejemplo de lucha y perseverancia, gracias por todo tu cariño, apoyo y confianza.

*... familia Herrera Granados lo logramos de nuevo...*

*A la familia Herrera y a la familia Granados...*

Gracias por sus consejos, cariño y apoyo. Espero que sigamos superándonos.

*A Ares...*

Por todo tu apoyo, amor y comprensión, por estar aquí, no tengo palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mi linda.

*A Toño...*

Gracias por todo hermano, pues a lo largo de la carrera y a la fecha eres mi mejor amigo y compañero. Espero que todo siga siendo así.

*A mis amigos, Fernando, Misael, Ian, Eder, Ale, Jaz, Jorge, Miriam...*  
Y a todos mis amigos de la Facultad de Ingeniería. Por su apoyo y motivación. Gracias también por todos los momentos que compartieron conmigo. Les deseo todo el éxito del mundo.

*A Ariadna y Xitlally...*

*Ari*, en memoria de tu cariño y apoyo, espero que donde te encuentres estés orgullosa de mí, fuiste una mujer excepcional. *Schickie*, gracias por tu cariño, apoyo y ejemplo, eres una gran mujer.

*A mis amigos del GMM...*

A *Héctor y Angy*, gracias por su amistad, comprensión y apoyo, por ayudarme siempre. A *Bogar, Oscar, Paul, Daniela, a los Jorges, Oscarin, Javier, Gengis, Luis, Tere, Gerardo, Miguel y los demás...* gracias por enseñarme que la estancia en un laboratorio puede ser muy divertida.

*Al resto de mis amigos...*

*Adriana, Gaby, Jaz, Sergio, Tamara, Nahue, Naty, Ángel, Lalo*, gracias por todo su apoyo, amistad y consejos, y gracias también a todos aquellos que, en estos últimos días, me han motivado a seguir adelante con este trabajo de tesis. Gracias también por contribuir en mi formación personal.

*Al Dr. Leopoldo Ruiz Huerta...*

Por tu apoyo, confianza, por tus consejos y principalmente por tu amistad. Espero no haberte decepcionado y gracias por dejarme ser parte de este gran equipo de trabajo, y por enseñarme tanto de autos. Gracias Polo.

*Al Dr. Alberto Caballero Ruiz...*

Por tu amistad y apoyo, por los consejos que me das. Por las divertidas charlas que tuvimos de futbol y de autos. Gracias Beto.

*Al Dr. Ernst Kussul...*

*A la Dra. Baydik, a la Dra. Graciela Velasco, al Sr. Mario Rodríguez, al Dr. Gabriel Ascanio,* por ser parte de este gran equipo. Agradezco al GMM y al CCADET por todo su apoyo.

*A mis sinodales...*

Dr. Ernst Kussul

Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Dr. Leopoldo González González

Dr. Jesús Manuel Dorador González

M.I. Eduardo Garduño García

Gracias por las correcciones, comentarios y aportaciones a este trabajo y a mi formación profesional.

*A aquellos que he omitido...*

No por descortesía sino por falta de espacio. Gracias por contribuir o al menos no interferir en el desarrollo de este trabajo.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México...*

Me siento muy feliz de ser parte de esta gran institución, de la mejor universidad de este país, gracias por complementar la educación que he recibido de mi familia y de la formación académica a lo largo de mi vida y gracias por darme la oportunidad de ver desde otra perspectiva al mundo y a mi país.

*A la Facultad de Ingeniería...*

Y a todos mis profesores, ya que gracias a los conocimientos que compartieron conmigo, me encuentro en este punto de mi vida. Gracias querida FI.

*Y finalmente, gracias a Dios...*

**GERMÁN HERRERA GRANADOS**

# ***ÍNDICE***

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	4
1.1 DESARROLLO DE LA MICROMECAÁNICA EN EL MUNDO	7
1.1.1 MICROMÁQUINAS Y MICROFÁBRICAS	9
1.2 DESARROLLO DE LA MICROMECAÁNICA EN MÉXICO	12
1.3 BENEFICIOS DE HACER MICROEQUIPO PARA CÉLULAS DE MANUFACTURA	16
2. OBJETIVO Y MARCO TEÓRICO	17
2.1 OBJETIVO	17
2.2 ALCANCES DEL TRABAJO	17
2.3 MARCO TEÓRICO	18
2.3.1 ¿COMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?	18
2.3.2 MICROCENTRO DE MAQUINADO	19
2.3.3 BENEFICIOS DE HACER MICROCENTROS DE MAQUINADO DE BAJO COSTO	21
2.4 PRIMER PROTOTIPO DE MICROMÁQUINA HERRAMIENTA DESARROLLADA EN MÉXICO	22
2.5 SISTEMAS CAD Y CAM	22
3. DESARROLLO	25
3.1 ANÁLISIS	25
3.1.1 NECESIDADES	25
3.1.2 RECURSOS	26
3.1.3 GUÍAS DE DISEÑO	27
3.1.4 REQUERIMIENTOS	28
3.1.5 ESPECIFICACIONES	29



3.2 DISEÑO CONCEPTUAL	29
3.2.1 CONSIDERACIONES	32
3.3 MATERIAL	32
3.4 HERRAMIENTAS	33
3.5 DISEÑO DE DETALLE	34
3.5.1 FUNCIÓN SOPORTE: BASTIDOR	35
3.5.2 FUNCIÓN MOVIMIENTO LINEAL: EJES DE TRANSLACIÓN	37
3.5.3 FUNCIÓN DE ESTRUCTURA MÓVIL	39
3.5.4 FUNCIÓN DE TRANSMISIÓN	40
3.5.5 FUNCIÓN DE POTENCIA: MOTORES	43
3.5.6 FUNCIÓN DE SUJECCIÓN DE HERRAMIENTA O MATERIAL	44
3.5.7 FUNCIÓN DE CONTROL: SISTEMA DE CONTROL	44
3.5.8 RETROALIMENTACIÓN DE LA MICROMÁQUINA	45
3.6 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)	46
3.7 MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)	48
3.8 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	52
4. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS	59
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO	59
4.2 PRUEBAS	62
4.3 COSTOS	63
CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	66
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS	68
ANEXOS	73

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIG. 1.1	IMÁGENES DE MECANISMOS DESARROLLADOS EMPLEANDO TECNOLOGÍAS MICROELECTRÓNICAS	5
FIG. 1.2	DESARROLLO DE LA MICROMECAÁNICA POR EL GMM	6
FIG. 1.3	MICROROBOT COMO AYUDANTE QUIRÚRGICO	7
	EJEMPLOS DE MICROEQUIPO	
	A) MICROMÁQUINA PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS	
	B) MICROROBOT DE INSPECCIÓN	
FIG. 1.4	C) MICROROBOT VOLADOR	8
	D) MICROMOTOR ECF	
	E) MICROROBOT DE 6 EJES CINEMÁTICOS PARALELOS	
	F) MICROGRIPPER PARA MICROPIEZAS	
FIG. 1.5	DISEÑOS CONCEPTUALES DE UNA MICROFÁBRICA	10
FIG. 1.6	1ERA. MICROFÁBRICA SOBRE MESA TOTALMENTE AUTOMATIZADA	10
FIG. 1.7	DISPOSITIVO MICROMECAÁNICO (RODAMIENTO) DESARROLLADO EN LA MICROFÁBRICA.	11
	A) MICROTORNO JAPONÉS	
FIG. 1.8	B) MICROCENTRO DE MAQUINADO UCRANIANO	11
	C) MICROFRESADORA JAPONESA	
	A) PRIMER PROTOTIPO DE MICROMÁQUINA HERRAMIENTA DESARROLLADO EN MÉXICO	
FIG. 1.9	B) TRAYECTORIA DE UN ENGRANE REALIZADO EN ESTE PROTOTIPO	13
	A) SEGUNDO PROTOTIPO DE LA PRIMERA GENERACIÓN DE MICROMÁQUINAS HERRAMIENTA	
FIG. 1.10	B) PRIMER PROTOTIPO DE LA SEGUNDA GENERACIÓN DE MICROMÁQUINAS HERRAMIENTA BASADAS EN BARRAS Y PARALELOGRAMOS	15
	A) CARRO MONTADO SOBRE BARRAS PARALELAS, DESPLAZAMIENTO LINEAL	
FIG. 2.1	B) MECANISMO DE PALANCAS Y PARALELOGRAMOS, DESPLAZAMIENTO SEMICIRCULAR	21
FIG. 3.1	CONFIGURACIÓN DE LA MMH DESARROLLADA EN MÉXICO	30
FIG. 3.2	DIAGRAMA DEL DISEÑO A SEGUIR	31
TABLA 3.1	MATERIALES INVOLUCRADOS PARA LA MANUFACTURA DE LA MMH	34

TABLA 3.2	HERRAMIENTAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA MMH	
FIG. 3.3	BASTIDOR PARA LA NUEVA VERSIÓN DE LA MMH	36
TABLA 3.3	DIFERENCIAS EN EL BASTIDOR, ENTRE EL PROTOTIPO Y LA PROPUESTA REALIZADA	36
FIG. 3.4	ENSAMBLE DE GUÍAS Y CARROS PARA LA NUEVA VERSIÓN DE MMH	38
FIG. 3.5	ARREGLO DE EJES TRASLACIONALES PARA EL MICROCENTRO DE MAQUINADO	38
TABLA 3.4	DIFERENCIAS EN LOS EJES TRASLACIONALES DEL PROTOTIPO Y LA PROPUESTA REALIZADA	39
FIG. 3.6	ESTRUCTURA MÓVIL PARA LA NUEVA VERSIÓN DE MMH	40
TABLA 3.5	DIFERENCIAS EN LA ESTRUCTURA MÓVIL, ENTRE EL PROTOTIPO Y LA PROPUESTA REALIZADA	40
FIG. 3.7	MÓDULO DE REDUCCIÓN PARA LA TRANSMISIÓN EN LOS EJES TRASLACIONALES	42
TABLA 3.6	DIFERENCIAS EN LA TRANSMISIÓN DEL PROTOTIPO YA CONSTRUIDO Y LA PROPUESTA REALIZADA	42
FIG. 3.8	MOTOR PROPUESTO PARA SU IMPLEMENTACIÓN	43
FIG. 3.9	SISTEMA DE SUJECIÓN PARA OPERACIONES DE REVOLUCIÓN	44
FIG. 3.10	ENSAMBLE EN CAD DE LA MICROMÁQUINA HERRAMIENTA	48
FIG. 3.11	PRUEBAS PARA OBTENER LA MEDIDA CORRECTA PARA EL ENSAMBLE DE LAS GUÍAS DE LOS CARROS	49
FIG. 3.12	EXPORTACIÓN DE CAD A CAM Y GENERACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DECORTE	50
FIG. 3.13	EXPORTACIÓN DE CAD A CAM DE VARIAS PIEZAS PARA SU MANUFACTURA (CAMAS DE MANUFACTURA)	51
FIG. 3.14	MÁQUINA DE CNC EMPLEADA PARA LA MANUFACTURA DEL MICROEQUIPO	53
FIG. 3.15	MANUFACTURA DE ALGUNAS PIEZAS DE LA MICROMÁQUINA	53
FIG. 3.16	MANUFACTURA Y ENSAMBLE DE LOS ENGRANES	54
FIG. 3.17	ALGUNAS PIEZAS FABRICADAS CON MÁQUINAS CONVENCIONALES	55
FIG. 3.18	MODIFICACIONES A LOS EJES DESPUÉS DE HABER REALIZADO LA MANUFACTURA	56
FIG. 3.19	MODIFICACIONES A LOS CARROS DESPUÉS DE HABER REALIZADO LA MANUFACTURA	57
FIG. 3.20	MODIFICACIONES AL EJE ROTACIONAL DESPUÉS DE LA MANUFACTURA	57

FIG. 3.21	COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO EN CAD Y EL PROTOTIPO REAL	58
FIG. 4.1	PROTOTIPO MANUFACTURADO	60
FIG. 4.2	CAVIDAD PARA QUE LOS SENSORES SE ALOJEN DENTRO DE LA MICROMÁQUINA	61
FIG. 4.3	MÓDULO DE TRANSMISIÓN Y MOTOR	62
TABLA 4.1	TIEMPO DE DESARROLLO DE NUEVAS MMH'S	64
TABLA 4.2	COSTO APROXIMADO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA MMH	65

## INTRODUCCIÓN

### **INTRODUCCIÓN**

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

La micromecánica se ha convertido en los últimos 25 años en un importante campo de estudio. Su desarrollo ha llevado a desarrollar sistemas compactos de alta eficiencia, bajo consumo de espacio y consumo energético aminorado. Los resultados que se pueden obtener al investigar más sobre este tema representan un enorme paso en el desarrollo de la humanidad, así como una amplia gama de aplicaciones que se les puede dar [1].

Actualmente, la micromecánica tiene diversas aplicaciones tanto en la industria como en la investigación, tal es el caso de la medicina, agricultura, biotecnología, industria química, aeroespacial, de construcción, etc. Ejemplos de esto se ven reflejados en la producción de cosas pequeñas como tornillos para lentes y relojes, entre otros objetos; reducir el tamaño de sistemas que ya existen, como los intercambiadores de calor de los radiadores de los automóviles, refrigeradores o sistemas de aire acondicionado; también en la medicina para el desarrollo de pequeños dispositivos para cirugía no agresiva, etc [2].

Así pues, el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM), del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), tiene como principal línea de investigación la de desarrollar microequipo de bajo costo. Este grupo ha desarrollado y probado algunos prototipos correspondientes a una nueva tecnología en la producción de micropartes, basada principalmente en micromáquinas herramienta (MMH's) y dispositivos de microensamble generacionales, donde cada generación es desarrollada con ayuda de la anterior [5].

Para la generación de micromecánica existen, al momento de escribir este trabajo, una gran cantidad de técnicas, teniendo cada una de ellas sus propias ventajas e inconvenientes. Por tal motivo, se propone en el GMM, una alternativa para el desarrollo de microequipo de bajo costo, utilizando los antecedentes que se tienen del tema, así como la nueva infraestructura con la que se cuenta.

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

En el primer capítulo se tratan los antecedentes relacionados con el desarrollo de la micromecánica, incluyendo el estado del arte nacional e internacional existente al momento de realizar este trabajo

En el segundo capítulo se plantea el objetivo y las metas, así como el alcance de este trabajo. También se expone el marco teórico propuesto para el desarrollo de este tema de tesis.

En el capítulo tercero, se describen las actividades realizadas para el desarrollo de un prototipo de microcentro de maquinado empleando sistemas CAD y CAM.

En el capítulo cuarto, se describen los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo. Se describe el equipo construido y se muestran imágenes del

mismo. También se presenta una tabla de tiempos de desarrollo de futuras micromáquinas herramienta, empelando el trabajo propuesto en esta tesis.

Por último, en las conclusiones y recomendaciones, se analizan los resultados obtenidos del proyecto, y se proponen diferentes alternativas para la continuación de esta línea de trabajo enfocada al desarrollo de microequipo.

A graphic consisting of a grey square. At the top, the word "CAPÍTULO" is written in a white, italicized, sans-serif font. Below it, the number "1" is written in a large, white, sans-serif font.

## ***ANTECEDENTES***

*En este capítulo se establece el estado del arte al momento de elaborar este trabajo. Así mismo se plantean los fundamentos y principios de las técnicas convencionalmente usadas para el desarrollo de microequipo.*

A nivel mundial, en el ámbito de la mecánica, se aprecia una tendencia en el desarrollo de nuevas tecnologías enfocadas a la miniaturización, debido a que en diferentes campos industriales se ha hecho necesaria la fabricación de microdispositivos [19].

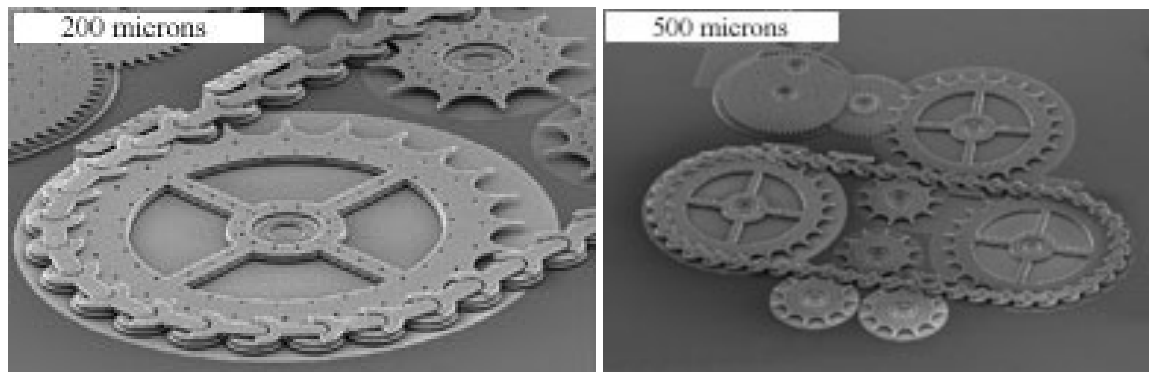
Ejemplo de estas tecnologías son los MicroElectroMechanical Systems (MEMS), desarrollados principalmente en los Estados Unidos de América, los MycroSystems Technology (MST), cuyo mayor auge está en los países europeos; y por último los MicroMachine Technology (MMT), en Japón [5].

Para la generación de micromecánica existe una gran cantidad de técnicas. Varias de estas técnicas, las cuales pueden ser agrupadas dentro de dos rangos: el primero de ellos se refiere a producción de piezas de manera individual, y las segundas se refieren a procesos aplicados a lotes o grandes volúmenes de producción [4].



Los procesos de manera individual, incluyen técnicas como: oxidación térmica, depósito por vapores químicos, evaporación y Sputtering, fotolitografía, micromaquinados por arranque de material, etc.; mientras que las técnicas por lotes o volumen involucran procesos de depósito de material como: LIGA (Litographie-Galvanoformung-Abformung), contorneado anódico, etc [1].

El principal interés en el desarrollo de nuevas tecnologías para la fabricación de elementos micromecánicos, obedece a las restricciones causadas por los materiales y la geometría de las piezas [1]. La tecnología empleada en microelectrónica, como la utilizada en los MEMS (Figura 1.1), permite crear dispositivos de bajas dimensiones con componentes mecánicos simples, sin embargo estos dispositivos poseen prácticamente dos dimensiones debido a su espesor [2].



*Figura 1.1 Imágenes de mecanismos desarrollados empleando tecnologías microelectrónicas*

Sin embargo, el desarrollo de sistemas micromecánicos más elaborados, como las micromáquinas herramienta, los micromanipuladores y los microrobots, requieren de estructuras mecánicas con las siguientes características [5]:

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

Lo anterior nos hace apreciar que se debe buscar otro camino para la construcción de microdispositivos más complejos.

Enfocándose al uso de tecnologías mecánicas convencionales para generar micromecanismos, cuando deseamos obtener las tolerancias requeridas, se tienen dos alternativas a seguir: la primera es emplear máquinas superprecisas [15], que desafortunadamente, para aplicación comercial no es recomendable debido a que su costo es sumamente elevado; y la segunda es disminuir el tamaño de las máquinas herramienta y manipuladores involucrados en el proceso de producción de los microdispositivos, logrando con esto, bajos costos de producción de dispositivos comerciales [2]. Esto último se puede observar en la figura 1.2.

