

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## TRABAJO DE DIPLOMA

Concepción y construcción de una  
micro-fresadora CNC de bajo costo



Autora: Liset Cruz Rodríguez

Tutores: Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez  
Ing. Elser Ferrás Santiesteban

2011

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia y a todas las personas que hicieron posible el desarrollo del mismo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis tutores el Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez y al Ing. Elser Ferrás Santisteban por su incondicional apoyo en el desarrollo de mi Trabajo de Diploma.

También hago extensivo mi agradecimiento a todas las personas que me han ayudado de algún modo y me han alentado, y en especial al Ing. Harold Antonio Jaramillo Brucela, Especialista en automática CEDAI Holguín .

## **PENSAMIENTO**

Por mas difícil que se nos presente una situación, nunca dejemos de buscar la salida, ni de luchar hasta el último momento. En momentos de crisis solo la imaginación es más importante que el conocimiento.

Albert Einstein

## **RESUMEN**

El objetivo de esta tesis consiste en demostrar el concepto de micro-máquina, en el caso específico de la operación tecnológica de micro-fresado, para la producción de micro-componentes en la escala de 100 a 10000  $\mu\text{m}$ . En la tesis se describe el proceso de concepción y la construcción de un prototipo de micro-fresadora CNC de 3 ejes que demuestra la factibilidad de utilizar el micro-mecanizado, utilizando un husillo neumático de uso estomatológico y como soporte una estructura de un microscopio óptico. Se concluye con una evaluación de la factibilidad de la propuesta.

## Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1. Marco teórico-conceptual .....	8
1.1    Introducción.....	8
1.2    Generalidades de la micro-manufactura .....	9
1.2.1    Tendencias de investigación en Japón .....	11
1.2.2    Tendencias de investigación en Europa .....	13
1.2.3    Tendencias de investigación en los Estados Unidos de Norteamérica.....	15
1.3    Caracterización del proceso de desarrollo micro-máquinas.....	16
1.4    Conclusiones.....	17
Capítulo 2. Metodología para la concepción de la micro-fresadora de bajo costo ....	18
2.1    Introducción.....	18
2.2    Modelo de referencia para la concepción de la micro-máquina .....	18
2.3    Metodología para el desarrollo de la micro-máquina.....	20
2.3.1    Listado de requerimientos funcionales y especificaciones de concepción	22
2.3.2    Búsqueda de soluciones.....	22
2.3.3    Concepción de una solución .....	22
2.3.4    Factibilidad.....	23
2.3.5    Concepción final .....	23
2.3.6    Caracterización y validación, validación final .....	23
2.4    Conclusiones.....	23
Capítulo 3. Concepción y construcción de la micro-fresadora de bajo costo .....	24
3.1    Introducción.....	24
3.2    Listado de requerimientos funcionales y especificaciones de concepción ...	24

3.3	Búsqueda de soluciones .....	25
3.4	Modelación de los componentes del concepto seleccionado.....	30
3.4.1	Rotor Concentrix III .....	30
3.4.2	Análisis preliminar FEM del rotor Concentrix III .....	31
3.4.3	Modelación del ensamble .....	32
3.5	Descripción del ensamble de la micro-fresadora .....	33
3.5.1	Componentes mecánicos de la micro-fresadora.....	33
3.5.2	Sistema de ejes de la micro-fresadora.....	35
3.5.3	Componentes eléctricos de la micro-fresadora.....	35
3.5.4	Software de control utilizado .....	37
3.6	Análisis económico del prototipo de la micro-fresadora .....	38
3.6.1	Cálculo del costo de las piezas maquinadas .....	38
3.6.2	Costo de los motores paso a paso.....	42
3.6.3	Costo de los componentes electrónicos .....	44
3.6.4	Costo de la base .....	44
3.6.5	Costo del rotor .....	44
3.6.6	Costo del software .....	44
3.6.7	Costo total del prototipo desarrollado. ....	44
3.7	Conclusiones.....	45
CONCLUSIONES GENERALES.....		46
RECOMENDACIONES .....		47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		48

## INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo pasado, se realizaron importantes avances en micro tecnologías. El más significativo fue sin duda la invención del transistor, reconocido con el Premio Nobel de Física a Bardeen, Brattain y Shockley. El transistor tuvo un tremendo impacto en el diseño de circuitos electrónicos, reemplazando las costosas, poco fiables y energéticamente ineficientes válvulas de vacío (AECID, 2011).

A finales de la década de los cincuenta, el eminente físico Richard Feynman publicó un sugerente estudio titulado “*There’s Plenty of Room at the Bottom*”, en el que preconizaba una gran revolución en las tecnologías de miniaturización. Inspirado en el funcionamiento de los sistemas biológicos y su capacidad para ejecutar funciones complejas y almacenar ingentes cantidades de información a nivel microscópico, Feynman especulaba sobre los nuevos campos de aplicación que se abrirían a la humanidad en caso de desarrollar la capacidad de fabricar dispositivos miniaturizados (AECID, 2011).

Las tecnologías de fabricación se desarrollaron inicialmente impulsadas por el auge de la industria de los circuitos integrados. Desde los primeros prototipos creados por Texas Instruments a finales de los cincuenta, los avances en este campo se han traducido en pocas décadas en un notable incremento de la calidad de vida a través de la proliferación de ordenadores, tecnologías de comunicación y electrónica de consumo. Uno de los factores más conocidos en este desarrollo es probablemente el nivel de integración alcanzado en los circuitos, comúnmente expresado a través de la Ley de Moore, según la cual el número de componentes por chip se dobla cada dos años (AECID, 2011).

En la actualidad, la Sociedad demanda la extensión de los éxitos de miniaturización en microelectrónica a otros sectores. La miniaturización conlleva muchas mejoras, entre las que se pueden citar:

- Reducción de energía y consumo de materiales durante la fabricación.
- Ligereza y portabilidad.



- Dispositivos de gran sensibilidad con funcionamiento más selectivo.
- Aplicaciones menos invasivas.
- Mejor relación coste/funcionalidad.

Las micro tecnologías hacen de enlace entre los mundos atómico y macroscópico y desempeñarán un papel muy importante en la industria del futuro, en especial en sectores como la medicina, la biotecnología, la energía y las telecomunicaciones.

Las tecnologías de fabricación se desarrollaron inicialmente impulsadas por el auge de la industria de los circuitos integrados. Desde los primeros prototipos creados por Texas Instruments a finales de los cincuenta, los avances en este campo se han traducido en pocas décadas en un notable incremento de la calidad de vida a través de la proliferación de ordenadores, tecnologías de comunicación y electrónica de consumo. Uno de los factores más conocidos en este desarrollo es probablemente el nivel de integración alcanzado en los circuitos, comúnmente expresado a través de la Ley de Moore, según la cual el número de componentes por chip se dobla cada dos años.

Desde los celulares hasta los implantes médicos, la fabricación de componentes continuamente tienden a ser más pequeños y más complejos. Este desarrollo tecnológico ha originado que la fabricación de estos componentes se realicen en máquinas que fueron diseñadas para producir blocks de motores de combustión interna, piezas para aviones, barcos, etc. (AECID, 2011).

Esta tendencia de miniaturización de piezas es particularmente evidente en los campos de la aviación, biotecnología, comunicaciones, electrónica, medicina, óptica, por solo citar algunos. Es frecuente la utilización de piezas pequeñas de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro con agujeros interiores de 25 a 250  $\mu\text{m}$  y espesores de 25 a 50  $\mu\text{m}$ . Los materiales que más se han utilizado para estas operaciones son los aceros inoxidables, el Titanio, el Aluminio, el Bronce, el Platino y el Iridio (AECID, 2011).

La comparativa en relación a las micro tecnologías entre las tres mayores economías del mundo, Europa, Estados Unidos y Japón, muestra considerables diferencias respecto a políticas de investigación, nivel de aplicación y penetración en el mercado.

Estados Unidos y Japón reconocieron antes que Europa la importancia de las tecnologías micro y nano como el motor para el crecimiento futuro de su sistema industrial. En el caso de las nanotecnologías en particular, los esfuerzos de los americanos y japoneses han sido significativamente más intensos, especialmente en Estados Unidos, que se encuentra liderando varios campos nuevos de aplicación.

No obstante, el énfasis actual de investigación en micro fabricación en Estados Unidos está por debajo del resto del mundo, a pesar de todos los esfuerzos e inversiones anteriores. Este hecho tendrá indudablemente serias implicaciones a largo plazo, puesto que está bien reconocido por científicos e industriales que la micro fabricación será una tecnología crítica para aunar el espacio entre las ciencias a nivel nanométrico con el desarrollo de productos reales (AECID, 2011).

De acuerdo a un estudio de la organización europea NEXUS (Red de Excelencia en microsistemas multifuncionales), el mercado mundial de micro tecnologías está creciendo a un ritmo medio del 11% anual, e irá desde 36.000 millones de dólares en 2005 hasta 52.000 millones en 2009. Este estudio incluye una explosión de mercado para paquetes de primer nivel de MEMS/MST, como cabezales de tinta de impresoras, desde 11.500 millones hasta 25.000 millones de dólares (AECID, 2011).

La miniaturización de componentes ha propiciado el desarrollo de la micro-manufactura. A pesar de los considerables esfuerzos que se han realizado en la fabricación de circuitos integrados y las tecnologías asociadas, el maquinado de ultra precisión y el micro-mecanizado constituyen vías factibles para la obtención de componentes en 3D y con formas complejas (AECID, 2011).

Las micro-máquinas herramientas pueden catalogarse por generaciones de desarrollo o estadios de evolución.

Las micro-máquinas herramientas de primera generación generalmente tienen unas dimensiones globales entre 100 y 200 mm. Sus partes y piezas pueden ser producidos en una máquina herramienta convencional. Utilizando la primera generación de micro-componentes, es posible obtener micro-máquinas herramientas y dispositivos para el micro-ensamble de segunda generación, y así sucesivamente.

Cada nueva generación de micro-máquinas podrá producir componentes más pequeños y así obtener la siguiente generación (E. M. Kussul et al., 2004).

El desarrollo de micro-máquinas comerciales, si bien constituyen una excelente solución para el micro-mecanizado, poseen precios que fluctúan entre 12 000 y hasta un millón de dólares, por lo que se les ha denominado micro máquinas con macro precios (Kurfess, 2006).

Existen algunas experiencias que intentan disminuir estos costos tan elevados, sobre todo en los países que no pueden disponer de estas inversiones. Entre los autores que más han trabajado el tema del desarrollo de micro-máquinas de bajo costo se encuentra Kussul y colaboradores en la Universidad Autónoma de México, en el Distrito Federal (E. Kussul, Baidyk, & Wunsch, 2010; E. M. Kussul, et al., 2004). Estos autores desarrollaron dos prototipos de micro-máquinas herramienta de bajo costo, con un número elevado de piezas y componentes electromecánicos.