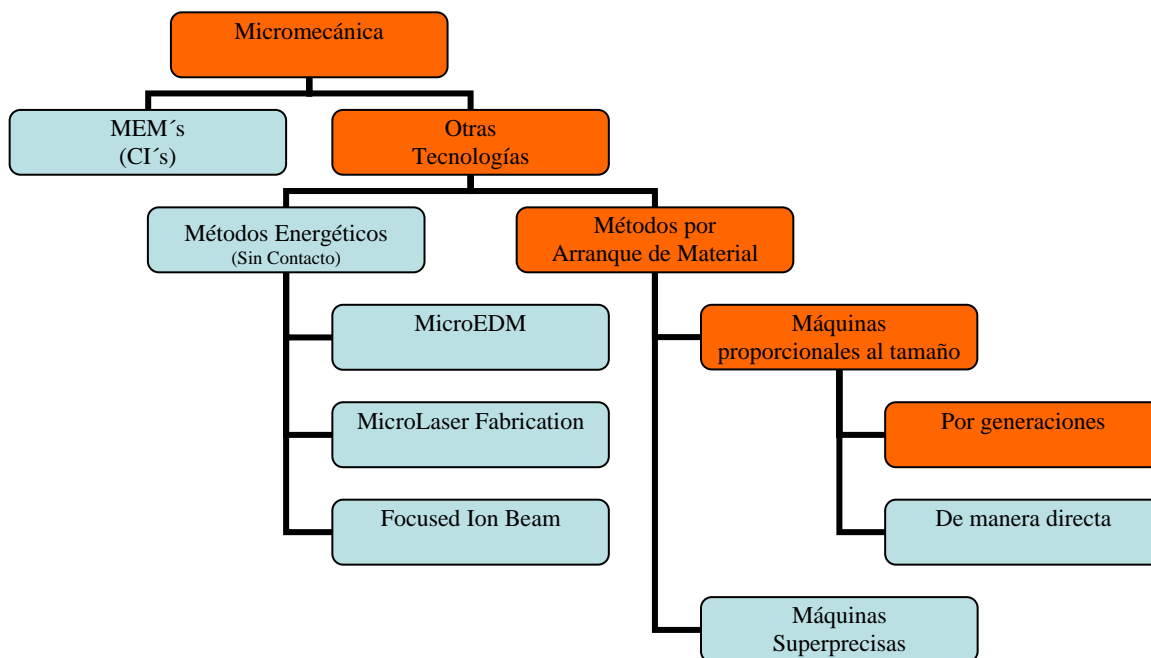


Figura 1.2 Desarrollo de la micromecánica por el GMM [13]

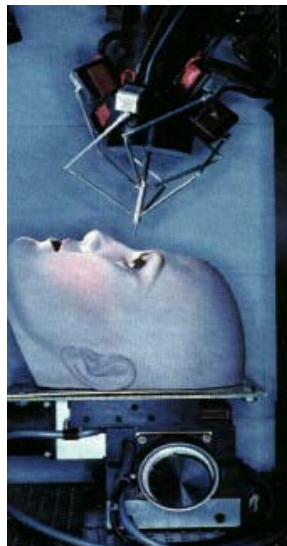
En la figura 1.2 se puede observar el camino que el GMM ha seguido desde el año 1999 para el desarrollo de microequipo. Como se mencionó anteriormente, el GMM tiene como principal línea de investigación el desarrollo de microequipo de bajo costo y para lograrlo, se decidió tomar el camino de las máquinas proporcionales a la pieza de trabajo.

Esta última decisión se basa en el método conocido como Tecnología de Microequipo (MET, por sus siglas en inglés), el cual consiste en realizar microdispositivos generacionales; es decir, se desarrollan máquinas que posteriormente se utilizarán para el desarrollo de nuevas generaciones subsecuentes de menor tamaño [5].

## ***1.1 DESARROLLO DE LA MICROMECAÁNICA EN EL MUNDO***

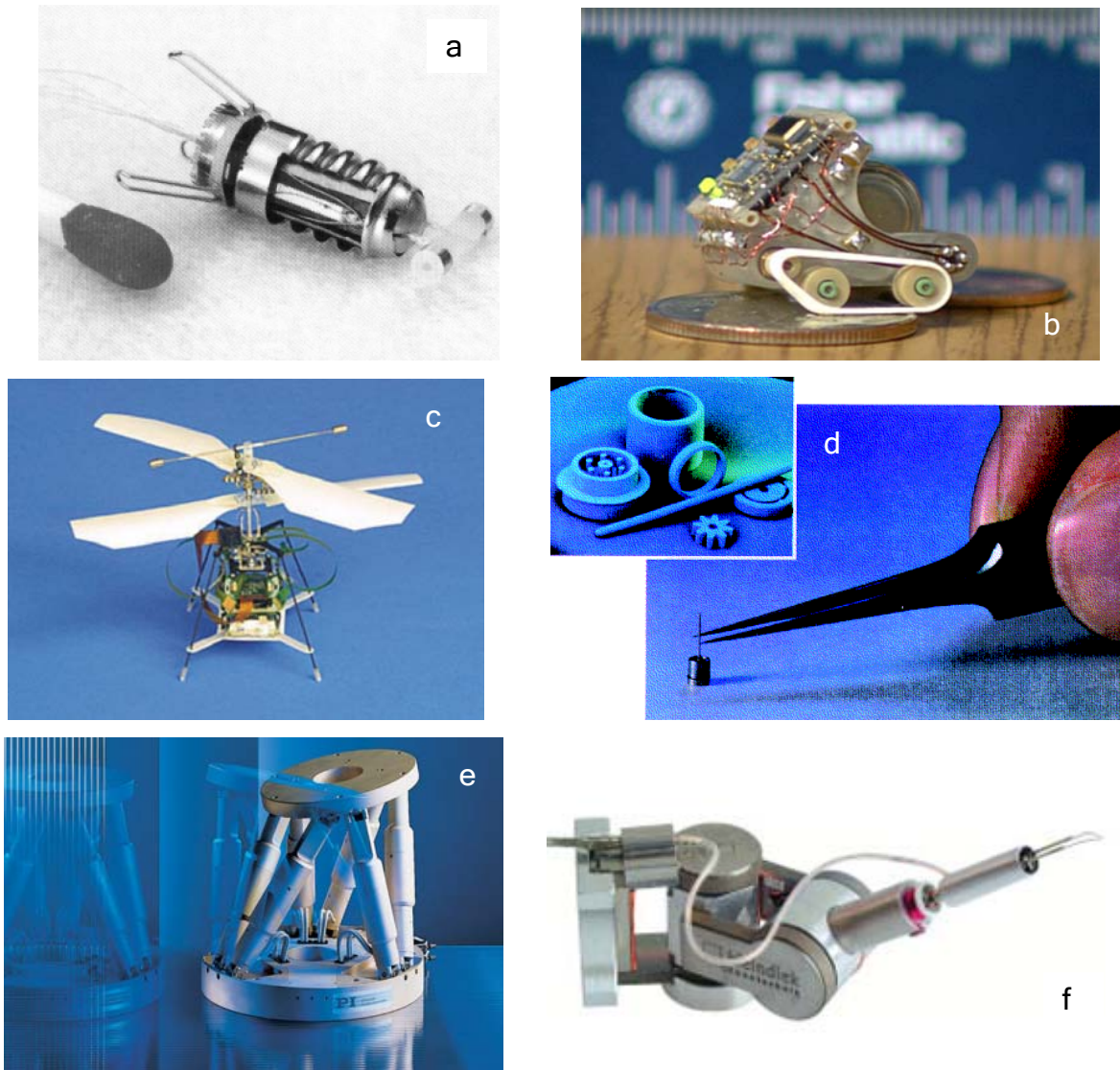
El auge del desarrollo de estos dispositivos se inició a mediados de los 80's, desde entonces ha tenido un fuerte impacto en muy diversas áreas en el ámbito científico e industrial, tal es el caso de la medicina, agricultura, biotecnología, la industria química, aeroespacial, de la construcción, generación de energía, etc [5].

Dentro del campo médico la demanda de microequipo aumenta con aplicaciones en: microscopia, diagnóstico, intervenciones quirúrgicas poco agresivas, tratamientos, etc. La reducción en el tamaño de los instrumentos permite inspeccionar las partes internas del cuerpo humano reduciendo los posibles daños a éste, así mismo, eleva la precisión y la eficiencia en diagnósticos [2]. En la figura 1.3 se puede observar el diseño conceptual de un robot ayudante quirúrgico [23].



*Figura 1.3 Microrobot como ayudante quirúrgico*

Existen en la industria diversas aplicaciones realizadas con sistemas micromecánicos como los de la figura 1.4. Ejemplos de algunos de estos son pequeños robots de mantenimiento para inspección y reparación de lugares estrechos y/o inaccesibles [6]. Los microrobots tienen muchos usos potenciales, por ejemplo, su uso para el trabajo en lugares inseguros para los humanos, en el espacio y hasta en operaciones militares [24]. En la figura 1.4 podemos observar diferentes aplicaciones de la micromecánica.



*Figura 1.4 Ejemplos de microequipo: a) Micromaquina para inspección de tuberías b) Microrobot de inspección, c) Microrobot volador [24], d) Micromotor ECF [22], e) Microrobot de 6 ejes cinemáticos paralelos, f) Microgripper para micropiezas [21].*

### ***1.1.1 MICROMÁQUINAS Y MICROFÁBRICAS***

A lo largo del desarrollo de la micromecánica, se han derivado diversas definiciones de lo que es una micromáquina.

Una micromáquina es un sistema extremadamente pequeño (pocos milímetros o menos), con elementos altamente sofisticados y funcionales que le permiten realizar tareas muy complicadas y delicadas [J. Lee, 1996]. Por otro lado, a cualquier dispositivo producido mediante el ensamble de piezas funcionales extremadamente pequeñas en un rango de tamaño de 15 mm o menor, es llamado micromáquina [Iwao Fujimasa, 1997]. Finalmente el GMM concluyó que *las micromáquinas deben su nombre no sólo a su tamaño, sino también al tamaño de sus componentes y, ampliando la definición, al tamaño de las piezas con éstas fabricadas* [3].

Otro campo de aplicación importante es la manufactura de pequeños productos industriales. En estos casos la energía consumida con este tipo de máquinas disminuye de forma considerable. Recientemente se emplean varias tecnologías para manufacturar componentes mecánicos de dimensiones pequeñas (decenas de micrómetros), para la construcción de motores y actuadores de bajas dimensiones. La integración de estos sistemas con fines de producción es llamada microfábrica o fábrica sobre mesa [2]. En la figura 1.5, se muestran algunos diseños conceptuales de una microfábrica.

Las microfábricas tienen como ventajas [4]:

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

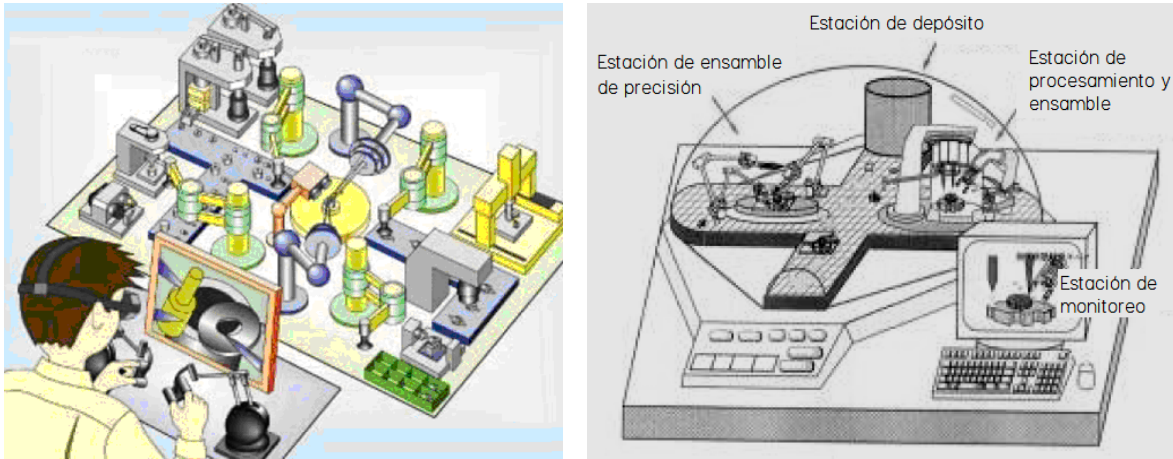


Figura 1.5 Diseños conceptuales de una microfábrica

En el año 2000, investigadores del *Mechanical Engineering Laboratory* del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*, en Japón, presentaron en el *2<sup>nd</sup> International Workshop on Microfactories* en Suiza, una microfábrica automatizada (figura 1.6). Este microcentro es capaz de producir los componentes de rodamientos miniatura. En la figura 1.7 se muestra el dispositivo mecánico desarrollado mediante un proceso automático en dicha microfábrica.

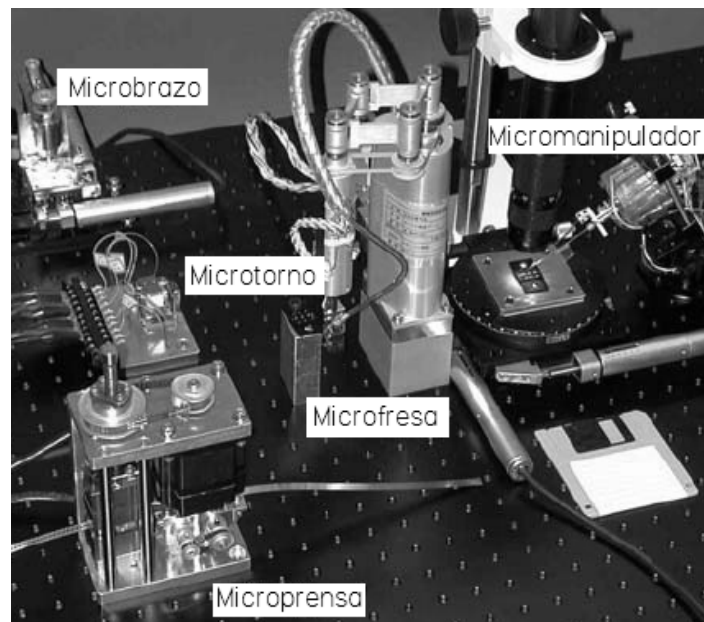


Figura 1.6 1era. Microfábrica sobre mesa totalmente automatizada [9] [1].

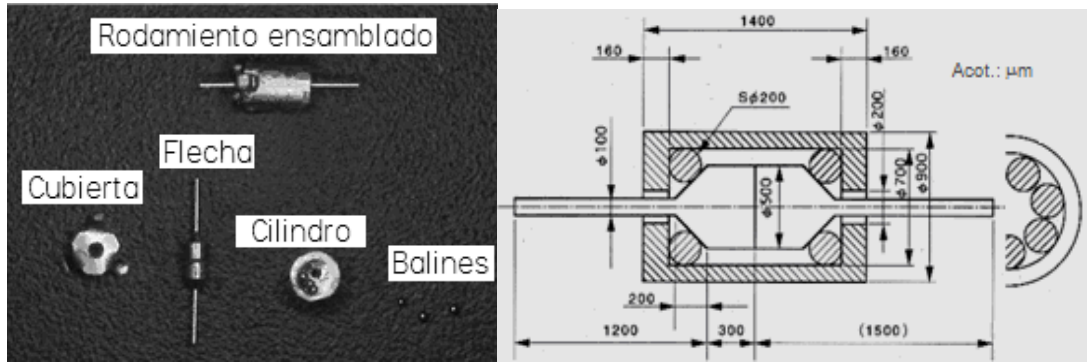


Figura 1.7 Dispositivo micromecánico (rodamiento) desarrollado en la microfábrica [9] [1]

En el ámbito de micromáquinas herramientas, poco a poco se ha ido aumentando el desarrollo de estas tecnologías. En la figura 1.8a se presenta un microtorno japonés desarrollado en 1996 en el *Mechanical Engineering Laboratory* del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*, de dimensiones 30 x 30 x 30 mm [7]. Un año más tarde, en *The International Research and Training Center of UNESCO/IIP of Information Technologies and Systems, National Academy of Science of Ukraine* se desarrolló un prototipo de microcentro de maquinado, cuya imagen se presenta en la figura 1.8b [5]. En la figura 1.8c, se muestra una microfresadora Japonesa desarrollada en el 2001 [9].

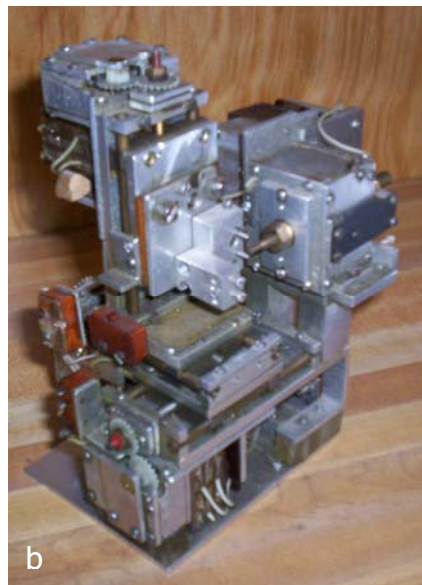


Figura 1.8 a) Microtorno Japonés, b) Microcentro de maquinado Ucraniano, c) Microfresadora japonesa

## ***1.2 DESARROLLO DE LA MICROMECAÁNICA EN MÉXICO***

En nuestro país, el GMM del CCADET, UNAM, es uno de los principales grupos que desarrollan dispositivos micromecánicos. Su principal objetivo es el de investigar y generar tecnología de punta para la fabricación de piezas con dimensiones inferiores al milímetro, para desarrollar tecnologías de producción totalmente automatizadas enfocadas al desarrollo de equipo e instrumentación de bajo costo y alta eficiencia [2].