Pérez y colaboradores desarrollaron una nueva metodología para el diseño de micro máquinas herramientas reconfigurables en el contexto de los sistemas integrados de desarrollo de productos. Describieron el diseño de una micro-máquina herramienta CNC de dos ejes como prototipo funcional. En el mismo se utilizó un husillo de alta velocidad y actuadores lineales de alta precisión (Pérez, Molina, & Romero, 2010).

De la revisión bibliográfica efectuada se identifica como una **necesidad** para los países en vías de desarrollo, disponer de tecnologías a escala micro para poder estudiar y comprender los fenómenos que ocurren a estas escalas y de esta forma disminuir la brecha tecnológica entre el denominado primer mundo y el tercer mundo.

Esta investigación se encamina a este fin, haciendo énfasis en los procesos tecnológicos de micro-mecanizados, en específico en el micro-fresado.

Se ha identificado como **situación problemática**: ¿Cómo desarrollar micro-tecnologías a bajo costo que permitan demostrar las potencialidades tecnológicas que ofrecen, en el contexto de los países en vías de desarrollo?

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, esta investigación tiene por **objeto de estudio** el proceso de corte de metales por arranque de virutas. El **campo**

de acción de la investigación abarca el estudio del proceso micro-mecanizado en micro-fresadoras CNC.

La investigación plantea como **pregunta científica** ¿Cómo desarrollar una micro-fresadora CNC de bajo costo que permita demostrar el concepto de micro-mecanizado y sus potencialidades?

Así, la investigación tiene como **objetivo** concebir y construir una micro-fresadora CNC de bajo costo para el micro-mecanizado de piezas.

A partir del problema expuesto se propone como **objetivos específicos** de la investigación:

1. Concebir una micro-fresadora CNC de bajo costo para la operación tecnológica de micro-fresado.
2. Construir un prototipo de micro-fresadora CNC de bajo costo para la operación tecnológica de micro-fresado.

Se plantea como **novedad**, la obtención por primera vez en Cuba de una micro-fresadora de bajo costo para demostrar el concepto de micro-mecanizado y sus potencialidades.

### **Tareas específicas**

1. Determinación de los fundamentos teóricos para el diseño y la construcción de una micro-fresadora de bajo costo.
2. Identificar las principales variables que definen a una micro-fresadora de bajo costo.
3. Construir una micro-fresadora de bajo costo.
4. Análisis preliminar del costo del prototipo.

### **Métodos teóricos**

Estos posibilitan la interpretación del marco conceptual recopilado y al utilizarse en el desarrollo de las teorías, crean las condiciones para ir más allá de las características del fenómeno de la realidad, explicar los hechos y profundizar en la esencia y

cualidades fundamentales de los procesos no observables directamente, permiten el análisis y la valoración de los datos obtenidos sobre el tema.

1. **Sistémico – Estructural funcional:** son procesos cognoscitivos que cumplen funciones muy importantes en la investigación científica. La realidad se sintetiza haciendo un análisis estructural de los elementos de la situación problemática, cómo caracterizar a una micro-fresadora de bajo costo. Se relacionan los elementos entre sí y se vinculan con la situación problemática. A su vez, se estructura sobre la base de los resultados dados previamente a la síntesis realizada.

En la investigación se utilizará para la caracterización de la micro-fresadora de bajo costo como objeto y campo de investigación, así como el procesamiento crítico de la información obtenida de la literatura consultada.

2. **Histórico – Lógico:** Lo histórico estudia la trayectoria real de los fenómenos y acontecimientos en el transcurso de su evolución. La lógica investiga las leyes generales del funcionamiento y desarrollo de los fenómenos. Se utilizará para el análisis de las tendencias y la evolución que permitan realizar la caracterización del tema que se aborda. Permite la búsqueda de los argumentos que antecedieron el problema científico, así como las regularidades y tendencias del objeto de estudio.
3. **Análisis-Síntesis:** Se utilizará para determinar los factores claves que influyen en el fenómeno, interrelacionar los efectos presentados que constituyen explicaciones al problema, analizar los nexos internos y las dependencias recíprocas.
4. **Método de mediciones técnicas.** Se utilizó en la construcción y ensamble del prototipo de micro-fresadora, utilizando diversos métodos de medición.

### **Métodos y procedimientos empíricos**

Estos métodos empíricos dan acceso directo a la realidad. Los métodos empíricos conllevan a toda una serie de procedimientos prácticos con el objeto y los medios de investigación que permiten revelar las características fundamentales y relaciones

esenciales del objeto, que son accesibles a la contemplación sensorial. Los mismos representan un nivel en el proceso de investigación cuyo contenido procede fundamentalmente de la experiencia, en el cual es sometido a cierta elaboración racional expresado en un lenguaje determinado.

1. Observación científica: Permite conocer la realidad mediante la percepción directa de los objetos y fenómenos. Se utilizará de manera estructurada al inicio de la investigación para identificar las principales variables de la micro-fresadora de bajo costo.
2. Entrevistas a expertos: dirigidas a conocer información relevante de manera directa con los actores claves.
3. Análisis documental (tesis, artículos, monografías, etc.): Se empleará este método para analizar aportes de investigaciones que se hayan realizado.

La investigación se estructura en:

Introducción

Capítulo 1. Marco teórico-conceptual

Capítulo 2. Metodología para la concepción de la micro-fresadora de bajo costo

Conclusiones y recomendaciones

Referencias bibliográficas

## Capítulo 1. Marco teórico-conceptual

### 1.1 Introducción

A mediados del siglo pasado, se realizaron importantes avances en micro tecnologías. El más significativo fue sin duda la invención del transistor, reconocido con el Premio Nobel de Física a Bardeen, Brattain y Shockley. El transistor tuvo un tremendo impacto en el diseño de circuitos electrónicos, reemplazando las costosas, poco fiables y energéticamente ineficientes válvulas de vacío (AECID, 2011).

A finales de la década de los cincuenta, el eminente físico Richard Feynman publicó un sugerente estudio titulado “*There’s Plenty of Room at the Bottom*”, en el que preconizaba una gran revolución en las tecnologías de miniaturización. Inspirado en el funcionamiento de los sistemas biológicos y su capacidad para ejecutar funciones complejas y almacenar ingentes cantidades de información a nivel microscópico, Feynman especulaba sobre los nuevos campos de aplicación que se abrirían a la humanidad en caso de desarrollar la capacidad de fabricar dispositivos miniaturizados (AECID, 2011).

Las tecnologías de fabricación se desarrollaron inicialmente impulsadas por el auge de la industria de los circuitos integrados. Desde los primeros prototipos creados por Texas Instruments a finales de los cincuenta, los avances en este campo se han traducido en pocas décadas en un notable incremento de la calidad de vida a través de la proliferación de ordenadores, tecnologías de comunicación y electrónica de consumo. Uno de los factores más conocidos en este desarrollo es probablemente el nivel de integración alcanzado en los circuitos, comúnmente expresado a través de la Ley de Moore, según la cual el número de componentes por chip se dobla cada dos años. Otros factores importantes se muestran en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Factores de mejora en la industria de circuitos integrados (ITRS, 2005).

FACTOR	EJEMPLO
Nivel de integración	Componentes por chip, Ley de Moore
Costo	Costo por función en dispositivos multifunción
Velocidad	Velocidad de microprocesador (GHz)
Potencia	Batería de móviles y portátiles
Tamaño	Productos pequeños y ligeros
Funcionalidad	Memoria no volátil

En la actualidad, la Sociedad demanda la extensión de los éxitos de miniaturización en microelectrónica a otros sectores. La miniaturización conlleva muchas mejoras, entre las que se pueden citar:

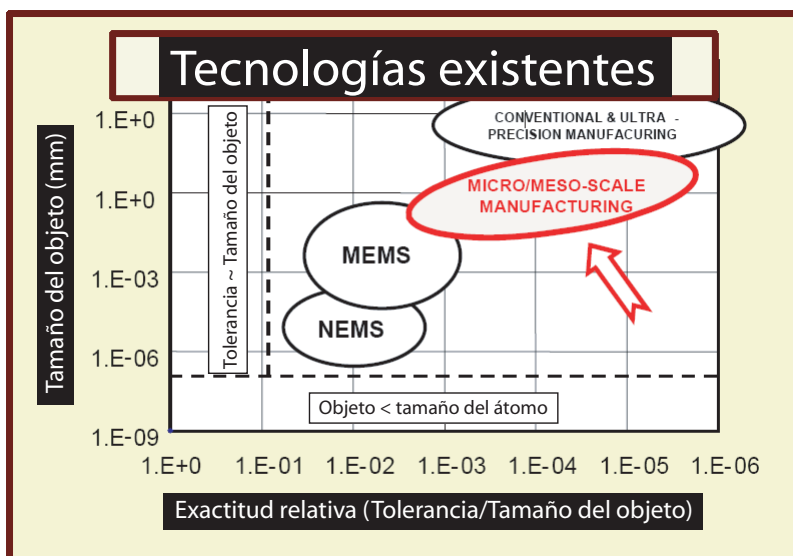
- Reducción de energía y consumo de materiales durante la fabricación.
- Ligereza y portabilidad.
- Dispositivos de gran sensibilidad con funcionamiento más selectivo.
- Aplicaciones menos invasivas.
- Mejor relación coste/funcionalidad.

Las micro tecnologías hacen de enlace entre los mundos atómico y macroscópico y desempeñarán un papel muy importante en la industria del futuro, en especial en sectores como medicina, biotecnología, energía y telecomunicaciones.

## **1.2 Generalidades de la micro-manufactura**

En sectores distintos de la microelectrónica, no existen tecnologías bien establecidas para fabricar microcomponentes en materiales diferentes al silicio. Por este motivo, se ha adoptado el término MET (*MicroEngineering Technologies*) para referirse a la fabricación de productos con geometría 3D de gran precisión en una variedad de materiales (Chae, Park, & Freiheit, 2006), con tamaños que van desde décimas de micra hasta unos pocos milímetros (Figura 1.1).