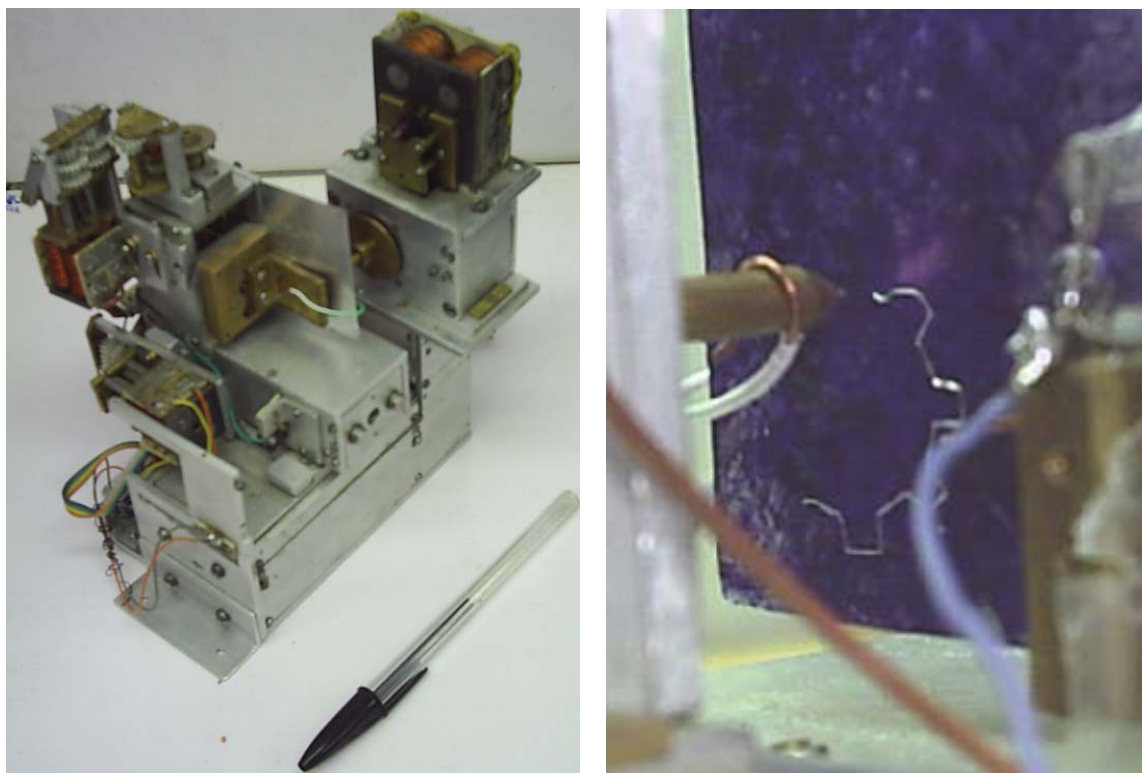
Para el GMM, el microequipo debe tener como principales requerimientos ser de bajas dimensiones, contar con una adecuada exactitud y una aceptable precisión [2]. Dichas características han sido conseguidas por diferentes grupos de investigadores en el mundo, sin embargo los costos asociados a dichos desarrollos son elevados, por lo que se considera de suma importancia el bajo costo para el desarrollo de microequipo [1]. En virtud de que los costos de las máquinas son elevados, éstos representan una importante carga financiera al momento de realizar producciones. Por tal motivo se identificó la necesidad de generar microequipo de bajo costo, de tal suerte que los valores agregados debido al desarrollo de la tecnología se vean aminorados.

En el año 2000, se desarrolló el primer prototipo mexicano de micromáquina herramienta, **manufacturado en su mayoría con herramientas de mano y máquinas herramientas convencionales**. Ese mismo año se presentó dicho prototipo en el *First International Conference on Mechatronics and Robotics*, en San Petersburgo, Rusia. Siendo este dispositivo el resultado más importante de dicho trabajo (Figura 1.9a). En la figura 1.9b se muestra el perfil de un engrane realizado por esta máquina.

Esta micromáquina herramienta tiene una configuración de microcentro de maquinado, cuenta con dimensiones de 130 x 160 x 85 mm, sin contar con las etapas de potencia y la fuente de alimentación eléctrica. Puede operar como torno,



fresadora y taladro, según el tipo de herramienta empleado y de la configuración bajo la que trabaje el equipo. Tiene una resolución de 1.87 micrómetros por paso de motor y es capaz de producir piezas dentro del rango de 50 micrómetros a 5 milímetros. Su sistema de movimiento está basado en carros montados sobre barras redondas paralelas sobre las que se desplazan linealmente, por medio de motores a pasos. El sistema de control se encuentra totalmente delegado a una computadora personal, mediante la conexión del microcentro de maquinado a ésta por medio de dos puertos paralelos. Por los puertos es enviada, de la PC a la micromáquina, la información de movimiento a los cuatro motores de pasos, mientras que de la micromáquina herramienta, la computadora recibe la información de posición de origen de los ejes traslacionales por medio de tres interruptores colocados en el inicio de desplazamiento de éstos. Actualmente, este dispositivo ya tiene un controlador capaz de reconocer códigos de control numérico comerciales mediante una aplicación realizada en Visual Basic [1].



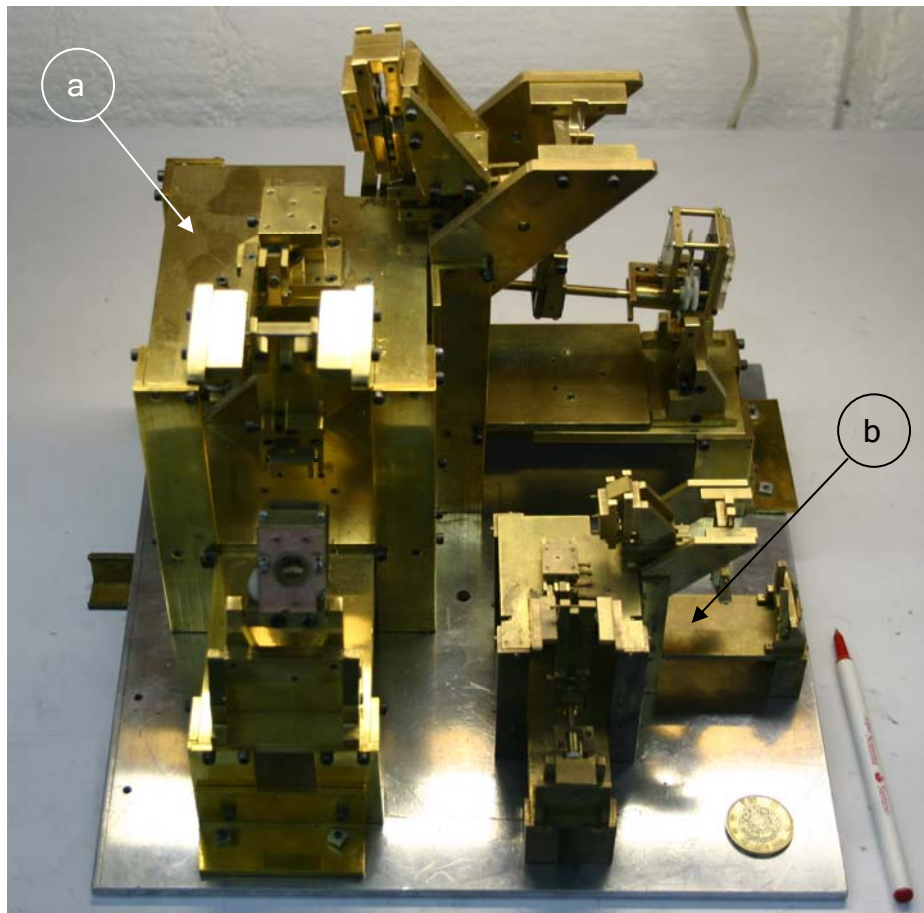
*Figura 1.9 a) Primer prototipo de micromáquina herramienta desarrollado en México, b) Trayectoria de un engrane realizado en este prototipo [18]*

Posteriormente, el GMM propuso el diseño de una nueva micromáquina herramienta; apoyándose en la experiencia obtenida con el desarrollo del prototipo anterior. El diseño de este nuevo prototipo está basado en tres ejes traslacionales y uno más rotacional, pero con la diferencia de que la configuración general de la micromáquina es a partir de barras y esferas que se unen para formar paralelogramos accionados por palancas, que en conjunto aumentan la rigidez, mejoran la resolución, y disminuyen el juego mecánico entre elementos [11].

Otra importante diferencia entre los dos prototipos radica en la integración de diseño modular al segundo prototipo de micromáquina herramienta (Figura 1.10a), es decir, la integración de subsistemas o módulos que permiten la ejecución de funciones específicas [11].

Las dimensiones de este prototipo son de 236 x 257 x 240 mm, se encuentra principalmente construido en latón. Cuenta con 4 grados de libertad, tres de ellos de translación, con un desplazamiento aproximado de 5 milímetros, y un eje rotacional. Tiene implementados sensores en el inicio y fin de carrera. Cuenta con una resolución verificada de 596 nanómetros por paso del motor. Como se mencionó anteriormente, se integró un mecanismo de paralelogramo de cuatro barras para operar el movimiento de los ejes (movimiento semicircular). El control se encuentra totalmente delegado a una computadora personal, apoyando la comunicación máquina - PC con un microcontrolador PIC. Esta interfaz es capaz de controlar hasta 8 motores, lo que permitiría que con una sola PC, se puedan controlar en un futuro más de una micromáquina herramienta u otros dispositivos que conformen una microfábrica sobre mesa [2].

Recientemente, se construyó el primer prototipo de la segunda generación de micromáquinas herramienta basadas en barras y paralelogramos (figura 1.10b). Esta versión es un escalamiento uno a dos del prototipo de la 1ra. generación.



*Figura 1.10 a) Segundo prototipo de la primera generación y b) primer prototipo de la segunda generación de micromáquinas herramienta basadas en barras y paralelogramos*

El primer prototipo desarrollado en México, tiene un costo aproximado de \$100 USD, únicamente de materiales, mientras que el tiempo efectivo de trabajo invertido por tres académicos fue de aproximadamente 1000 horas. Por otro lado, el prototipo basado en paralelogramos tiene un costo aproximado de \$110 USD, únicamente de materiales, y su tiempo de desarrollo fue similar al del primer prototipo [1][2].

A lo largo de este trabajo, se referirá como prototipo A, al prototipo desarrollado por el GMM en el año 2000; mientras que para el prototipo basado en paralelogramos, desarrollado en el año 2004, se hará la referencia de prototipo B.

### ***1.3 BENEFICIOS DE HACER MICROEQUIPO PARA CÉLULAS DE MANUFACTURA***

El microequipo presenta un amplio rango de aplicaciones potenciales, derivadas de los desarrollos generados en materiales, procesos de manufactura, ensamble y diseño introducido a la ingeniería micromecánica. Para convertir en realidad las aplicaciones de microequipo, es indispensable mantener un bajo costo de manufactura de cada uno de los productos generados con esta tecnología [1].

Conforme se desarrolle microequipo de uso general de bajo costo, que permita obtener estructuras mecánicas complejas en tres dimensiones y de diversos materiales, será posible la construcción de bajo costo de robots, micromanipuladores, microfábricas, así como productos de dimensiones muy reducidas, etc [12].

Otro punto importante a considerar para la disminución de costo en el desarrollo de microequipo, consiste en el planteamiento de producciones en paralelo, que permite la manufactura de una gran cantidad de dispositivos de manera simultánea, o de la diversificación por demanda de las producciones [2].

A gray square graphic with the word "CAPÍTULO" in white, italicized, uppercase letters at the top, and a large white number "2" in the center.

## ***OBJETIVO Y MARCO TEÓRICO***

*En este capítulo se describe el objetivo y alcance de este trabajo. Se expone además, el marco teórico planteado para el desarrollo de un nuevo prototipo de micromáquina herramienta.*

### ***2.1 OBJETIVO***

Aplicar sistemas CAD y CAM al desarrollo de una nueva versión del primer prototipo de la primera generación de micromáquina herramienta, con el fin de facilitar su manufactura y ensamble .

### ***2.2 ALCANCES DEL TRABAJO***

Rediseñar y construir una nueva versión del primer prototipo de microcentro de maquinado desarrollado en México, aplicando como técnica de desarrollo a los sistemas CAD y CAM, buscando mantener el bajo costo de la máquina resultante.

Preparar un manual para la reproducción de la máquina herramienta. En este punto se incluye dejar una base de datos que contenga la información y los archivos necesarios que permitan un desarrollo más eficiente y ágil de este prototipo de microcentro de maquinado, que el que se tenía anteriormente.

## ***2.3 MARCO TEÓRICO***

### ***2.3.1 ¿CÓMO HACER MICROEQUIPO DE BAJO COSTO?***

En el año 2000, el GMM, realizó una propuesta para la manufactura de microdispositivos mecánicos de bajo costo, que se encuentra fundamentada en una extensión de la ingeniería mecánica convencional, donde los procesos individuales de maquinado involucran un alto costo debido principalmente a las erogaciones realizadas al equipo, mano de obra, costo de instalaciones y terreno, y energía consumida, entre otros aspectos. De esta manera es posible afirmar que los procesos de manufactura que involucran producciones por lotes son preferibles [5].

Sin embargo, en el caso de la micromecánica el costo de procesos individuales cambia notablemente en función de [5]:

- **Miniaturización.** Al decrecer las dimensiones del equipo, y su masa, es posible incrementar la eficiencia de uso de suelo para producción.
- **Mano de obra.** Esta disminuye en función del grado de automatización obtenido y del nivel de mantenimiento de cada dispositivo en un ciclo de producción.
- **Bajos costos de equipo.** Estos se obtienen de la miniaturización del equipo, una baja cantidad de materiales, así como equipo simple para su producción. Se define bajo costo como todo aquello que cuyo costo en materiales y elementos que lo integren, se encuentre por debajo de los empleados o reportados por entidades de investigación que desarrollen equipo semejante
- **Manejo de producciones en paralelo.** Se plantea el uso de células de producción en pequeñas fábricas o microfábricas, que tengan como característica la producción simultánea de microdispositivos que requieran grandes volúmenes.

Tomando como tema central de esta tesis el desarrollo de un microcentro de maquinado de bajo costo, y se aplica el tercer apartado antes mencionado, se sugiere el uso de máquinas herramienta convencionales para la manufactura, así como evitar el uso de elementos comerciales costosos.

Sin embargo, para el desarrollo de microequipo, utilizaremos máquinas herramienta de control numérico, con la finalidad de mejorar las prestaciones que la máquina proporciona al usuario, así como optimizar los procesos de manufactura, y reducir el tiempo de desarrollo, lo que nos permitirá abatir costos en futuras construcciones de microequipo.

### ***2.3.2 MICROCENTRO DE MAQUINADO***

Un centro de maquinado es una máquina herramienta que permite hacer un amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, roscado, etc.) [16].

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

Los centros de maquinado usualmente tienen las siguientes características [16]:

- Control numérico [NC].
- Carruseles con cambiadores automáticos de múltiples herramientas.
- Ejes habilitados para trabajar en todos los lados de la pieza.
- Cuando se encuentra en sistemas de manufactura flexible, se contempla la alimentación y retiro de pieza de forma automática.

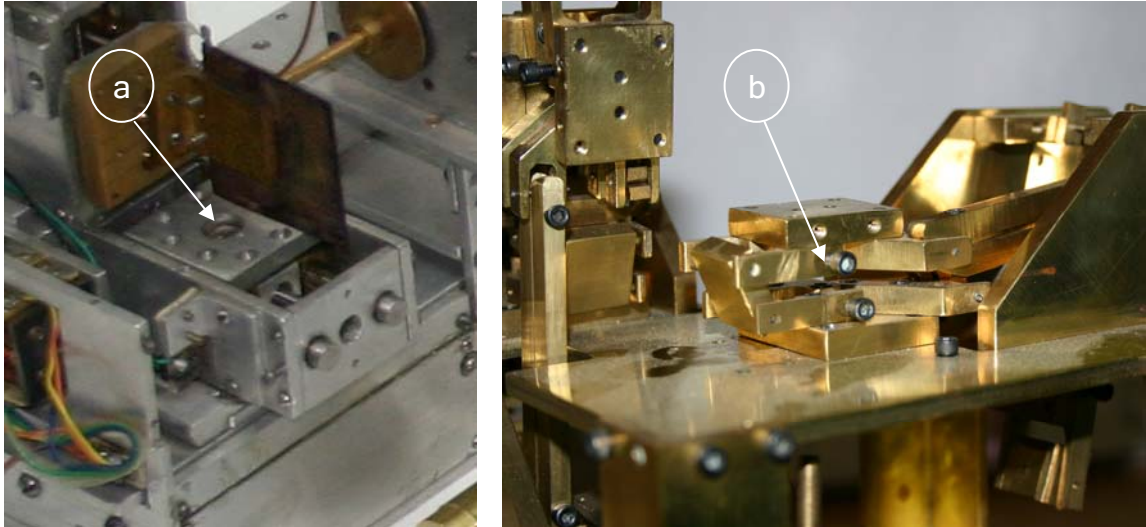
Los centros de maquinado generalmente se recomiendan para bajas o medianas producciones, pero con un alto grado de automatización, permitiendo ser configuradas para diferentes tipos de producciones (en cuanto a volumen y tipo de piezas producidas), en relativamente corto tiempo [16].

Con base en lo anterior, en el año 2000, el GMM definió como microcentro de maquinado a una **máquina herramienta que permite hacer un amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, roscado, etc.), que posee bajas dimensiones, o bien sus componentes o productos tienen dimensiones globales inferiores a 15mm** [5].

En ese mismo año, se concluyó el desarrollo de un prototipo de microcentro de maquinado, con un movimiento lineal, y que se desplaza carros a lo largo de barras redondas paralelas (Figura 2.1a). Posteriormente, en el año 2004, se concluyó el desarrollo de un segundo prototipo, con movimiento semicircular, obtenido por mecanismos conformados por palancas y paralelogramos (Figura 2.1b). La búsqueda de una nueva configuración se debe a la necesidad de reducir el juego mecánico e inestabilidad que el primer prototipo presentaba al realizar las operaciones propias de la máquina.

El juego mecánico existente en el primer prototipo, se debe entre otras cosas a que la máquina fue manufacturada con máquinas convencionales y herramientas de mano, así como a su diseño y a los componentes que están asociados al movimiento (carros, guías, transmisión, tornillos sinfín, etc.). Por ello se propone que el emplear otro tipo de tecnologías más avanzadas, como lo es el uso de sistemas CAD y CAM, ayudará a mejorar, no sólo el tiempo y procesos de desarrollo, sino también las prestaciones del microequipo.





*Figura 2.1 a) Carro montado sobre barras paralelas, desplazamiento lineal, b) Mecanismo de palancas y paralelogramos, desplazamiento semicircular*

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

El microequipo presenta un amplio rango de aplicaciones potenciales, derivadas de los desarrollos generados en materiales, procesos de manufactura, ensamble y diseño introducido a ingeniería micromecánica. Para convertir en realidad las aplicaciones de microequipo, es indispensable mantener un bajo costo de manufactura de cada uno de los productos generados con esta tecnología. [5]

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

Otro de los factores importantes para la disminución de costo en el desarrollo de microequipo, consiste en el planteamiento de producciones en paralelo, que permite la producción de una gran cantidad de dispositivos de manera simultánea.

## ***2.4 PRIMER PROTOTIPO DE MICROMÁQUINA HERRAMIENTA DESARROLLADA EN MÉXICO***

Como se mencionó anteriormente, en el año 2000 se fabricó el primer prototipo de MMH desarrollado en México. Sin embargo, este último fue fabricado principalmente con herramientas de mano y máquinas herramientas convencionales; adicionalmente, no se contaban con planos detallados de manufactura, lo que hacía de este modelo, un prototipo único, y por tanto prácticamente imposible de repetir.

Debido a que el GMM desea continuar desarrollando microequipo de bajo costo, se observó la necesidad de buscar una forma de repetir el prototipo de la MMH ya manufacturado.

Finalmente, al crecer el GMM, se fue adquiriendo nueva infraestructura, que permitiría el uso de sistemas más modernos para el diseño y la manufactura de este prototipo, pero que también, proporcionan nuevas ventajas al desarrollo de microequipo mecánico.