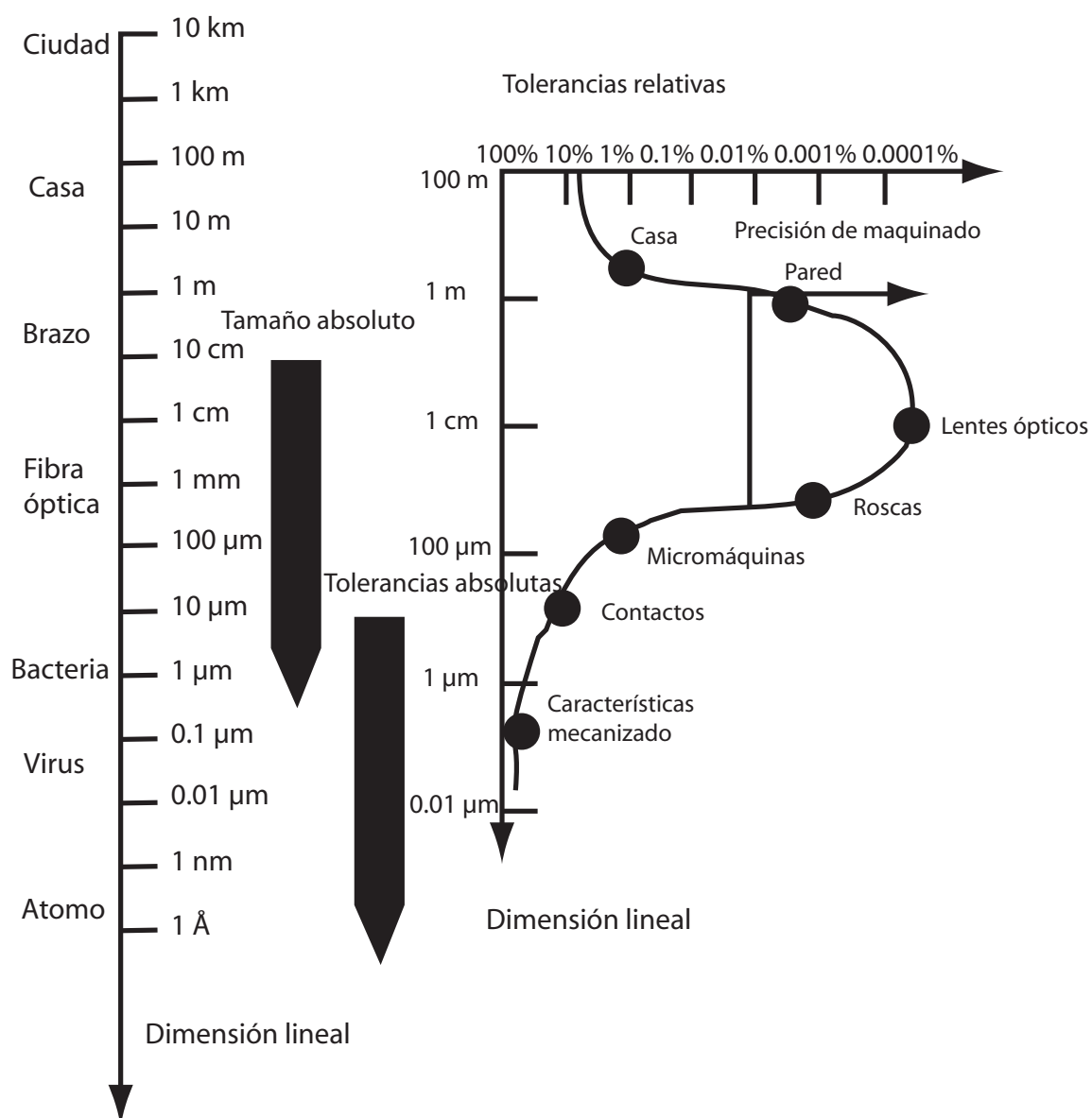




**Figura 1.1.** Escala y precisión en procesos de micro mecanizado (Alting, Kimura, Hansen, & Bissacco, 2003).

Además de los anteriores términos, los términos generales que se adoptarán en esta memoria para referirse a las tecnologías de miniaturización de componentes serán micro ingeniería (concepto y diseño) y micro fabricación (creación física del producto). Se entiende que un producto pertenece al ámbito de la micro fabricación cuando al menos una de sus características funcionales en una dimensión es del orden de micras.

Si bien la precisión absoluta que se puede alcanzar en procesos de micro fabricación es excelente (del orden de 1 mm), la precisión en relación al tamaño es bastante pequeña. Por ejemplo, en procesos de mecanizado convencionales, se pueden obtener precisiones relativas de  $10^{-6}$ , valores inaccesibles en micro mecanizado mecánico. Para clarificar este concepto, en la Figura 1.2 se muestra gráficamente el orden de tamaños, precisiones absolutas y precisiones relativas que se puede alcanzar en ambos procesos. Se observa que, para componentes muy pequeños, la tolerancia relativa es aproximadamente igual a la que se obtiene en la fabricación de bienes (del orden del 1%).

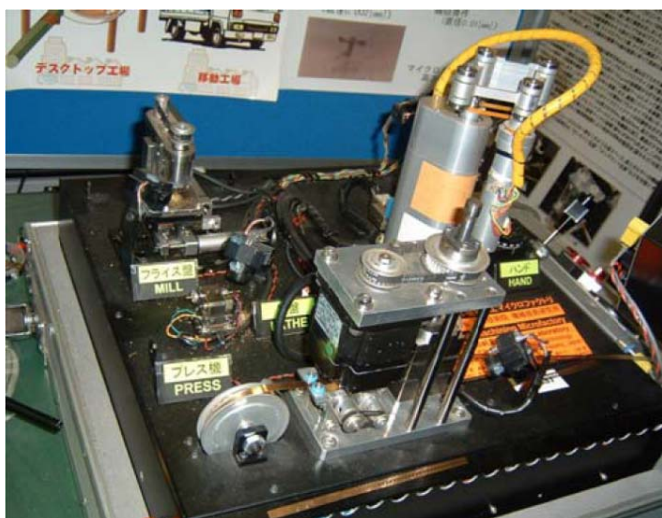


**Figura 1.2.** Tamaño, precisión absoluta y precisión relativa en el mecanizado de precisión (Madou, 2001).

### 1.2.1 Tendencias de investigación en Japón

La actividad en Asia se centra básicamente en Japón, Corea, Singapur y Taiwán. Tanto Japón como Corea ofrecen apoyo a programas de investigación extensos, plurianuales y abarcando a instituciones de todo el país, si bien en Corea este es un fenómeno muy reciente. En Japón, el programa de 10 años sobre micro mecanizado

(1991-2001), constituyó una enorme inversión del gobierno y en el mismo dieron comienzo un gran número de iniciativas industriales que continúan todavía (Figura 1.3). Ejemplos de éxitos se encuentran sistemas de micro fabricación y ensamblaje en Olympus, Seiko, Hitachi, Fanuc y Mitsubishi. En Corea, el Instituto Coreano de Máquinas y Metales obtuvo un contrato gubernamental para el desarrollo de micro factorías.



**Figura 1.3.** Proyecto de micro factoría (MEL, 2011).

En Japón, el Instituto para la Investigación en Física y Química (RIKEN) y el Instituto Nacional para la Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada tienen misiones fuertemente orientadas hacia la I+D con aplicación industrial y ambos hacen un gran esfuerzo en micro-fabricación, con resultados de calidad. En ambos laboratorios, los programas están produciendo métodos de procesamiento complejos y altamente innovadores. Es interesante hacer notar que buena parte del equipamiento ha sido desarrollado para la obtención de dispositivos sofisticados de gran precisión y bajo volumen de producción, que requieren de inversiones importantes, entre cien mil y un millón de euros.

Las compañías con fuerza en sectores tradicionales de fabricación, como por ejemplo FANUC (controles numéricos), Matsushita Electric (productos de consumo), Mitsubishi Electric (productos electrónicos, dispositivos) y Olympus (óptica) han

realizado fuertes inversiones en tecnologías de micro fabricación de forma continuada en los últimos quince años (Vasco, 2000).

En Taiwán, hay también inversión institucional por parte del gobierno, pero es generalmente a través de grandes corporaciones y enfocado hacia productos concretos. El Instituto de Investigación en Tecnología Industrial es el mayor laboratorio financiado por el gobierno y da soporte a las compañías taiwanesas de alta tecnologías, con un gran segmento dedicado a la investigación y desarrollo en micro fabricación. Otra instalación del gobierno, el Instituto para la Investigación en la Industria del Metal está iniciando un programa en métodos de fabricación multiescalar micro/meso ( $M^4$ ) (MINATECH, 2001).

### ***1.2.2 Tendencias de investigación en Europa***

Históricamente, en la Unión Europea no ha habido programas dedicados a las necesidades específicas de las micro tecnologías, y su desarrollo ha estado relegado a universidades y centros de investigación.

Durante los últimos años, se ha producido un significativo cambio estratégico y los gobiernos han comenzado a hacer importantes inversiones. El énfasis parece estar haciéndose en la creación de infraestructura para apoyar la conversión de resultados de investigación básica en tecnologías precompetitivas, hasta el punto de que sean atractivas a las compañías para su aplicación y comercialización.

Ejemplos de investigación en microsistemas pueden encontrarse en el programa EURIMUS II, iniciativa industrial dentro del programa EUREKA para apoyar el desarrollo de productos y sistemas en el campo de las micro tecnologías (EURIMUS, 2003).

Otras dos iniciativas han proporcionado ayuda adicional dentro de la Unión Europea: NEXUS (*Network of Excellence in Multifunctional Microsystems*), establecida en 1992, promueve la I+D y la comercialización de MEMS y microsistemas a través de la creación de un conjunto de foros coordinados para la discusión e intercambio de información entre investigadores y empresas. EUROPRACTICE que reúne a varios

centros europeos proporciona soporte al diseño, prototipado y fabricación de microsistemas (NEXUS, 2011).

Más recientemente, dentro del VI Programa Marco, la Unión Europea ha impulsado la Red de Excelencia en micro tecnologías Multi-Material Micro Manufacture (4M), en el que se integran varios de los participantes en este proyecto. Asimismo, están activos los siguientes proyectos:

- LAUNCH-MICRO (MicroTechnologies for Re-launching European Machine Manufacturing SMEs), liderado por Soraluze S. Coop., cuyo principal objetivo es el aumento de la competitividad de los fabricantes de máquinas europeos en este sector. En este proyecto también se integran Ideko, la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea y Kendu.
- PROFORM (An innovative manufacture process concept for a flexible and cost effective production of the vehicle body in white: Profile Forming), en el que participa Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea y cuya aportación más destacada es el desarrollo de procesos de fabricación por perfilado asistido láser, de manera muy localizada en la zona del radio de perfilado.
- MASMICRO (Integration of manufacturing systems for mass-manufacture of miniature/micro products bulk forming), en el que participa Tekniker.
- Nano-CMM (Universal and flexible 3D coordinate metrology for micro and nano components production), en el que participa Tekniker.
- PHODYE (New photonic systems on a chip based on dyes for sensor applications scalable at wafer fabrication), en el que se integra el Centro Láser de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Production4micro (Production technologies for micro systems), del cual es socio Ascamm, y que tiene como objetivo disponer a escala de altas producciones tecnologías de micro-fabricación, fundamentalmente aplicadas al sector óptico (desde aplicaciones en lentes para sistemas microscópicos y fotográficos hasta leds y sensores para automoción).