Esta nueva infraestructura incluye la licencia del programa de diseño, SolidWorks, la licencia del programa VisiCAM, para la manufactura y una máquina de control numérico de la marca Dyna Mechnonics, modelo. Es importante mencionar que el programa VisiCAM, proporciona los programas de manufactura que son compatibles con el controlador de la máquina de CNC a utilizar.

## ***2.5 SISTEMAS CAD Y CAM***

Hoy en día el mundo de la industria manufacturera es cada día más competitivo. Para desarrollarse con éxito no basta sólo con tener unos buenos conocimientos técnicos, ya que las empresas exigen mucho más, tanto a las personas que van a

desempeñar puestos de responsabilidad como a quienes se incorporan a sus primeros puestos de trabajo.

El Diseño Asistido por Computadora (CAD), implica el uso de computadoras para crear dibujos y modelos de producto; suele asociarse con gráficas interactivas en computadora. Estos sistemas CAD (Computer Aided Design) son medios poderosos que se usan en el diseño mecánico y le modelado geométrico de productos y componentes [26].

Al usar un elemento CAD, el diseñador puede conceptualizar el objeto a diseñar, con más facilidad, en la pantalla de gráficos, y puede considerar diseños alternativos, o modificar con rapidez determinado diseño, para cumplir con los requisitos o cambios necesarios. La velocidad y la precisión de esos análisis superan en gran medida lo que se puede lograr con métodos tradicionales [26].

El sistema CAD produce en forma rápida y exacta los modelos de definición para productos y sus componentes. Uno de los resultados de este sistema es la generación de planos para la fabricación, que en general tienen más alta calidad y mejor consistencia que los producidos con el dibujo manual tradicional. Los dibujos se pueden reproducir cualquier cantidad de veces y a distintos niveles de reducción y ampliación [26].

Además de las propiedades geométricas y dimensionales del diseño, en la base de datos del CAD se guarda otra información, como listas de materiales y sus características y costos asociados. Al usar esta información, el diseñador puede analizar entonces la economía de diseños alternos [26].

Elementos del sistema CAD.

- Modelado geométrico
- Análisis y optimización
- Revisión y evaluación del diseño
- Documentación y diseño

La manufactura asistida por computadora CAM (Computer Aided Manufacturing), implica el uso de computadoras y tecnología de cómputo para ayudar en todas las fases de la manufactura de un producto, incluyendo la planeación del proceso y la producción, maquinado, calendarización, administración y control de calidad. El sistema CAM debido a sus ventajas, se suele combinarse con el diseño asistido por computadora en los sistemas CAD/CAM [26].

Esta combinación permite la transferencia de información dentro de la etapa de diseño a la etapa de planeación de la manufactura de un producto, sin necesidad de volver a capturar en forma manual los datos sobre la geometría de la pieza. La base de datos que se desarrolla durante el CAD es almacenada, posteriormente ésta es procesada por el CAM, para obtener los datos y las instrucciones necesarias para operar y controlar la maquinaria de producción, el equipo de manejo de materiales y las pruebas e inspecciones automatizadas para establecer la calidad del producto [26].

A gray square graphic with the word "CAPÍTULO" in white, italicized, uppercase letters at the top, and a large white number "3" in the center.

## ***DESARROLLO***

*En este capítulo se describen las actividades realizadas para el desarrollo de una nueva versión del primer prototipo perteneciente a la primera generación de micromáquinas desarrollada en México.*

### ***3.1 ANÁLISIS***

Tomando en consideración el objetivo propuesto en este trabajo, las necesidades que se presentan en el primer prototipo de micromáquina herramienta, así como los recursos disponibles del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET, y la experiencia obtenida a lo largo del desarrollo de los anteriores prototipos, se plantean los requerimientos funcionales para esta nueva versión, los cuales, posteriormente, se convertirán en las especificaciones que se deberán considerar para el diseño y la manufactura de este microcentro de maquinado.

#### ***3.1.1 NECESIDADES***

Al tomar como referencia para el desarrollo de este prototipo las especificaciones de la primera micromáquina desarrollada en México y se evaluaron las alternativas que en el 2000 fueron tomadas en consideración, en lo referente al movimiento de

los ejes, la transmisión requerida, la forma del bastidor, el tipo de material de la estructura, los dispositivos de control, etc., se identificaron las principales necesidades para el desarrollo de esta nueva versión:

- Estandarización de medidas
- Alineación de barrenos
- Implementación de cajas para la cabeza de los tornillos
- Minimizar puntos de anclaje
- Eliminación de piezas innecesarias
- Reducción de piezas a manufacturar
- Conservación de la sencillez de diseño
- Disminución de trabajo manual
- Incremento de la resolución teórica, la cual debe ser menor a 1  $\mu\text{m}$  por paso del motor.
- Ocultar en la medida de lo posible de los cables que conectan a los sensores en la maquina
- Realización de una base de datos de los archivos de CAD y CAM, así como de guías de manufactura, para el desarrollo de este prototipo

### ***3.1.2 RECURSOS***

Este trabajo fue desarrollado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, a través del laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica.

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

- Taller mecánico con máquinas herramientas convencionales
- Centro de maquinado vertical modelo 1007 de la empresa Dyna Mechtronics. Cuenta con un controlador compatible con Fanuc.

- Apoyo de instrumental convencional de medición geométrica y del Comparador Óptico del Laboratorio de Metrología del mismo CCADET.
- Computadoras Pentium 4, 1 GB de memoria en RAM
- Programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD), SolidWorks
- Paquete de computadora para la parte de Manufactura Asistida por Computadora (CAM), VisiCam

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

- Supervisión del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta y del Dr. Alberto Caballero Ruiz
- Apoyo de tres estudiantes, 2 de licenciatura y un estudiante de Maestría
- Asesoría de un técnico en fabricación, Sr. Mario Rodríguez Segundo.

### ***3.1.3 GUÍAS DE DISEÑO***

Con base en la experiencia obtenida con el desarrollo de los prototipos antes mencionados se proponen algunas guías de diseño para el desarrollo de microequipo de bajo costo.

El prototipo A dependió de la sencillez del diseño, ya que era uno de los factores más importantes para reducir el tiempo de desarrollo. Por ello, para la fabricación del prototipo B se utilizaron sistemas CAD, que permitió la reducción de los tiempos de desarrollo. También para el prototipo B se procuró la generación de piezas que tuvieran diferentes aplicaciones dentro de la máquina, así como se buscó usar el mismo material, que para este caso fue latón. Por último, se recomendó utilizar elementos simples para desplazamientos suaves, que requieren de especial atención para ensamble y escalabilidad.

Con base en lo anterior, se observa que en la mayoría de los casos, las guías de diseño aplicadas al prototipo B funcionaron adecuadamente, por lo que en general, se utilizarán la mayoría de ellas para el prototipo a desarrollar. En resumen,

podemos simplificar las ideas antes mencionadas, así como las mencionadas en la referencia [5], en los siguientes puntos:

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

### ***3.1.4 REQUERIMIENTOS***

Con base en lo anterior mencionado y para el desarrollo de este equipo, los requerimientos considerados fueron:

- De concepto, diseño, componentes y manufactura, tan simples como sea posible, en función de los recursos disponibles.
- De bajo costo, relativo a los desarrollos en el ámbito mundial.
- Para la generación de piezas, tanto en la modalidad de torno, como en la de fresadora.
- Multifuncional. El centro de maquinado desarrollado debe permitir el cambio de operaciones con el uso de accesorios: tipo de sujeción de herramientas y piezas, herramientas y/o software.
- Uso de sistemas de bajo consumo de potencia y sensores sencillos. En virtud de lo posible, evitar el uso de sistemas comerciales para mantener bajo costo y disminuir la dependencia.
- Sistema de control automatizado, que facilite su uso y disminuya la cantidad de mano de obra utilizada en la operación.



- Buscar un diseño que considere estética, confiabilidad y robustez.
- Sistema de control automatizado, que facilite su uso y disminuya la mano de obra utilizada en la operación.
- Fabricar mas de una micromáquina con las mismas características

### ***3.1.5 ESPECIFICACIONES***

Las especificaciones propuestas por el GMM para el desarrollo de este nuevo prototipo de microcentro de maquinado, fabricado en México, fueron:

- Capacidad para producir piezas dentro del rango de 50 micrómetros y hasta 5 milímetros.
- Resolución mínima de un micrómetro en cada eje, por paso del motor.
- El equipo debe contar con al menos 4 grados de libertad, siendo de estos 3 ejes de translación y al menos 1 rotacional.
- Las dimensiones de la micromáquina no deben rebasar los 130 x 160 x 85 mm.
- Volumen de trabajo: 15 mm en los ejes X y Y, y 25 mm en el eje Z
- Minimizar puntos de anclaje, elementos de unión, orientación de barrenos.
- Base de datos de los archivos en CAD y CAM, así como un manual de desarrollo de producción de la máquina
- Reducción del número de piezas que componen a la máquina

### ***3.2 DISEÑO CONCEPTUAL***

Se busca la construcción de un microcentro de maquinado basado en un prototipo con movimiento lineal en tres de sus ejes y un eje rotacional. Este movimiento lineal esta dado por carros que corren a lo largo de barras circulares paralelas, por medio de una transmisión motor - tornillo sinfín. Cuenta además con sensores al

inicio de carrera, para determinar el cero de la máquina. Esta construida principalmente en aluminio 6061. Cuenta con 4 motores a pasos, de los cuales, 3, uno para cada eje lineal, son iguales y uno diferente para el eje rotacional (Figura 3.1).

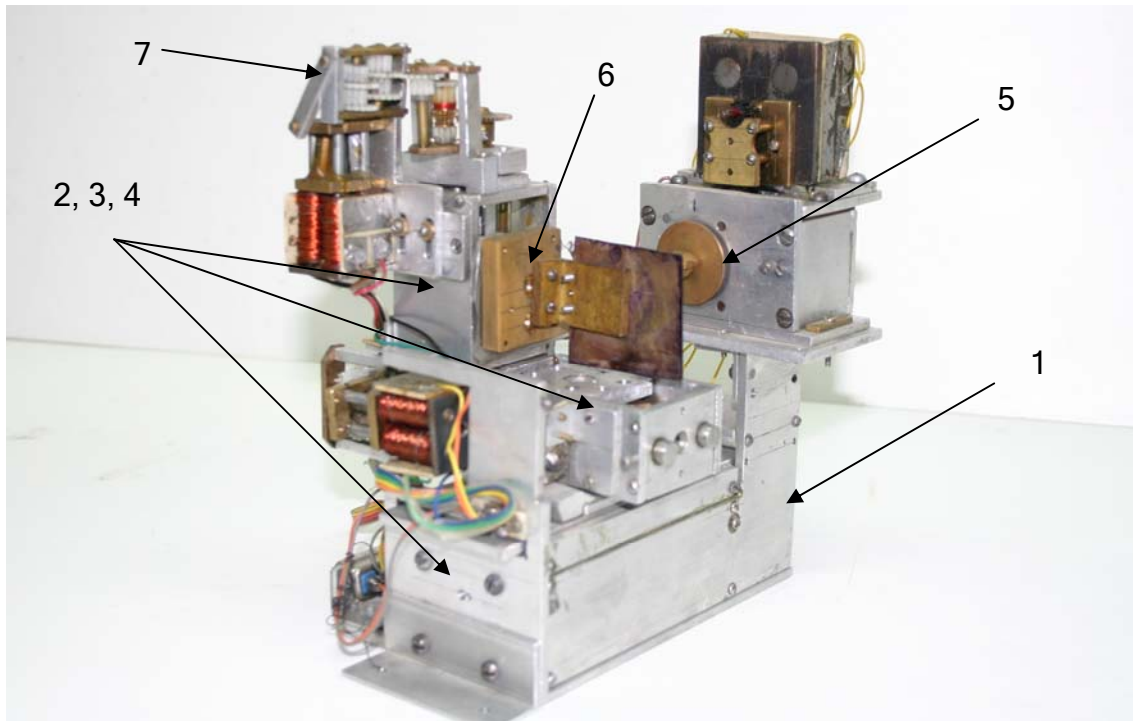


Figura 3.1. Configuración de la MMH desarrollada en México

Para el nuevo microcentro de maquinado, se mantiene la misma configuración con la que se contaba, y se muestra en la figura 3.2, donde se puede identificar: el bastidor (1), tres juegos de guías y carros (2), (3), (4), que proporcionan el movimiento a lo largo de los ejes X, Y, Z., el eje rotacional (5), el portaherramientas (6) y la transmisión del motor al tornillo sinfín (7).

En la imagen se puede observar que uno de los principales problemas del prototipo se encuentra en el ensamble de este. Se detectan problemas en la alineación de los componentes y sus elementos de sujeción (tornillos), ya que no se tiene un orden definido. El uso de pegamentos epóxicos para el ensamble de varias piezas también resulta perjudicial para su correcto funcionamiento. El uso

de piezas que no estaban contempladas inicialmente, pero que tuvieron que ser fabricadas para conseguir el ensamble de esta. Otro problema es la posición de los cables de las partes electrónicas, pues se encuentran en parte del área de trabajo. Estos son los problemas generales que tiene la máquina. Sin embargo, existen otros detalles a considerar para mejorar el diseño del nuevo microcentro de maquinado a fabricar.

Para continuar con el proceso de rediseño, tomaremos una técnica encontrada en [18] y ejemplificada en la figura 3.2, donde ya identificados los requerimientos funcionales para el prototipo, estos serán divididos en funciones específicas, las cuales están asociadas a su solución correspondiente, y finalmente, ya encontrada dicha solución, se habla de un proceso de implementación, que al lograrse, permitirá seguir el análisis en la siguiente función específica. Este ciclo se repite hasta alcanzar la estructura final deseada [18].

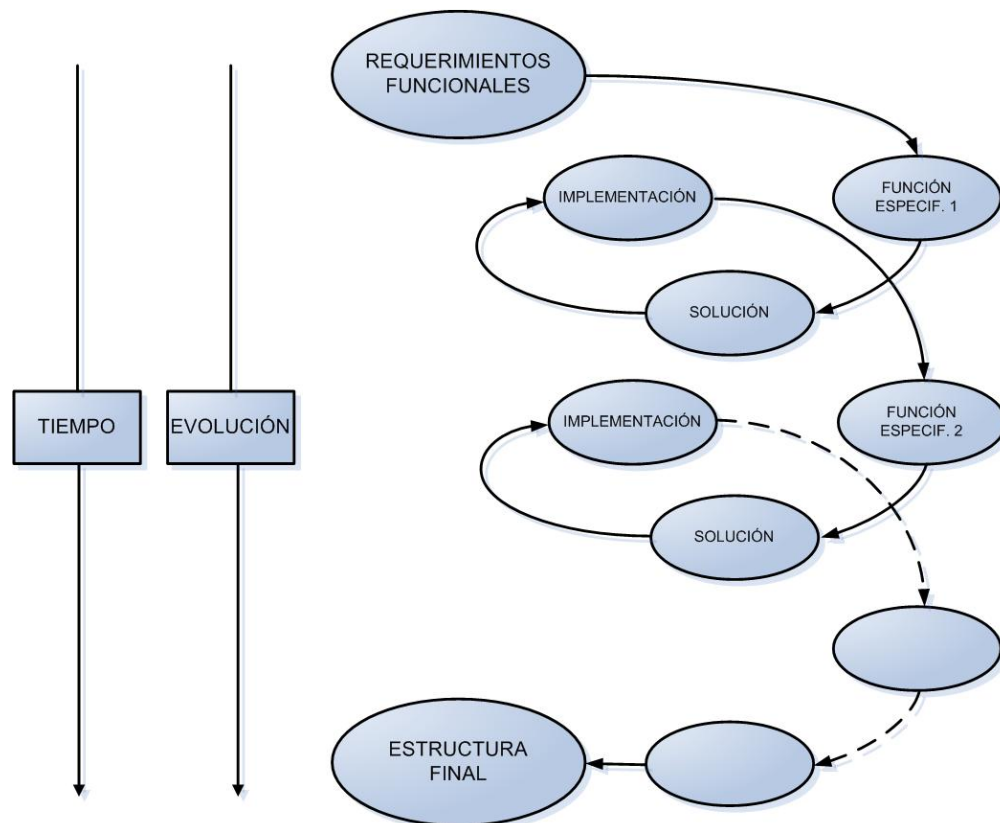


Figura 3.2 Diagrama de diseño a seguir

Para la identificación de cada función específica, se utilizó la técnica de descomposición funcional, citada en las referencias [1] [2], la cual nos sugiere la identificación de las diferentes funciones en un diseño

### ***3.2.1 CONSIDERACIONES***

Es importante destacar y mencionar, que este trabajo de tesis está siendo aplicado para el diseño y manufactura del prototipo, de la parte estructural de la MMH, sin tomar en cuenta la construcción de los motores, así como el trabajo en las etapas de control y de potencia.

Sin embargo, este trabajo de tesis se involucra directamente con los procesos anteriores, así como con el de la construcción de una carcasa para el prototipo, ya que se busca satisfacer las necesidades de cada una de las partes integrantes de la micromáquina herramienta, para un mejor funcionamiento, es decir, se busca la integración sinérgica de las partes componentes de la micromáquina: la mecánica, la electrónica y el control, y adicionalmente, para su facilidad en el ensamble y mantenimiento de la misma.

### ***3.3 MATERIAL***

Antes de tomar otras consideraciones para el diseño del nuevo prototipo, es importante tomar en cuenta el material a utilizar para la manufactura de este.

La MMH ya construida tiene como material estructural al aluminio 6061 (aluminio convencional). Este material no ha presentado problemas mientras se realiza algún proceso de manufactura en la MMH. La principal razón por la que se escogió el aluminio para ser parte estructural de la MMH, es por su bajo peso y por la facilidad de manufactura de este.

Para este nuevo prototipo se han considerado en varios materiales para la parte estructural. Entre ellos se encuentran el latón y el acero. Sin embargo, a diferencia del aluminio estos dos materiales son muy pesados en comparación con el aluminio y en el caso del acero es mucho más difícil maquinarlo.

Por ello, se buscó otra alternativa que presentara mejores prestaciones que el aluminio convencional y que de igual forma, fuera sencillo de maquinar. Una opción fue el Duraluminio, sin embargo, cuando se realizó la búsqueda del material, no se encontraba disponible. Al mismo tiempo, se encontró la aleación de aluminio 6063 temple 5, que al investigar sus propiedades mecánicas, resultó ser un material con mayor resistencia que el aluminio 6061, y con mejor maquinabilidad, y finalmente en lo que respecta a costos, resultó ser una excelente opción.

Otro factor importante para escoger este material fue que se pretendía realizar la manufactura de las piezas en soleras, ya que en general, presentan mejores propiedades de homogeneidad que las placas. En el caso de las soleras de aluminio 6061, no se tiene el ancho para cubrir el tamaño de algunas piezas de la micromáquina; sin embargo, en aluminio 6063, se consiguieron soleras que cubrieron todas las piezas (Soleras de aluminio 6063 T5, 1/4" y 1/8" x 4" de ancho).

Se mantuvieron el resto de los materiales: soleras de latón de 1/4", así como barras redondas de latón y de acero de 1/4". En la tabla 3.1 se muestran los materiales utilizados para la manufactura de la máquina, con las funciones correspondientes en las que están involucrados cada uno de ellos.