A partir de lo expresado en los anteriores párrafos, queda claro que la Unión Europea considera estratégico realizar un fuerte impulso en el sector de la micro fabricación. No obstante, dentro de Europa el estado de desarrollo por países es diferente, dependiendo de las inversiones de cada gobierno en la investigación y desarrollo en micro fabricación. Los países mejor posicionados son en estos momentos Alemania, Francia, Reino Unido, Suiza y, más recientemente, los países escandinavos y España.

Las grandes inversiones realizadas en Alemania han lanzado a este país a la tercera posición mundial, detrás de Estados Unidos y Japón. En Alemania, hay una conjunción de financiación pública y privada orientada a largo plazo, que hace énfasis en refinar y optimizar las tecnologías hasta tal punto que hace que sean comercialmente atractivas y fáciles de adaptar.

### ***1.2.3 Tendencias de investigación en los Estados Unidos de Norteamérica***

Estados Unidos es probablemente el país líder en micro tecnologías en muchos campos de aplicación gracias a los enormes esfuerzos realizados en el desarrollo de circuitos integrados desde los años sesenta y el impulso dado en la evolución de las tecnologías de micro fabricación de silicio. Esto permite que las empresas americanas, especialmente en Silicon Valley (California), tengan acceso a este tipo de sofisticadas tecnologías de fabricación, esencial en el desarrollo de microsistemas.

Las políticas de apoyo públicas comenzaron inicialmente en el campo de MEMS gracias al apoyo de la *National Science Foundation* (NSF), con menos de un millón de dólares por año. Sin embargo, actualmente es el Departamento de Defensa el principal organismo público de subvención, excediendo cincuenta millones de dólares por año.

No obstante, el esfuerzo de I+D es limitado respecto a otras regiones, debido a un cambio en las políticas de subvención del gobierno americano, que ha dado prioridad nacional a la nanotecnología, en la consideración de que su impacto en las propiedades de materiales, diagnóstico y terapia, y en el almacenamiento, procesado

y transmisión de datos. Este hecho ha relegado todas las inversiones en micro fabricación, lo que está permitiendo que países asiáticos y europeos reduzcan gradualmente la diferencia en el estado del arte en tecnologías de micro fabricación (Ehmann et al., 2005).

### ***1.3 Caracterización del proceso de desarrollo micro-máquinas***

La evolución de las metodologías para el diseño y la conceptualización de micro-máquinas herramienta no ha evolucionado a la misma velocidad que lo ha hecho el desarrollo de prototipos y micro-máquinas herramienta de carácter comercial. Los autores en este campo de investigación han trabajado desarrollando varios tipos de micro-máquinas herramienta, basado en las reglas típicas de las máquinas herramienta convencionales o de la escala macro. A continuación se describen los avances más significativos.

Subrahmanian et al. (Subramanian & Kornel F., 2002) y Vogler et al. (Vogler, DeVor, & Kapoor, 2003) exploran el concepto de una máquina herramienta en la meso-escala para el micro-mecanizado. Los autores proponen un prototipo de primera generación y exponen la evaluación de su desempeño. Este artículo no aborda la metodología utilizada para diseñar este tipo de micro-máquina.

Kussul et al. (E. M. Kussul, et al., 2004) propuso una micro-máquina herramienta CNC de bajo costo para la fabricación de componentes de micro-escala. Los autores presentan los prototipos desarrollados, describiendo los elementos principales. Esta investigación no expresa la metodología de diseño utilizada para desarrollar la micro-máquina.

Kurita y Hattori (Kurita & Hattori, 2005) revelan el desarrollo de una máquina de escritorio multi-proceso de que contiene dos conceptos, la miniaturización de la máquina herramienta y la utilización del multiprocesamiento. El husillo posee cinco porta-herramientas cambiables para el mecanizado. El estudio no expone el alcance de la metodología de diseño para este tipo de máquina.

Honegger et al. (A. Honegger, Kapoor, & DeVor, 2006; A. E. Honegger et al., 2006a, 2006b) se centran en el desarrollo de una micro-fábrica automatizada para fabricar

componentes de micro-escala. Los autores desarrollaron el hardware y el software para la integración de la micro-fábrica. Los autores muestran una metodología híbrida para la calibración de la cinemática de las máquinas herramienta a micro-escala.

Huo y Cheng (Huo & Cheng, 2008) investigan los problemas asociados con el diseño de máquinas herramienta de precisión con énfasis en el estudio de los aspectos dinámicos que afectan la actuación de la máquina herramienta de precisión y los procesos de mecanizado.

Sun y Cheng (Sun & Cheng, 2008) proponen el diseño de una plataforma de micro-máquinas herramienta reconfigurables orientado a un sistema micro-industrial. Este acercamiento utiliza el diseño axiomático, pero no integra los enfoques del diseño de micro-máquinas y no se evalúa en un prototipo.

De esta revisión, se denota: (a) el énfasis de los autores en el diseño de micro-máquinas herramienta de utilizar los enfoques tradicionales del diseño de macro-máquinas; (b) existen pocos esfuerzos en el desarrollo de metodologías de diseño para el desarrollo de micro-máquinas desde el punto de vista de la meso-escala.

#### **1.4 Conclusiones**

A partir de la revisión bibliográfica se denota en los estudios publicados pocos esfuerzos en el desarrollo de metodologías de diseño que fundamenten el desarrollo de micro-máquinas herramienta.



## **Capítulo 2. Metodología para la concepción de la micro-fresadora de bajo costo**

### **2.1 *Introducción***

En el presente capítulo se exponen los aspectos fundamentales que se tuvieron en cuenta para el diseño de una micro-fresadora de bajo costo CNC. Se hace una descripción de la metodología utilizada para el diseño de micro-máquinas herramienta CNC. Se toma un modelo de referencia como patrón para el diseño de esta metodología.