### ***3.4 HERRAMIENTAS***

Otro factor importante a considerar a lo largo del diseño es el de las herramientas, puesto que debe tomarse en consideración si existen herramientas en el mercado

para realizar la manufactura de las piezas deseadas. En la tabla 3.2 se muestran las herramientas consideradas para la manufactura de las piezas:

<i>Material</i>	<i>Descripción</i>
Solera 1/8" de aluminio 6063 T5	Piezas estructurales de la máquina
Solera 1/4" de aluminio 6063 T5	Piezas estructurales de la máquina
Solera 1/4" de latón	Piezas de los carros que se desplazan sobre las guías redondas
Barra redonda 1/8" de Cold Rolled	Tornillos sinfin
Barra redonda 1/4", 3/8" y 5/8" de latón	Piezas para transmisión en carros
Barras gorton 1/4"	Guías redondas paralelas
Placa de acrílico 3 mm.	Cubiertas de motor - transmisión
Barra engrane 12 dientes	Engranajes transmisores
Barra engrane 24 dientes	Engranajes transmisores
Tornillos M2x0.4	Tornillos de diferentes medidas para ensamble

*Tabla 3.1 Materiales involucrados para la manufactura de la MMH*

<i>Material</i>	<i>Descripción</i>
Broca de centros del No. 1	Centrado de barrenos
Broca de 1 mm	Para los ejes de los engranes
Broca de 1.6 mm	Para tornillos M2x0.4 (machuelo), uniones de la MMH
Broca de 2 mm	Barrenos pasados para tornillos M2x0.5
Broca de 2.5 mm	Para tornillos M3x0.5 (machuelo), para tornillo sinfin
Cortador recto de 1/32"	Para marcar el sentido y dirección de los ejes
Cortador recto de 1/16"	Aplicaciones en general
Cortador recto de 1/8"	Corte y forma de las piezas de la MMH
Cortador recto de 1/4"	Corte de soporte del eje rotacional
Cortador esférico de 1/4"	Para cavidades de las guías de los carros
Machuelo M2x0.4	Para tornillos de unión
Machuelo M3x0.5	Para tuerca de tornillo sin fin

*Tabla 3.2 Herramientas involucradas en el proceso de manufactura de la MMH*

### **3.5 DISEÑO DE DETALLE**

El primer paso a seguir, fue la creación de la micromáquina a un modelo en CAD, por lo que fue necesario tomar las medidas correspondientes al primer prototipo de micromáquina herramienta. Este proceso fue iniciado por la estudiante de Diseño

Industrial, Daniela Rovira Sánchez, que en este momento, se encuentra desarrollando la carcasa de este prototipo.

Esto resultó muy importante para comenzar el diseño asistido por computadora, ya que durante la medición de la máquina, se reportaron todos aquellos problemas que tiene dicho dispositivo, que van desde la irregular posición de muchos elementos de sujeción y ensamble, hasta piezas que aún cuando no estaban contempladas en el diseño original del prototipo, tuvieron que fabricarse para lograr un correcto ensamble de la máquina.

A continuación se presentan las soluciones tomadas para el diseño y construcción del prototipo. Es importante mencionar que tras la descomposición funcional realizada, se inició el proceso de desarrollo de cada una de las partes que se relacionan con las funciones, adicionalmente de los principales problemas atribuidos al ensamble de la MMH, sin embargo, existen técnicas especiales de diseño que pueden ser aplicadas a este tipo de equipos.

Las soluciones a continuación mostradas resuelven el problema planteado, tomando como base, las soluciones presentadas en la búsqueda y evaluación de alternativas.

### ***3.5.1 FUNCIÓN SOPORTE: BASTIDOR***

El sistema de montaje y bastidor de la máquina se buscó que fuera para una manufactura sencilla, consta de 9 piezas, todas estructurales, ya que serán las que soporten toda la MMH. Esta fabricada en aluminio 6061, principalmente de placas de 6.35 mm y 3.18mm (1/4"y 1/8" respectivamente). Dos piezas son las que soportan las guías de los carros. El bastidor aloja al carro Y.

En la figura 3.3 se muestra el rediseño del bastidor a usar para el montaje de los componentes de la nueva versión de centro de maquinado.

Se conserva una geometría sencilla, se reduce el número de piezas a 7. Las piezas que soportan las guías también tendrán la función de alojar los sensores de inicio y fin de carrera, que en este nuevo diseño se propone su implementación por dentro de la micromáquina. En una de sus piezas laterales, se indica el movimiento de los carros. Se adopta la convención para máquinas herramientas, por lo que ahora, el bastidor aloja al carro Z. En la tabla 3.3 se muestran las principales diferencias existentes entre el bastidor actual y su rediseño.

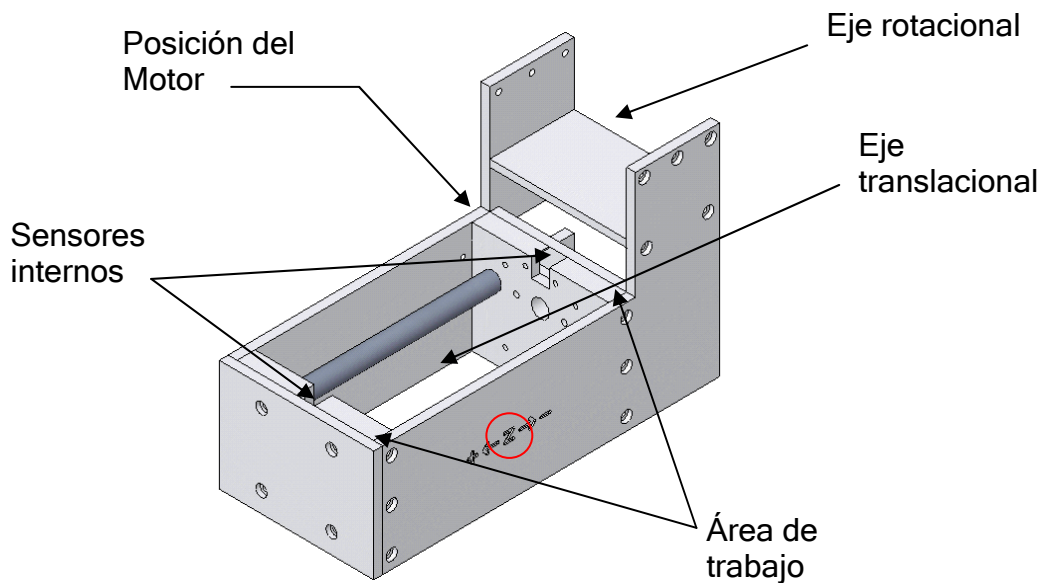


Figura 3.3. Bastidor para la nueva versión de la MMH

<i>Descripción</i>	<i>1er. Prototipo de MMH</i>	<i>Nueva versión de la MMH</i>
Número de piezas (sin contar con las guías)	9	7
Sensores implementados	0	2
Facilidad de manufactura	✓	✓
Indicación de eje translacional	✗	✓
Material	Aluminio 6061	Aluminio 6063 T5
Área de trabajo [mm]	65	65
Carro alojado	Y	Z

Tabla 3.3 Diferencias en el bastidor, entre el prototipo y la propuesta realizada



### ***3.5.2 FUNCIÓN MOVIMIENTO LINEAL: EJES DE TRANSLACIÓN***

Los ejes de translación se diseñaron para ser formados por conjuntos de guías y carros, contando los tres ejes con la misma configuración [2]. Cada carro cuenta con un total de 17 piezas.

Las guías para los carros, consisten en un par de barras redondas paralelas de acero AISI 4140. Dicha solución fue tomada para simplificar la manufactura, ensamble y en un futuro, disminución de dimensiones, pero también para mejorar las prestaciones que la máquina nos puede ofrecer [2].

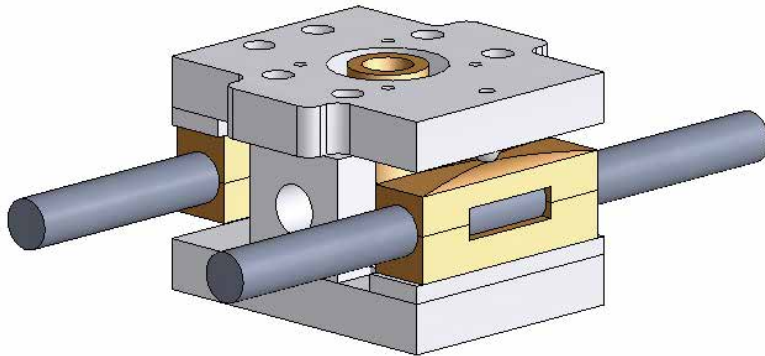
Los carros se diseñaron con componentes que deslizan sobre las guías, y son piezas cóncavas hechas en latón, para que ajusten a estas, y bases de aluminio que soportan dichas piezas, y que se unen al resto de la estructura. Se tienen acopladas esferas metálicas (balines) en los carros que permite el deslizamiento de este a lo largo de la guía, absorbiendo las posibles variaciones generadas por procesos de manufactura, o bien derivadas de efectos térmicos durante largas jornadas de trabajo [2].

Se tiene una configuración para el sistema translacional en el que el eje que se acerca a la herramienta es el eje Y, diferente a las configuraciones estándar para máquinas herramienta.

En la figura 3.4 se muestra el rediseño de los carros para la nueva versión de la micromáquina herramienta.

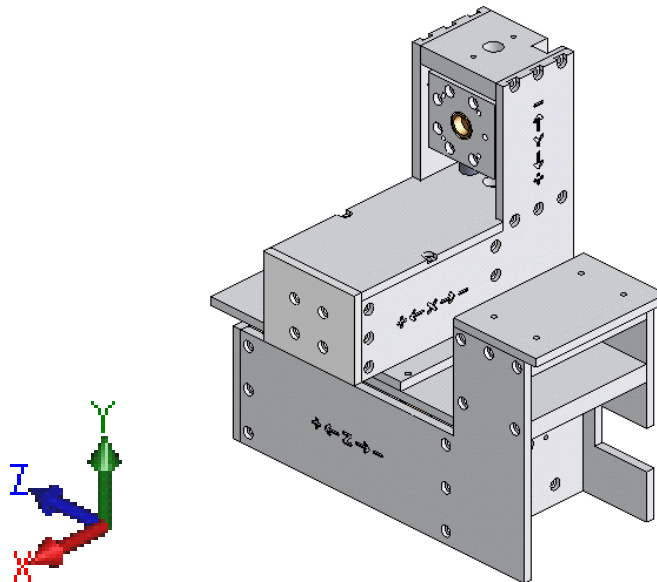
En este caso, los carros conservaron la misma configuración, las barras paralelas, ahora barras redondas rectificadas de acero HSS, que se encuentran fijas a la estructura de la MMH y permiten el desplazamiento de los carros a lo largo de ellas. Uno de los soportes de aluminio de cada carro, cuenta con dos protuberancias, colocadas según sea conveniente, que sirven para activar los

sensores que se localizaran al inicio y fin de carrera de cada eje, eliminando las piezas acopladas que se tenían anteriormente para activar el sensor de inicio de carrera. Los carros tienen un total de 14 piezas cada uno. Se agregaron 2 piezas para la correcta alineación de las guías de acuerdo con la posición de los balines.



*Fig. 3.4 Ensamble de guías y carros para la nueva versión de MMH*

El arreglo de los ejes traslacionales propuesto a este microcentro de maquinado, va de acuerdo a la convención establecida para máquinas herramienta, y se puede observar en la figura 3.5.



*Figura 3.5 Arreglo de ejes traslacionales para el microcentro de maquinado*

En la tabla 3.4 se muestran las diferencias existentes entre los ejes traslacionales existentes y el rediseño propuesto.

<i>Descripción</i>	<i>1er. Prototipo de MMH</i>	<i>Nueva versión de la MMH</i>
Número de piezas carros	17	14
Sensores por eje	1	2
Facilidad de manufactura	✓	✓
Uso de balines	✓	✓
Material soporte carros	Aluminio 6061	Aluminio 6063 T5
Material guías redondas	AISI 4041	Acero HSS
Material piezas que deslizan sobre guías	Latón	Latón
Piezas extra, necesarias para activar sensores	5 por sensor	1 para ambos sensores
Piezas extra para alineación de carros	0	2

*Tabla 3.4 Diferencias en los ejes traslacionales del prototipo y la propuesta realizada*

### ***3.5.3 FUNCIÓN DE ESTRUCTURA MÓVIL***

Para realizar el desplazamiento en los ejes X y Z, se utilizó una estructura móvil colocada sobre el carro Z. Fabricada en aluminio 6061. Tiene un total de 19 piezas sin contar las guías. Aloja dos carros además de contar con las piezas necesarias para implementar los sensores de contacto al inicio de carrera.

En la figura 3.6 se muestra la figura del rediseño hecho a esta estructura.

Se conserva una geometría sencilla en la cual se realizará el desplazamiento de los carros X y Y, ya que para este centro de maquinado se ha adoptado la convención para máquinas herramienta. Esta realizado en aluminio 6063 T5 y cuenta con un total de 9 piezas sin contar las guías de los carros. Se implementaron sensores de contacto tanto en los inicios como en los finales de carrera de ambos carros. En la tabla 3.5 se muestran las diferencias existentes entre el prototipo ya construido y el rediseño propuesto.

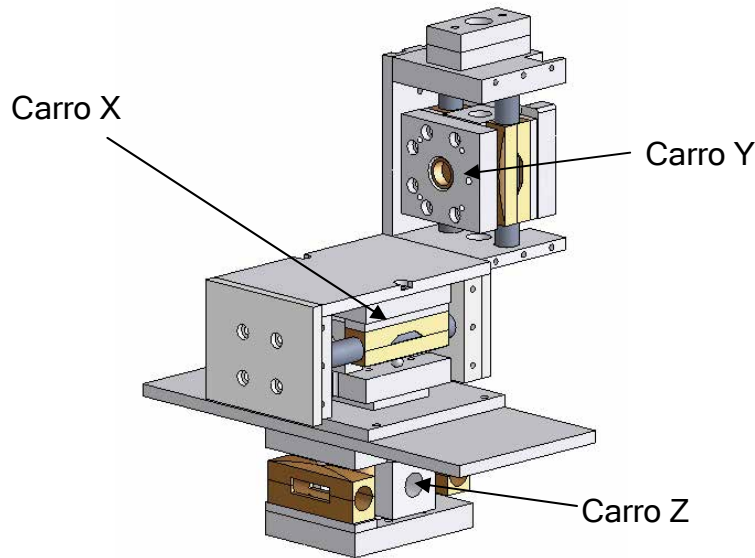


Figura 3.6 Estructura móvil para la nueva versión de MMH

<i>Descripción</i>	<i>1er. Prototipo de MMH</i>	<i>Nueva versión de la MMH</i>
Número de piezas (sin contar con las guías)	19	9
Sensores implementados	2	2
Facilidad de manufactura	✓	✓
Número de ejes alojados	2	2
Carros alojados	X, Z	X, Y
Indicación de los ejes translacionales alojados	✗	✓
Material	Aluminio 6061	Aluminio 6063 T5
Área de trabajo [mm]	15 x 15	15 x 10

Tabla 3.5 Diferencias en la estructura móvil, entre el prototipo y la propuesta realizada

### 3.5.4 FUNCIÓN DE TRANSMISIÓN

Para realizar el desplazamiento de los carros a lo largo de las guías se utiliza un tornillo sinfin acoplado a una caja reductora descrita a continuación.

El desplazamiento total diseñado para cada eje varía en función del eje de trabajo: 15 mm aproximadamente de desplazamiento en los ejes X y Y, mientras que para el eje Z se definió un desplazamiento de 60 mm.

La reducción obtenida por el arreglo de engranes es de 84.7:1, formada por engranes de plástico. Y al final de la reducción se cuentan con dos engranes de latón, uno acoplado a la transmisión y otro al tornillo sinfín.

El tornillo utilizado para proporcionar movimiento a los carros es de acero 4140, cold rolled, con un diámetro de 3 mm y un paso de 0.5 mm.

En la figura 3.7 se muestra la nueva configuración de las transmisiones para esta MMH, donde se implementan módulos que alojan tanto a las cajas reductoras como al motor.

El tornillo sinfín se propone tenga las mismas características, de cold rolled, con un diámetro de 3 mm y un paso de 0.5 mm.

La nueva caja de reducción se propone de una relación 128:1, se encuentra formada por 14 engranes de latón, 7 de ellos de 12 dientes y el resto de 24 dientes. La caja reductora planteada se forma con un módulo que alcanza la reducción deseada, desde la flecha de salida del motor hasta el engrane acoplado al tornillo correspondiente a cada eje.

La resolución teórica del módulo de transmisión se determina considerando que los actuadores que serán utilizados para este nuevo prototipo, contarán con 28 pasos por cada revolución del motor, a la entrada de nuestro sistema de reducción. Con estos datos, se calcula el desplazamiento lineal aproximado del carro por revolución del motor, que es de 3.9  $\mu\text{m}$ . Si se consideran los 28 pasos del motor, se determina la resolución teórica de la MMH que es de aproximadamente 140 nanómetros. Lo que representa un avance significativo en comparación con la resolución del primer prototipo, que cuenta con una resolución teórica aproximada de 1.96  $\mu\text{m}$ .

Este tipo de transmisión de potencia sigue siendo vigente, pese a sus inconvenientes de juego mecánico o backlash, dado que presenta bajo costo y un ensamble muy sencillo.

En la tabla 3.6 se muestran las diferencias existentes entre la transmisión existente y la propuesta en este rediseño.

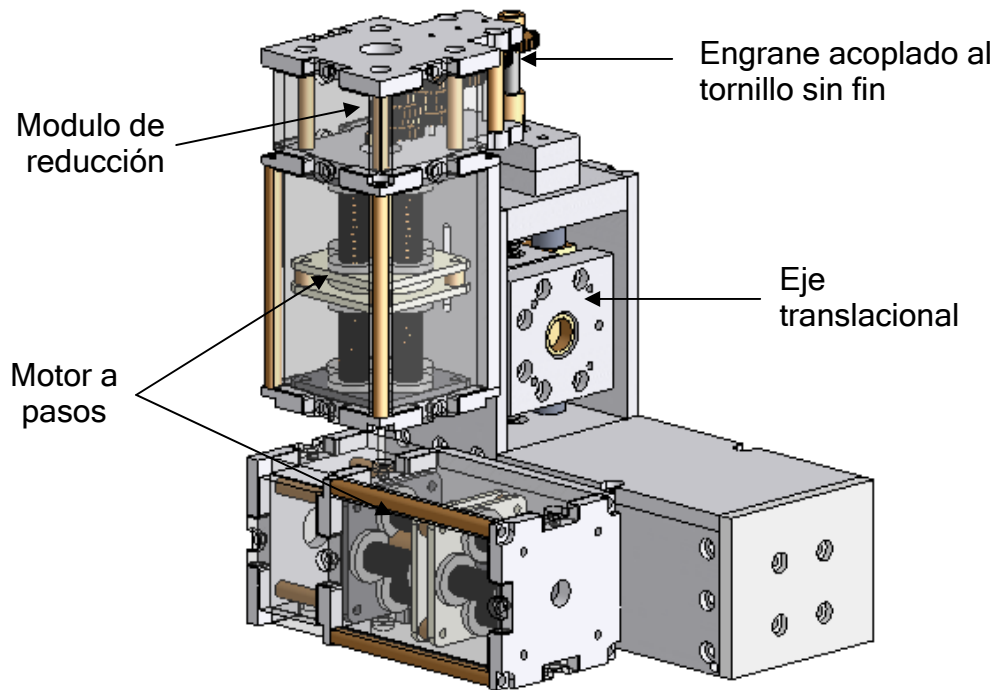


Figura 3.7 Módulo de reducción para la transmisión en los ejes traslacionales

<i>Descripción</i>	<i>1er. Prototipo de MMH</i>	<i>Nueva versión de la MMH</i>
Material engranes	Plástico y latón	Latón
Tornillos sin fin	M3x0.5	M3x0.5
Modularidad	✗	✓
Reducción de la caja de engranes	84:1	128:1
Resolución teórica aproximada [ $\mu\text{m}$ ]	1.96	0.14
Material guías redondas	AISI 4041	Acero HSS
Alojamiento motores	✗	✓
Cubierta para motores	✗	✓

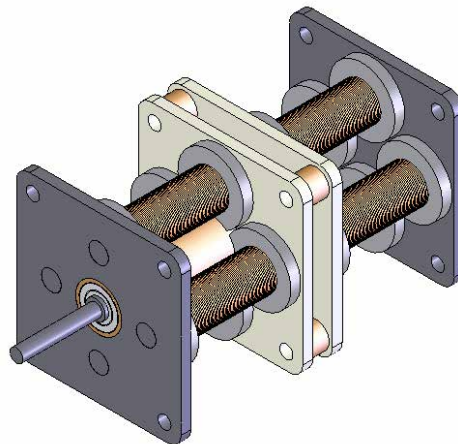
Tabla 3.6 Diferencias en la transmisión del prototipo ya construido y la propuesta realizada

### ***3.5.5 FUNCIÓN DE POTENCIA: MOTORES***

Dado que los motores a pasos, desarrollados en el mismo LMM, presentan sencillez de manufactura, ensamble y bajo costo, se tiene implementado uno de éstos en la micromáquina. Se cuenta con 3 motores a pasos de estator simple colocados en cada uno de los ejes translacionales.

Para el nuevo microcentro de maquinado, existen dos versiones de motores que buscan desarrollarse para su implementación en la micromáquina: Motores de doble estator y motores basados en el principio de fuerza de Lorentz. Ambas versiones están siendo desarrolladas por el GMM, por lo que aun no se tiene toda la información disponible, al momento de la realización de este trabajo, referente a dichos actuadores.

Los actuadores de la MMH están siendo desarrollados como tesis de licenciatura del estudiante Oscar Pérez Reyes. En la figura 3.8 se muestra el diseño de los motores propuestos para su implementación de este nuevo microcentro de maquinado.

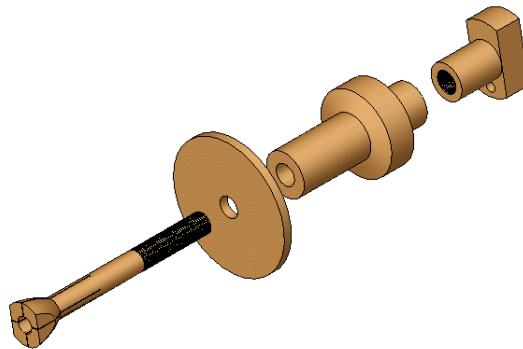


*Figura 3.8 Motor propuesto para su implementación*

### ***3.5.6 FUNCIÓN DE SUJECIÓN DE HERRAMIENTA O MATERIAL***

Actualmente el sistema de sujeción para la pieza de trabajo, en caso de tratarse de operaciones de revolución (torneado, taladrado, etc.), es un sistema de boquillas, mostrado en la figura 3.9. Es un accesorio de forma cilíndrica, que tiene un barreno pasado en la parte central de este, y dos cortes diametrales ortogonales. Todo este sistema mantiene un grado de sujeción adecuado, al ser colapsado de forma radial con la ayuda de la fuerza axial producida al tensar dicho cilindro.

Sin embargo, a la fecha de la realización de este trabajo de tesis, además de sugerirse la implementación de un nuevo sistema de sujeción de la herramienta o materia prima, según sea el caso de aplicación, aun no se define el tipo de actuador a usarse para esta nueva configuración, lo que impide definir la forma en la que será implementado dicho sistema. Actualmente, no hay propuestas para el desarrollo de este sistema.



*Figura 3.9. Sistema de sujeción para operaciones de revolución.*

### ***3.5.7 FUNCIÓN DE CONTROL: SISTEMA DE CONTROL***

El primer sistema de control de la MMH, fue diseñado con el objetivo de emplear una computadora personal y eliminar el hardware externo. Se utiliza el software, Borland C++. Existe un tronco central que contiene las instrucciones de avance



rápido, posicionamiento al origen y activación de detectores. Independiente a este módulo base, se programa la geometría a manufacturar, las herramientas a ocupar, las velocidades y avances de corte, el número de piezas a manufacturar, etc [1].

Actualmente, la MMH cuenta con un control capaz de reconocer códigos estándar de control numérico, sin embargo, tiene la desventaja de que sigue utilizando dos puertos paralelos para el control de los 4 motores de la micromáquina.

El sistema de control propuesto para este nuevo prototipo de micromáquina herramienta, consiste en emplear un sistema apoyado en un PIC (microcontrolador externo) y software realizado en Visual Basic; esto permite emplear menos puertos dedicados al control, y de esa forma, obtener la capacidad de controlar más de una micromáquina por una computadora personal.

Básicamente, para este tipo de control, se tiene una conexión con la computadora como enlace inicial. Desde ahí, es posible ejecutar acciones relacionadas con cada motor, regulando sentido, avance y velocidad. Este sistema permite una retroalimentación, mediante sensores de contacto, así como sensores posicionados en cada uno de los motores.

El dispositivo de control será capaz de reconocer códigos G y M, es decir, códigos estándares para máquinas de control numérico. Este dispositivo esta siendo desarrollado como tesis de maestría del Ing. Héctor H. Silva López.

### ***3.5.8 RETROALIMENTACIÓN DE LA MICROMÁQUINA***

Se propone que la nueva versión de micromáquina herramienta cuente con una retroalimentación utilizando: 6 sensores de contacto ubicados en el inicio y fin de carrera de cada eje; detectores en cada motor para operarlos en dos modos

diferentes, el cierre de circuito eléctrico, que enviará información de la posición de las herramientas cuando estén en contacto con el material (piezas conductoras).

Una de las principales aportaciones de este trabajo es la implementación por dentro de la estructura de los sensores de contacto, con la finalidad de evitar que haya cables que puedan estorbar en el correcto funcionamiento de la máquina. Estos sensores permiten conocer la posición de la máquina, así como los límites de ella.

La ventaja que da la retroalimentación proporcionada por los detectores antes mencionados, es la de operar cada motor a pasos en dos modos diferentes: en lazo cerrado o en lazo abierto. El primer modo de operación, en lazo cerrado, la retroalimentación recibida por del detector nos proporciona información de sincronía, la cual es empleada para operar los motores a altas velocidades de giro. Ya que la máquina se encuentre cerca de alcanzar el “punto objetivo”, se puede operar a los motores con el segundo modo de operación, en lazo abierto, con lo que el motor se comporta y controla a pasos. Con este modo es posible concluir la trayectoria a baja velocidad. Esta nueva forma de operar los motores surgió de la necesidad derivada de las altas reducciones mecánicas utilizadas en la máquina, las cuales, requieren de tiempos mayores para realizar desplazamientos largos [25].

### ***3.6 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)***

Para la creación de los archivos de CAD correspondientes a este prototipo, se utilizó el software de diseño SolidWorks, paquete con licencia que tiene el GMM. Es importante mencionar que para facilitar este proceso, fue muy útil la descomposición funcional realizada, pues se inició el proceso de desarrollo de cada una de las partes que se relacionan con las funciones específicas de la micromáquina.

Para el proceso de diseño, en primer lugar, se pasó a CAD la micromáquina tal y como está construida. Esto permite realizar el rediseño de la máquina y así evitar la manufactura de piezas que no fueran necesarias para la construcción de la máquina, y que en un futuro, ayudará a la reducción del número de piezas en la micromáquina.

Dentro de las principales herramientas que el CAD nos proporciona es el uso del diseño paramétrico, que consiste en colocar relaciones a cada una de las dimensiones de las piezas para así, al modificar alguna de estas, sea más sencillo adecuarla al resto de las piezas de la micromáquina, para su correcto ensamble.

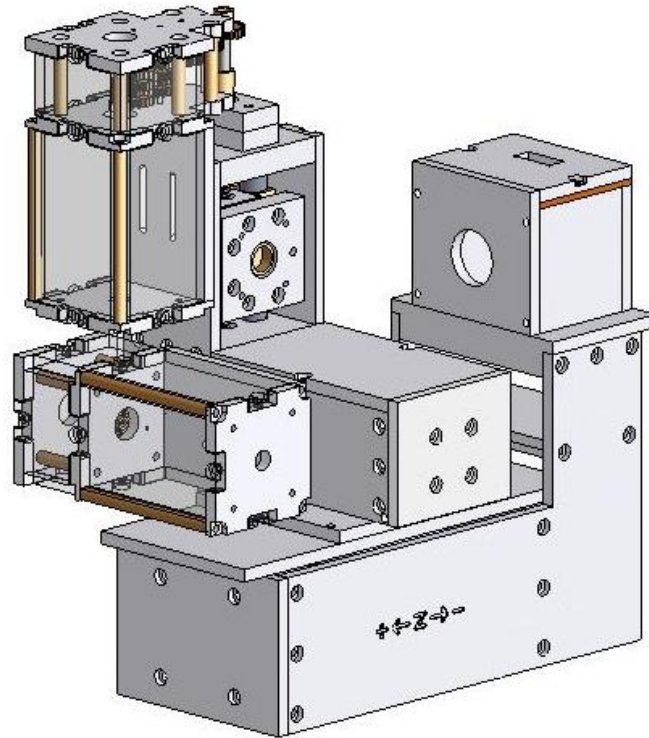
Otro gran beneficio del uso de sistemas CAD es el contar con un modelo dinámico, ya que las relaciones de posición que permiten ensamblar las piezas de la micromáquina dentro de CAD, nos permite visualizar su movimiento, así como los problemas de ensamble que pueda tener al hacer el prototipo físicamente, y así evitar realizar manufactura innecesaria.

Dentro del CAD se realizaron todos las piezas que fueron llevadas a la manufactura y conforman el nuevo prototipo de micromáquina herramienta.

En la figura 3.10 se muestra el ensamble general del nuevo prototipo de micromáquina desarrollado en sistemas CAD, con las nuevas modificaciones hechas al primer prototipo. Adicionalmente a esta imagen, en las figuras contenidas en el subcapítulo “Diseño de detalle”, contenido en este capítulo de este trabajo de tesis, se muestran algunos otros ejemplos de las piezas realizadas en CAD.

Por otro lado, es importante considerar las tolerancias geométricas de la máquina, ya que el modelo en CAD es un modelo perfecto, pero al llevarla a la manufactura,

es prácticamente imposible obtener la perfección que un software nos puede brindar. Esto último se menciona con detalle en las página 48 y 49.

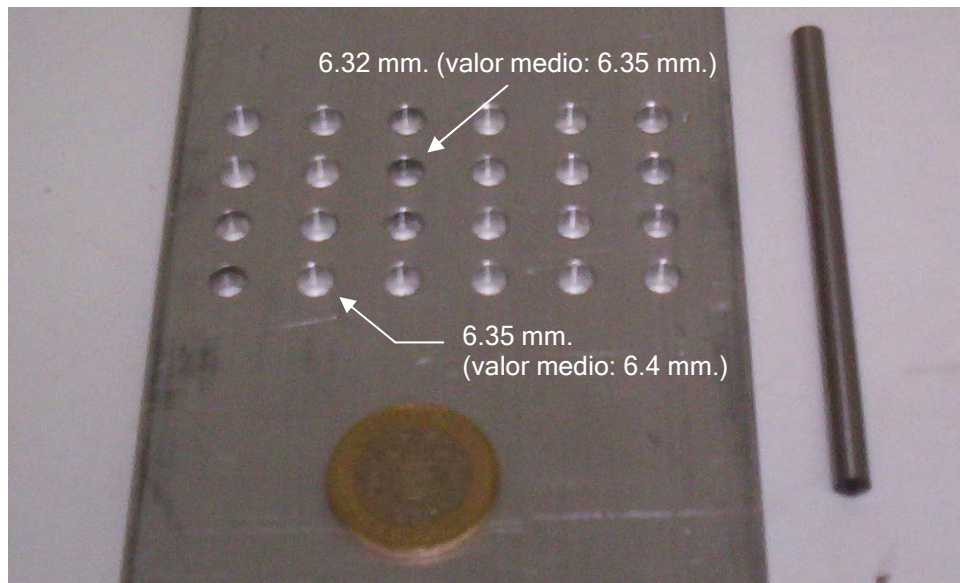


*Figura 3.10 Ensamble en CAD de la micromáquina herramienta*

### ***3.7 MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)***

Posteriormente al diseño del modelo en CAD, siguió el proceso de CAM. Sin embargo, antes de involucrarse directamente a esta etapa, se tuvieron que realizar unas pruebas en la máquina de control numérico, para determinar las tolerancias que se deben considerar en el diseño. Esto es, debido a que en la mayoría de los casos los resultados de la manufactura no son los esperados en el diseño hecho en CAD. Como se mencionó anteriormente el modelo en CAD es un modelo perfecto, y que es prácticamente imposible obtenerlo a la perfección al llevarlo a la manufactura, debido a factores, como los atribuidos a los espesores del material, al pandeo de las soleras, así como a errores de precisión y exactitud de las maquinas utilizadas.

Una de las pruebas realizadas fue la hecha a las piezas que llevan montadas las guías sobre las que corren los carros, las barras redondas rectificadas quedaban muy holgadas, por lo que al ensamblarlas, se observaba un poco de juego, lo que es muy perjudicial para el correcto funcionamiento de la máquina. Por ello, se tuvo la necesidad de hacer una serie de pruebas con la máquina para saber cual era la medida teórica con la que la máquina lograba los valores deseados en la práctica (fig. 3.11). Es importante mencionar que los valores mostrados en la figura, son los valores teóricos que tuvieron que darse a la máquina, para que hiciera las circunferencias y así obtener los valores reales mostrados entre paréntesis.

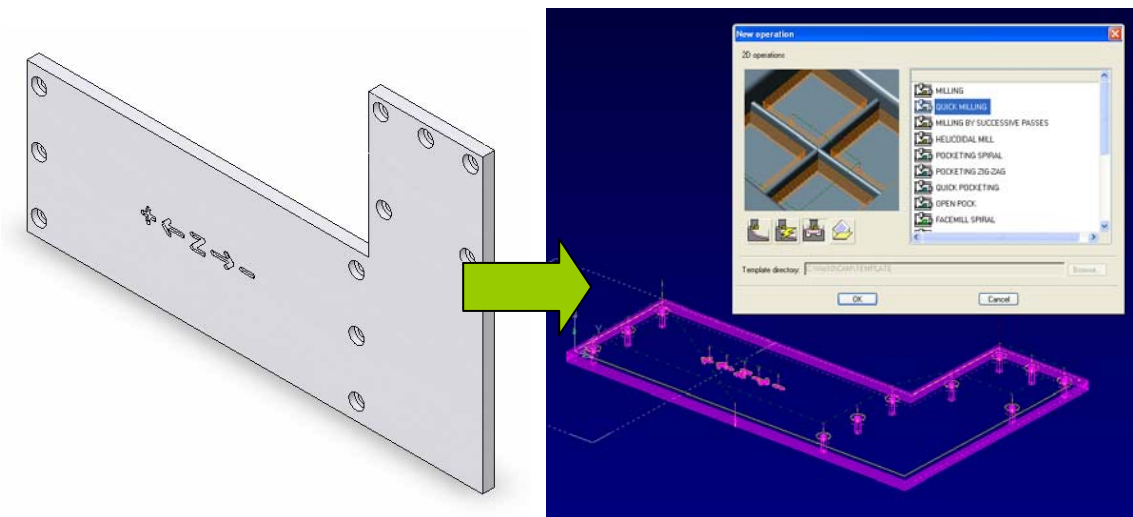


*Figura 3.11 Pruebas para obtener la medida correcta para el ensamble de las guías de los carros.*

Según las pruebas, la medida teórica deseada para el correcto asentamiento de las barras redondas rectificadas de 1/4" (6.35 mm) fue de 6.32 mm, que al realizar la manufactura, daba un diámetro medio de aproximadamente 6.35 mm. Esto indica dos principales aspectos a considerar: la máquina tiene un error hacia arriba aproximado, en ambos ejes de 15 micrómetros, y por otro lado, se habla de un diámetro medio pues se puede ver, al realizar las mediciones, que existe excentricidad al realizar circunferencias utilizando un cortador para hacer cajas.

Ya determinados los errores atribuidos a la manufactura, comenzamos con el uso del software VisiCam, el cual fue adquirido junto la máquina de control numérico que se cuenta con el GMM.

En esta etapa primero, se generaron los archivos propios del paquete de CAM, provenientes de los archivos de SolidWorks, exportados bajo la extensión Parasolid, (\*.X\_T) e importados por el programa en CAM, bajo la misma extensión. La forma de trabajar con el programa de CAM, es localizando los perfiles de las piezas exportadas de SolidWorks, con la finalidad de saber cuales serán en un futuro las trayectorias que las herramientas deben seguir según la manufactura deseada. Posteriormente se definen las alturas o profundidades de las piezas y finalmente se generan las trayectorias de corte correspondientes (figura 3.12).

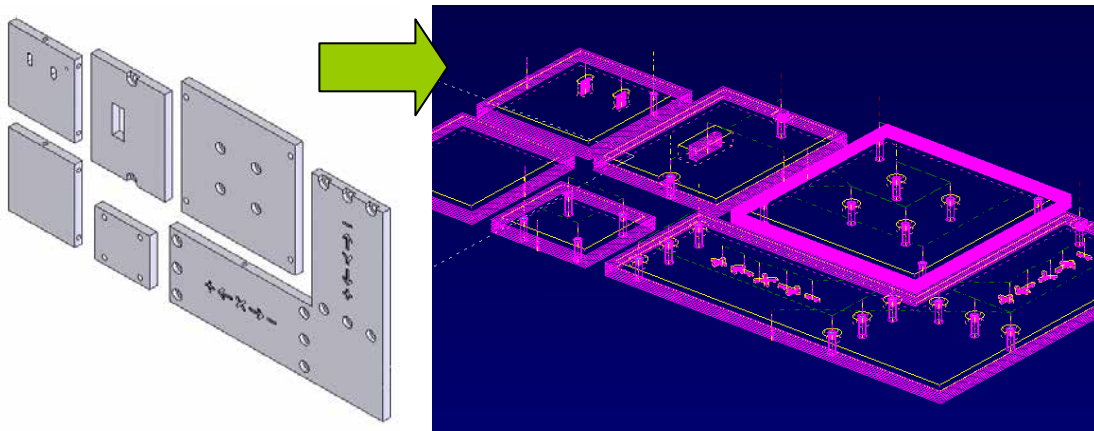


*Figura 3.12 Exportación de CAD a CAM y generación de las trayectorias de corte*

Es importante considerar las herramientas a usar para el proceso de manufactura, ya que debemos tomar en cuenta los diámetros, alturas, parámetros de corte y tipo de herramienta a utilizar, así como espesores y tipo de material a maquinar, para el correcto desarrollo de los programas. Se buscó, en la medida de lo posible, dar una larga vida a las herramientas, para así obtener un óptimo proceso de manufactura, mejorar los tiempos de producción y reducir los costos.

Por último podemos obtener el programa en código de control numérico en este mismo programa de CAM. Dicho código, se obtiene utilizando un postprocesador compatible con un controlador FANUC convencional, el cual es compatible a su vez con el controlador de la máquina del GMM.

Otra aportación de este trabajo de tesis fue la exportación de varias piezas en un mismo archivo, lo que nos da la oportunidad de realizar la manufactura por camas, que nos ayudará a reducir tiempos de manufactura, mano de obra y a disminuir el gasto de material (Figura 3.13).



*Figura 3.13 Exportación de CAD a CAM de varias piezas para su manufactura (Camas de manufactura)*

Al utilizar camas de manufactura, se tuvieron que acomodar las piezas de la MMH a lo largo de los tramos de solera. Este acomodo se realizó tomando en consideración el espesor de las piezas, el tamaño de estas para que alcanzara el mayor número de estas por tramo y que preferentemente pertenecieran a una misma función. Para esto se consideraron también el diámetro de las herramientas a utilizar, así como la entrada del cortador al material.

Finalmente, actualmente existe una propuesta de maquinado en la cual, para obtener buenos acabados, se recomienda realizar con el cortador penetraciones poco profundas en el material por pasada, y por tanto utilizar altas revoluciones por minuto en el husillo. Nosotros utilizamos en promedio, una velocidad de corte de

29.92 [m/min], y un avance por diente de 0.021 [mm]. Esto lo obtenemos de las siguientes fórmulas, de acuerdo a los parámetros utilizados en una de las herramientas:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{1000} = \frac{\pi \cdot 3.175 \cdot 3000}{1000} = 29.92[\text{m/min}]$$

$$A_z = \frac{A_{\min}}{N \cdot Z} = \frac{280}{3000 \cdot 4} = 0.0233[\text{mm}]$$

Donde:  $V_c$  = velocidad de corte (m/min)  
 $d$  = diámetro de la herramienta (mm)  
 $N$  = número de revoluciones por minuto (rpm)  
 $A_z$  = Avance por diente (mm/z)  
 $A_{\min}$  = Cantidad de avance (mm/min)  
 $Z$  = número de dientes

Para la base de datos, es necesario generar el código de control numérico también de pieza por pieza, que permite en dado caso que se tenga la necesidad de reemplazar o rehacer una sola pieza, represente menos pérdida de tiempo y de material que si se hace todo el conjunto de piezas.

### ***3.8 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO***

Finalmente se comenzó la manufactura del microequipo. El proceso de manufactura se realizó con ayuda de una máquina de control numérico, así como herramientas de mano. El equipo de control numérico que se va a utilizar para realizar la manufactura es el modelo 1007 (lo que indica que tiene un área de trabajo de 10 x 7 pulgadas) de la empresa DynaMechtronics (figura 3.14).

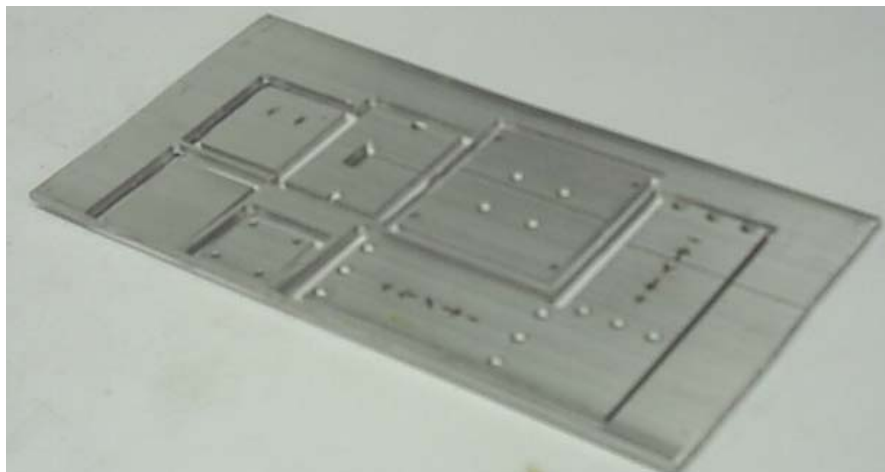
Generados los programas de control numérico, se utilizan llevan a la máquina para así realizar la manufactura. En la figura 3.15 se muestra la cama de manufactura



ejemplificada en CAD y CAM en la figura 3.13, ya realizada en la máquina de CNC.



*Figura 3.14 Máquina de CNC empleada para la manufactura del microequipo*



*Figura 3.15 Manufactura de algunas piezas de la micromáquina*

Realizar las camas de manufactura sólo es parte del trabajo final de manufactura, pues involucra la mayoría de las piezas estructurales de la micromáquina herramienta, sin embargo, también eran necesario realizarse barrenos laterales en los cantos de algunas piezas, puesto que aquí se deben ensamblar.

Por otro lado, también es importante considerar la manufactura de las cuerdas para los tornillos que ensamblaran la máquina, por lo que es necesario contar con la herramienta adecuada.

Adicionalmente a esto, se debe contemplar la manufactura de algunas piezas de revolución, piezas realizadas a mano, y que son fundamentales para el movimiento de los carros de caja eje.

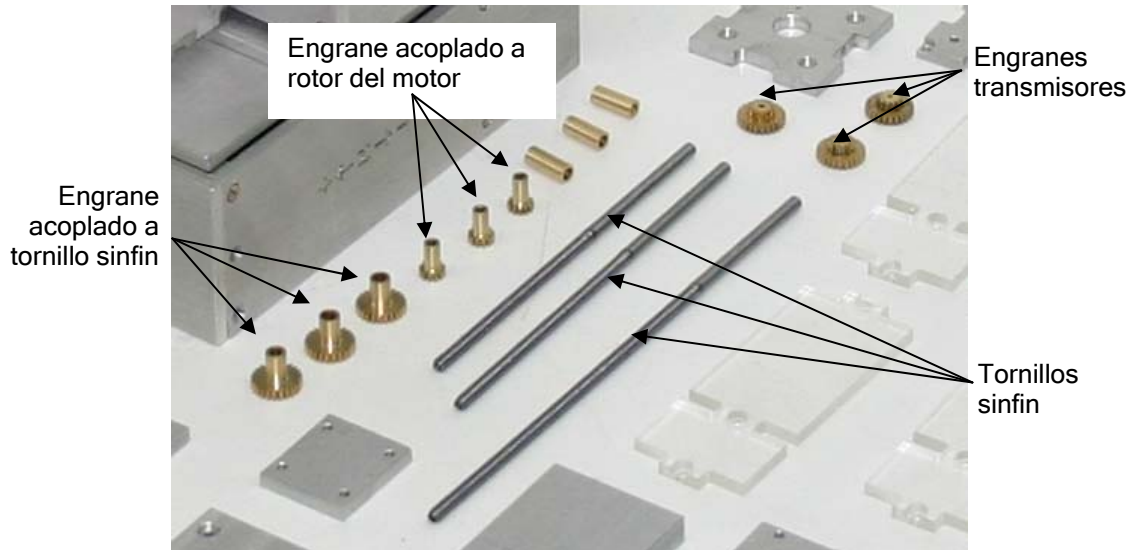
Finalmente, también debe considerarse la manufactura de las transmisiones. La cual incluye los procesos de unión de los engranes transmisores. Se adquirieron barras de engrane de 24 y 12 dientes con un módulo de 0.4 mm, y para armar los juegos de engrane-piñón, se cortaron tramos de 2 mm. de las barras de engrane y se unieron mediante una varilla pasada por ambos tramos. Es una parte mu laboriosa, ya que los engranes son pequeños y difíciles de manipular (figura 3.16).



*Figura 3.16 Manufactura y ensamble de los engranes*

Por otro lado la fabricación de los tornillos sin fin es otra tarea sumamente laboriosa, ya que son piezas muy largas y de muy poco diámetro exterior, por lo que hay que tener mucho cuidado al fabricarlos, para evitar cualquier tipo de flexión en las barras, que es perjudicial para el correcto funcionamiento de la micromáquina herramienta.

En la figura 3.17 se muestran algunos ejemplos de las piezas de revolución, así como los engranes y tornillos sinfín realizados bajo procesos manuales.

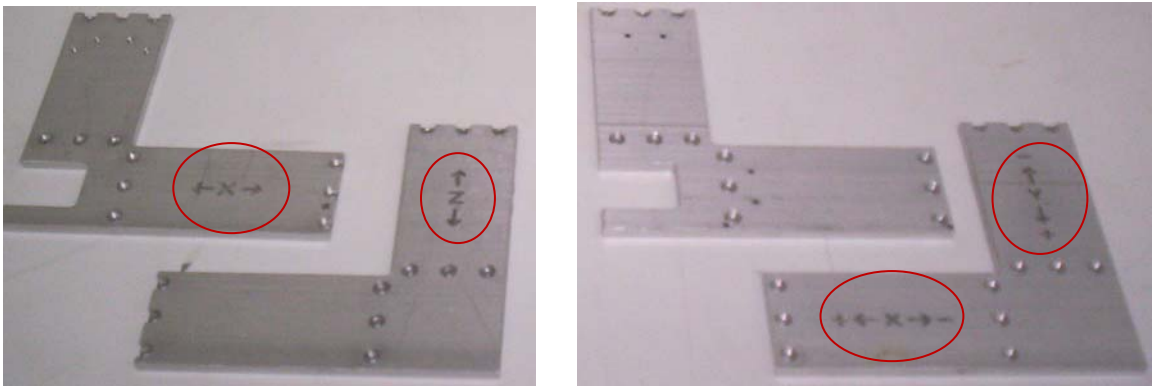


*Fig. 3.17 Algunas piezas fabricadas con herramientas convencionales*

Por otro lado, a lo largo del proceso de fabricación, se tuvieron que modificar algunas piezas. El proceso de fabricación se llevaba a cabo de la siguiente forma: primero se realizaba el diseño de las piezas en CAD, se pasaba a la parte de CAM y ya con el programa de CNC, se llevaba a cabo la manufactura. Posteriormente se consideró un proceso de rediseño, donde se realizaba nuevamente la manufactura, con la finalidad de detectar y solucionar los errores que existieron a lo largo del proceso de desarrollo final del prototipo. Algunos ejemplos son mencionados a continuación.

En la figura 3.18 se puede observar a la izquierda que en un principio, los ejes fueron únicamente marcados mostrando dirección de movimiento, pero no sentido, además de que cuentan con barrenos para el ensamble de la antigua caja de reducción. A la derecha, se observan cuatro modificaciones importantes: en las mismas piezas: en primer lugar, los ejes muestran ya el eje del que se trata y la dirección y sentido, para un mejor manejo de la micromáquina; en segundo lugar, hay una modificación en los ejes, ya que al adoptar la convención de máquinas de

CNC, para este microcentro de maquinado, el arreglo de los ejes cambia con respecto al adoptado en la anterior micromáquina, cambiando el eje Y por el eje Z y viceversa; en tercer lugar, se adoptan nuevos barrenos para ensamblar las nuevas cajas de reducción; y finalmente, si se colocara el motor en el lugar correspondiente, no podrían observarse las marcas del eje traslacional, por lo que se pasa dicha marca a la otra pieza para así visualizarla sin problemas.

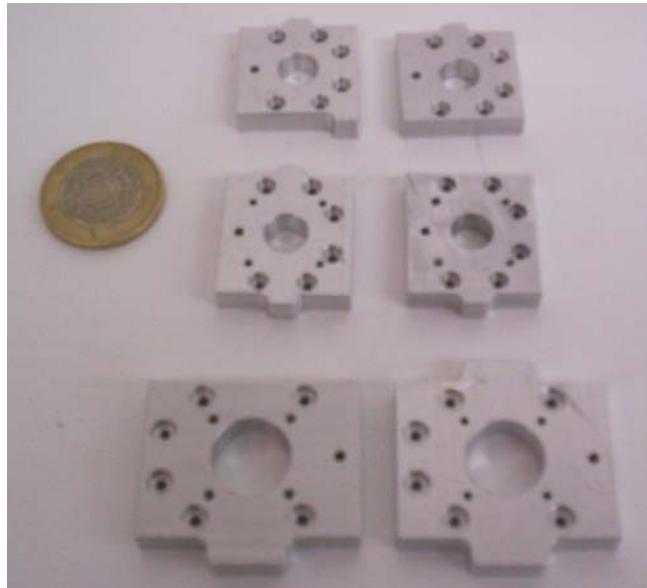


*Figura 3.18 Modificaciones a los ejes después de haber realizado la manufactura*

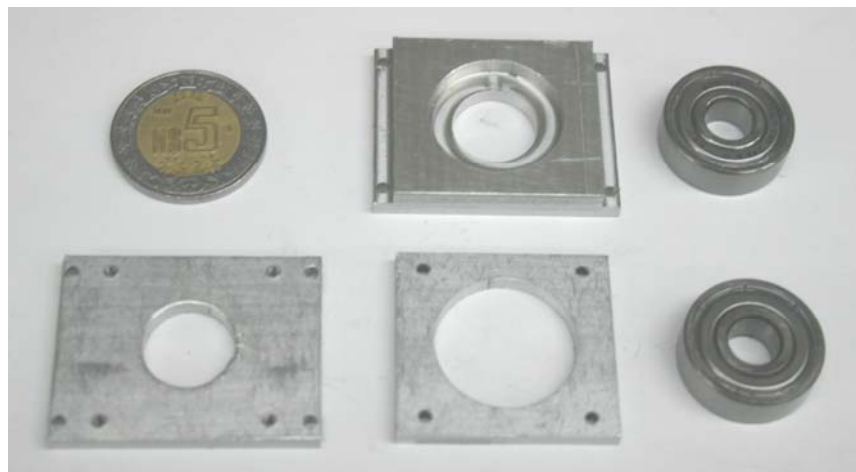
En la figura 3.19 se observan las piezas de los tres carros según la zona donde estén colocados los sensores de contacto que servirán para identificar los límites de la máquina. Las piezas que solo cuentan con una sola protuberancia, la cual funcionará para tocar los sensores de contacto, se habían considerado, como en la primera máquina, únicamente al inicio de la carrera de cada eje, con la finalidad de localizar el cero absoluto de la máquina. Posteriormente, se vio la necesidad de colocar límites a la máquina al final de la carrera para evitar colisiones, por lo que fue necesario implementar dos sensores en cada carrera de los ejes, lo que se vio reflejado en un rediseño de la máquina.

En la figura 3.20 se observa en la parte superior, una pieza puede cubrir la misma función que las dos piezas que se muestran en la parte inferior. En el eje rotacional, las piezas frontal y posterior de la caja que envuelve a la transmisión estaban formadas por dos piezas mostradas en la parte inferior de dicha figura, sin embargo, para optimizar tiempo de manufactura y evitar el uso de cuando menos

cuatro tornillos en cada ensamble, se cubre dicha función con sólo una pieza, lo que nos ayuda a tener piezas más sólidas, y con menor error, ya que no requiere de un ensamble adicional para poder colocarla dentro del ensamble general.

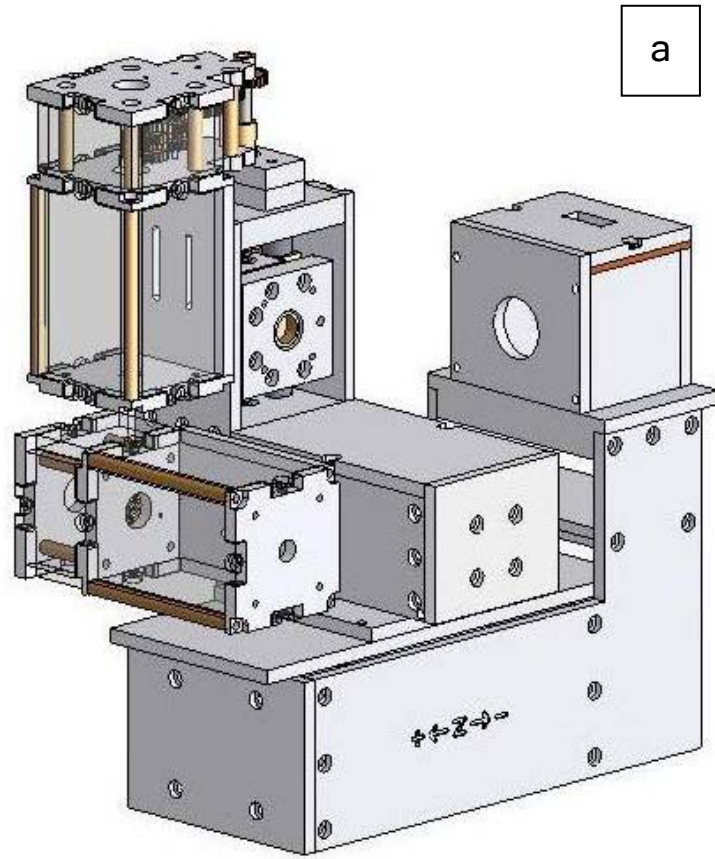


*Figura 3.19 Modificaciones a los carros después de haber realizado la manufactura*



*Figura 3.20 Modificaciones al eje rotacional después de la manufactura*

Finalmente, se presenta en la figura 3.21a una imagen del prototipo realizado en CAD, y en la figura 3.21b, se muestra una fotografía del prototipo real, observando la gran similitud existente entre ambas imágenes.



*Fig. 3.21 Comparación entre el modelo en CAD y el prototipo real*

A graphic for Chapter 4, consisting of a grey square. At the top, the word "CAPÍTULO" is written in white, italicized, uppercase letters. Below it, the number "4" is written in a large, white, sans-serif font.

## ***PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS***

*En este capítulo se describe el equipo construido y se muestran imágenes del mismo. De igual manera se realizan las pruebas a este trabajo de tesis.*

### ***4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO***

El prototipo desarrollado corresponde a un microcentro de maquinado con movimiento lineal. En la figura 4.1 se presentan los prototipos construidos, uno armado y otro completamente desarmado. Las dimensiones de la micromáquina son de 120 x 160 x 85 mm, sin contar con las etapas de potencia y control.

El prototipo fue manufacturado en su mayoría con una máquina de control numérico, y el resto como con máquinas herramienta convencionales. Sus partes estructurales, son en su mayoría de solera de aluminio 6063 temple 5 de 3.125 y 6.35mm (1/8" y 1/4" respectivamente), placa de latón de 6.35mm (1/4"), placa de acrílico de 3 mm, así como barras de latón de 3/8", barra de acero de 1/8", realizando el ensamble de la máquina con tornillos de 2 mm.

Para los movimientos translacionales (tres ejes ortogonales), se tendrán arreglos de motor de pasos, reductor de velocidad (1:128), tornillo de avance (paso de 0.5 mm por revolución) y guías con carros; obteniendo de esta manera un sistema de

fácil armado y con una resolución teórica mínima de  $0.976 \mu\text{m}$  por cada paso de avance del motor, suponiendo un motor de 4 pasos.



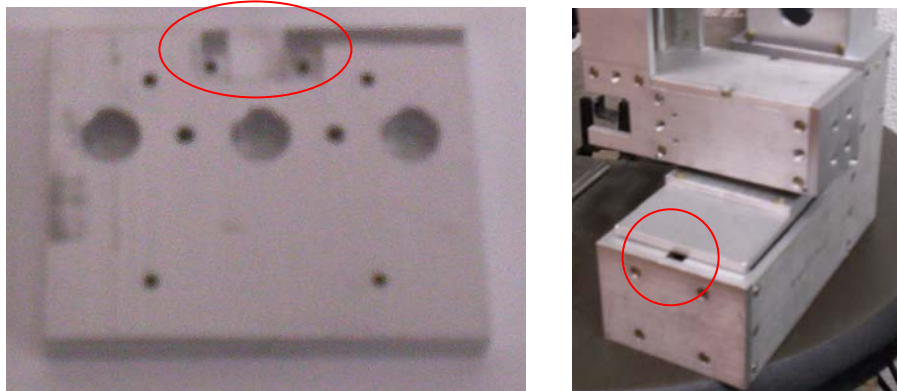
*Figura 4.1 Prototipo manufacturado*

El desplazamiento total de cada eje varía en función del eje de trabajo del que hablemos, de tal suerte tenemos: 15 mm de desplazamiento en el eje X, 10 en el Y, mientras que para el eje Z se definió con la misma configuración un desplazamiento de 60 mm. Según las especificaciones dadas, el desplazamiento mínimo solicitado en los ejes X y Y fuera de 15 mm, sin embargo, el desplazamiento en el eje Y, al final de este proceso fue de 10 mm. Esto se debe a la implementación de los sensores de contacto por dentro de la micromáquina, ya que la pieza que hace contacto con dichos sensores, tiene dos protuberancias de 2.5 mm cada una. Sin embargo, aún cuando esta especificación no se cumplió, no resulta tan importante, ya que la máquina tanto en modo de torno como de centro de maquinado, cubre el área de trabajo mínima. Uno de las principales trabajos a futuro a realizar, es el de obtener nuevamente el área de trabajo solicitada en estas especificaciones.

Cuenta con sensores de contacto al final de la carrera de cada eje translacional, los cuales determinan los límites de desplazamiento de la micromáquina, así como sensores ubicados al inicio de la carrera, le permitirán encontrar sus referencias.



Se implementaron cavidades en algunas piezas de la MMH, para alojar los sensores por dentro de la máquina, con la finalidad de evitar tener cables de componentes electrónicos en el área de trabajo (figura 4.2). En la figura también podemos observar un pequeño canal por el cual, pasarán los cables de dichos sensores. Este tipo de aportaciones se dan principalmente por el uso de máquinas de control numérico.



*Figura 4.2 Cavidad para que los sensores se alojen dentro de la micromáquina*

Se implementaron módulos de transmisión en los que esta considerado el alojamiento del motor, así como de la caja reductora, basando en esta ocasión el diseño, en la distancia entre centros de los engranes, para su correcto funcionamiento (figura 4.3). Se implementaron también piezas de acrílico con la finalidad de cubrir al motor de residuos de futuros maquinados que se realicen en la micromáquina.

Este prototipo cuenta con un estimado de 480 piezas, sin contar motores, lo que muestra una reducción de piezas respecto a la anterior máquina herramienta, que tenía un aproximado de 700 piezas, considerando el prototipo completo.

En general, se estandarización de medidas, se alinearon barrenos, se implementaron cajas para la cabeza de los tornillos, se minimizaron los puntos de anclaje, se eliminaron piezas innecesarias, se conservó, en la medida de lo posible la sencillez de diseño, se redujo el trabajo manual, se incremento la resolución

teórica de la MMH y finalmente, se dejó una base de datos con los archivos de CAD y CAM, así como de guías de manufactura, para el desarrollo de este prototipo.



*Figura 4.3 Módulo de transmisión y motor*

## **4.2 PRUEBAS**

Las pruebas realizadas para la evaluación de este trabajo de tesis fue su aplicación para la reproducción de una nueva micromáquina herramienta, en donde se evaluó el tiempo de desarrollo. El tiempo dedicado para este trabajo de tesis, y por tanto, para el desarrollo de la micromáquina utilizando sistemas CAD y CAM, fue de aproximadamente 800 horas distribuidas a lo largo de un año de trabajo. Este tiempo es considerado como de desarrollo inicial.

La forma de evaluar el tiempo de desarrollo buscado, se hace contemplando los tiempos de manufactura de las piezas, corte de materiales, cambio de herramientas, fabricación de piezas de revolución, machueado, rebabeado y

ensamblado. Los tiempos del proceso completo se muestran en la tabla 4.1, que se encuentra al final de este capítulo.

El tiempo final de desarrollo de una micromáquina herramienta es de aproximadamente 80 horas. Los tiempos mostrados para el desarrollo de esta micromáquina fueron medidos del trabajo de una sola persona, y haciendo la mayoría de los procesos en serie.

Es muy importante mencionar, que es posible realizar varios procesos en paralelo, lo que ayudaría al reducir, en gran proporción, el tiempo de desarrollo de la micromáquina herramienta.

Con esto, se observa que este trabajo de tesis permite desarrollar micromáquinas herramienta con características similares en poco tiempo comparado con el desarrollo inicial, de tal forma que esto podría ser el primer paso para una futura comercialización de la micromáquina.

### ***4.3 COSTOS***

El costo en materiales fue de aproximadamente \$100 usd (tabla 4.2), sin contar la parte de motores, mientras que el tiempo efectivo de trabajo invertido para el desarrollo inicial fue de aproximadamente 800 horas, distribuidas a lo largo de un año. Sin embargo, el tiempo de desarrollo para la construcción de más micromáquinas de ese tipo es de aproximadamente 80 hrs, como se mencionó anteriormente, lo que significa un avance significativo para el desarrollo de micromáquinas.

Al momento de presentar este trabajo existen diferentes opciones de máquinas para micromaquinados tridimensionales, que ya se encuentran en el mercado. Algunos ejemplos de estos sistemas son:

<i>Proceso</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tiempo [h]</i>
Corte de material	Corte de placas de aleación de aluminio 6063, 1/4" y 1/8", placas de latón de 1/4" y de placa de aluminio comercial de 3/8".	1:00
Manufactura Cama A1	Manufactura de piezas de la micromáquina de placas de 1/8" de aleación de aluminio 6063.	1:30
Manufactura Cama A2		1:15
Manufactura Cama A3		1:15
Manufactura Cama A4		2:30
Manufactura Cama A5		1:45
Manufactura Cama A6		2:15
Manufactura Cama B1	Manufactura de piezas de la micromáquina de placas de 1/4" de aleación de aluminio 6063.	3:00
Manufactura Cama B2		2:30
Manufactura Cama C1	Manufactura de piezas de la micromáquina de 4.7625 mm obtenidas de placas de 1/4" de aleación de aluminio 6063.	1:30
Manufactura Cama D1	Manufactura de piezas de la micromáquina de placas de 3 mm de acrílico.	1:30
Manufactura Cama D2		1:30
Manufactura Cama E1	Manufactura de piezas de la micromáquina de 2.24 mm obtenidas de placas de 1/8" de aleación de aluminio 6063.	1:00
Manufactura Cama F1	Manufactura de guías de carros de placas de 1/4" de latón.	2:00
Corte de Barras rectificadas	Corte de barras rectificadas y desbaste de ellas para tenerlas del tamaño deseado.	3:00
Manufactura de tornillos sinfín para ejes	Fabricación de sin fines de la máquina a partir de una barra de acero de 1/8".	5:30
Manufactura de tuercas para carros	Fabricación de tuercas cilíndricas para el desplazamiento de los carros.	1:00
Manufactura de soportes para carros	Fabricación de los soportes de las tuercas cilíndricas.	8:00
Barrenos laterales	Realización de barrenos localizados en los cantos de algunas de las piezas.	9:00
Manufactura de piezas de revolución	Fabricación de las piezas de revolución, para ensamble de la máquina (postes, bujes, etc.)	2:00
Fabricación de engranes transmisores	De barras de engrane de 24 y 12 dientes, se obtienen rebanadas, que se unen por medio de un perno, y así obtener los engranes utilizados en la transmisión de la MMH.	6:00
Machueado de barrenos	Algunos barrenos llevan un proceso de machueado para el ensamble de la MMH.	8:00
Rebabeado de piezas	Las piezas, después de la manufactura necesitan ser limpiadas de la viruta que queda añadida a ellas.	3:00
Ensamble de la MMH	Ya obtenidas todas las piezas de la MMH, se utilizan tornillos de 2 mm de diámetro de diferentes largos, así como balines de 1/8"	10:00

*Tabla 4.1 Tiempo de desarrollo de nuevas MMH's*

- CNC High Precision Micro Milling and Drilling Maching, Kern 2522. Este equipo cuenta con 3 ejes de movimiento con 250 mm de desplazamiento por eje y una resolución de 100 nm, y un costo de €120,000.
- Ultra Small CNC Precision Lathe, MTS2, NanoWave, NanoCorporation. Este equipo cuenta con un tamaño de 150 mm por 100 mm, una longitud máxima de torneado de 10 mm y una resolución de 200 nm. El costo del equipo es de \$35,000 USD.

<i>Material</i>	<i>Descripción</i>	<i>Costo [USD]</i>
Solera 1/8" de aluminio 6063 T5	Piezas estructurales de la máquina	10
Solera 1/4" de aluminio 6063 T5	Piezas estructurales de la máquina	20
Solera 1/4" de latón	Piezas de los carros que se desplazan sobre las guías redondas	3
Barra redonda 1/8" de Cold Rolled	Tornillos sinfin	2
Barra redonda 1/4", 3/8" y 5/8" de latón	Piezas para transmisión en carros	10
Barras gorton 1/4"	Guías redondas paralelas	20
Placa de acrílico 3 mm.	Cubiertas de motor - transmisión	5
Barra engrane 12 dientes	Engranajes transmisores	7
Barra engrane 24 dientes	Engranajes transmisores	13
Tornillos M2x0.4	Tornillos de diferentes medidas para ensamble	10
TOTAL		100

*Tabla 4.2 Costo aproximado de los materiales utilizados en la MMH*

Esto nos muestra que el costo de estos equipos excede en varios órdenes de magnitud el costo de materiales del prototipo presentado. Es de suponerse que únicamente en producciones muy grandes, el costo en materiales puede representar el costo final de venta [1], sin embargo la selección de procesos convencionales de manufactura y el uso de sistemas económicos para el control y evaluación, permite estimar que el costo final de venta del producto pudiera verse incrementado en un orden de magnitud, con lo que en comparación con el par de ejemplos citados, representa la opción que ofrece la mejor relación costo beneficio.



## ***CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO***

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

### **CONCLUSIONES**

La experiencia obtenida del desarrollo de microequipo, así como las recomendaciones de diseño aportadas en la fabricación de prototipos realizados por el GMM, son actualmente la base para el desarrollo de nuevos productos dentro del ámbito de la micromecánica de bajo costo.

Como resultado de este trabajo de tesis, se desarrolló una nueva versión del primer prototipo de microcentro de maquinado de bajo costo con una configuración de tres ejes translacionales ortogonales, y uno rotacional. Cuenta con cajas reductoras con una relación 1:128, y considerando un motor a pasos, de 24 pasos por revolución, la resolución teórica de la micromáquina es de 163  $\mu\text{m}$ . El costo de este microcentro de maquinado es de aproximadamente \$100 USD (tabla 4.2), sin contar la etapa de control y los actuadores.

También se deja una base de datos con los archivos necesarios para la producción de nuevas micromáquinas herramienta con las mismas características.

Como etapa de pruebas a este trabajo de tesis se construyó una máquina adicional a la realizada durante el desarrollo, con la finalidad de evaluar el tiempo para construir nuevas MMH's, que en este momento es de 80 horas, aproximadamente una décima parte del desarrollo inicial (800 horas aproximadamente). Esto significa un gran avance para el GMM en el desarrollo de microequipo.

El proceso de manufactura utilizado para la construcción de esta micromáquina se considera óptimo de acuerdo a la infraestructura con la que se cuenta en el GMM. Sin embargo, para la construcción de micromáquinas con mejores propiedades estructurales, así como para la construcción de un mayor número de estas, de acuerdo a las necesidades del grupo, será necesaria la búsqueda de otros procesos de manufactura masiva.

Finalmente, como resultado de este trabajo, se dejan manuales de usuario para la máquina de control numérico, se dejan los programas de CAM, utilizados para la construcción de estos prototipos, y un manual para la construcción de MMH's como las desarrolladas a lo largo de este trabajo de tesis.

## **TRABAJO A FUTURO**

Actualmente se encuentra en desarrollo un sistema de control para esta MMH, que está basado en código estándar de CNC.

Durante el desarrollo de esta MMH, se identificó la necesidad de buscar nuevas configuraciones de mecanismos, así como técnicas de ensamble, para futuras

generaciones de microequipo, específicamente las relacionadas con el juego mecánico.

De igual forma, es conveniente buscar nuevas técnicas para el desarrollo de microequipo, y no sólo quedarse en la manufactura convencional. Hay muchas técnicas que pueden resultar viables para el desarrollo de MMH's.

Resulta conveniente buscar métodos más eficientes para la fabricación de las piezas de revolución, ya que estas aun siguen haciéndose a con máquinas herramienta convencionales.

Se propone recuperar área de trabajo (propuesta en las especificaciones) de los ejes X y Y. Además, se propone que al menos, estos dos carros sean iguales, es decir, buscar la modularidad en la máquina.

Se está trabajando en la aplicación de los sistemas CAD y CAM para el desarrollo de los motores, y así mejorar las prestaciones de estos.





## ***REFERENCIAS***

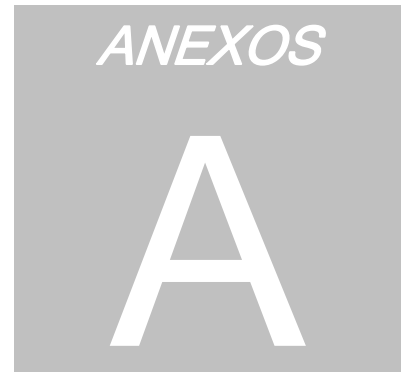
*Se presentan los artículos y libros utilizados en el desarrollo de este trabajo*

- [1] Leopoldo Ruiz Huerta. *Desarrollo de microequipo para células de manufactura*. M. en I. Tesis de doctorado, área mecánica. Abril 2005
- [2] Leopoldo Ruiz Huerta. *Diseño y construcción de un microcentro de maquinado de bajo costo*. Tesis de maestría, área mecánica. 2000
- [3] Alberto Caballero Ruiz. *Caracterización de un microcentro de maquinado de bajo costo*. Tesis de maestría, área mecánica. Septiembre 2000
- [4] Ishikawa Yu., Kitahara T. *Present and future of Micromechatronics*. 1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science.
- [5] E. M. Kussul, D. A. Rachkovskij, T. N. Baidyk, et al. *Micromechanical engineering: a basis for the low cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment*, 1996.
- [6] *Micromachine Center, Application of Micromachine Technology (II)*, Micromachine Magazine, Japón

- [7] Okazaki, Kitahara. *Micromachine tool to machine microparts*, Proc. ASPE Annual meeting, 2000
- [8] E. M. Kussul, L. M. Kasatkina. *Los problemas de desarrollo de máquinas herramientas controladas por computadora para fábricas micromecánicas sobre mesa. Sistemas de control y computadoras*, 1998.
- [9] M. Takana, *Development of desktop machining Microfactory*, Riken Review, No. 34, April 2001, Japan
- [10] Ruiz Huerta L., Caballero Ruiz A., Marín Aguilar E., Velasco Herrera G., Baidyk T., Kussul E.; *Parallelogram Micromachine for low cost Micromechanics*, ASME International Mechanic Engineering Congress and RD&D Expo; Anaheim, California
- [11] 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*, X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM); México, 2004.
- [12] 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)*, St. Petesburg, 2000
- [13] Ruiz Huerta Leopoldo, Caballero Ruiz Alberto. Presentación del GMM, 2006-2007. CCADET, UNAM
- [14] Leopoldo Ruiz Huerta. *Desarrollo de microequipo mecánico para células de manufactura*. XVII Congreso Nacional de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI); Mérida, Yucatán, México, 2002.

- [15] Weck, Manfred; *Handbook of Machine Tools*, Vol. 1, 2 y 3; John Wiley & Sons; 1984.
- [16] Friedrich C.R. and Vasile M.J. *Development of the Micromilling Process for High - Aspect - Ratio Micro Structures. II* J. Microelectromechanical Systems, 1996, pp 33 - 38.
- [17] Alfredo Yáñez Soto. *“Desarrollo de una interfaz computacional para el control de Micromáquinas-Herramienta”*. Tesis de Licenciatura. Marzo, 2007.
- [18] Hatamura, Yotaro; *The practice of machine design*. Oxford Series on Advanced Manufacturing. Great Britain, 1999.
- [19] Herrera-Granados G., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A. *“Aplicación de sistemas CAD y CAM para el desarrollo de una micromáquina herramienta”*. XXI Congreso Nacional de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI); Ensenada, B.C., 2006.
- [20] Washington State University Extension Energy Program and the Western Area Power Administration, Holiday Lights, Fall 2003. Seattle City Light, Holiday Lighting Tips, December 2003.
- [21] Kleindiek Nanotechnik, página de internet
- [22] Micromotor using ECF(Electro-Conjugate Fluid) technology
- [23] V Congreso Nacional, X Congreso Hispano-Luso de la Asociación Española de Microcirugía.
- [24] Seiko Epson Corporation, página de internet.

- [25] Empleo de FPGA's para el sistema de control de motores de pasos bimodales en micromecánica. Muñoz Leines Carlos, Santos Carrasco César. Tesis de licenciatura, área electrónica analógica. Mayo 2003.
- [26] Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. *"Manufactura: Ingeniería y Tecnología"*. 4ª Edición Prentice Hall, México, 2002.



## ***ANEXOS***

*Aquí se presenta una relación de trabajos generados como resultado de este trabajo de tesis.*

### ***ACEPTADO PARA SU PUBLICACIÓN***

- [1] Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A., Herrera-Granados G. *“Avances en el desarrollo de una Micromáquina Herramienta Aplicando Sistemas CAD y CAM”*. Por enviar al 8vo. Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Cuzco, Perú. 2007

### ***MEMORIAS EN EXTENSO ARBITRADAS EN CONGRESOS NACIONALES***

- [1] Herrera-Granados G., Ruiz-Huerta L., Caballero-Ruiz A. *“Aplicación de sistemas CAD y CAM para el desarrollo de una micromáquina herramienta”*. XXI Congreso Nacional de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI); Ensenada, B.C., 2006.