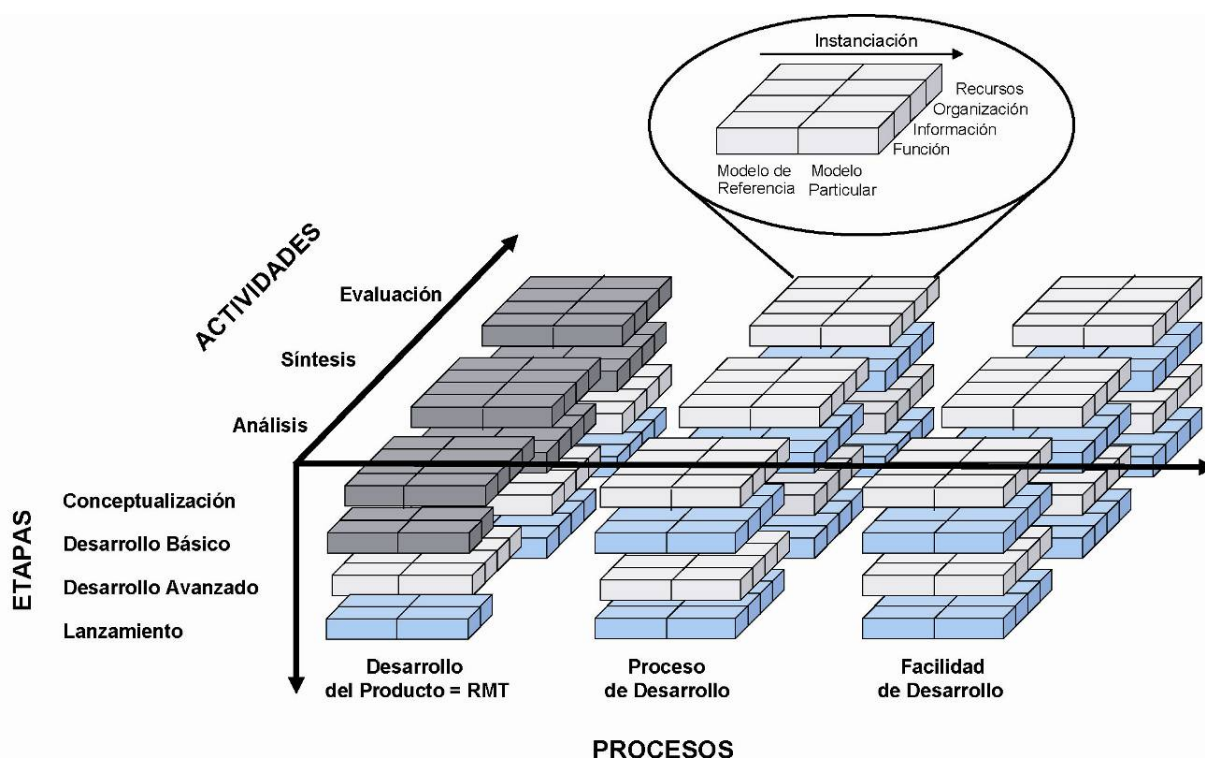
### **2.2 *Modelo de referencia para la concepción de la micro-máquina***

Para desarrollar la metodología de concepción de la micro-máquina, se tomó un modelo de referencia actualizado (Figura 2.1) donde se integran adecuadamente todos los procesos, etapas y actividades requeridos para un diseño y una manufactura verdaderamente eficientes y competitivos (Aca, 2004; Sánchez, 2004).

Los elementos fundamentales que caracteriza a este modelo de referencia, que se aplicó para la concepción de la micro-máquina son:

- Los procesos a desarrollar durante los proyectos de ingeniería: productos, procesos y desarrollo de facilidades, involucran tres subprocesos: (a) transferencia de productos, (b) transferencia de tecnologías y (c) diseño de máquinas.

- Las etapas son indicadores del nivel de evolución para los procesos: conceptualización, desarrollo básico, desarrollo avanzado y entrega.
- Las actividades son tareas específicas que se deben ejecutar para completar una etapa. Estas se clasifican en tres tipos: (a) las actividades de análisis, que son para diagnosticar, definir y preparar la información, (b) las actividades de síntesis que se orientan a los elementos agrupados que puedan producir nuevos efectos y (c) las actividades de evaluación que están dirigidas a aquellas soluciones que puedan ser contrarias a los objetivos y las exigencias.



**Figura 2.1.** Modelo de referencia que se aplicó en el diseño del cepillo reconfigurable para obtener la metodología formal (Aca, 2004).

Las propiedades de este modelo de referencia que lo diferencian y lo hacen utilizable para el caso del diseño de máquinas, son:

- **Carácter reutilizable/configurable:** cualidad que le permite ser configurado en un modelo particular para alcanzar un objetivo determinado en el ciclo de vida del producto, concentrándose en aspectos específicos de la empresa como: mercadeo y tecnologías.

- Robustez: basada en un conjunto de métodos y herramientas para asegurar que la información fluya entre las distintas etapas y así evitar la falta de colaboración entre los diseñadores y los fabricantes.
- Integralidad: debido a su estructura, el modelo es capaz de adoptar nuevos métodos y herramientas de otras disciplinas (mecánica, electrónica) y los integra, permitiendo el desarrollo de modelos particulares a diferentes industrias.

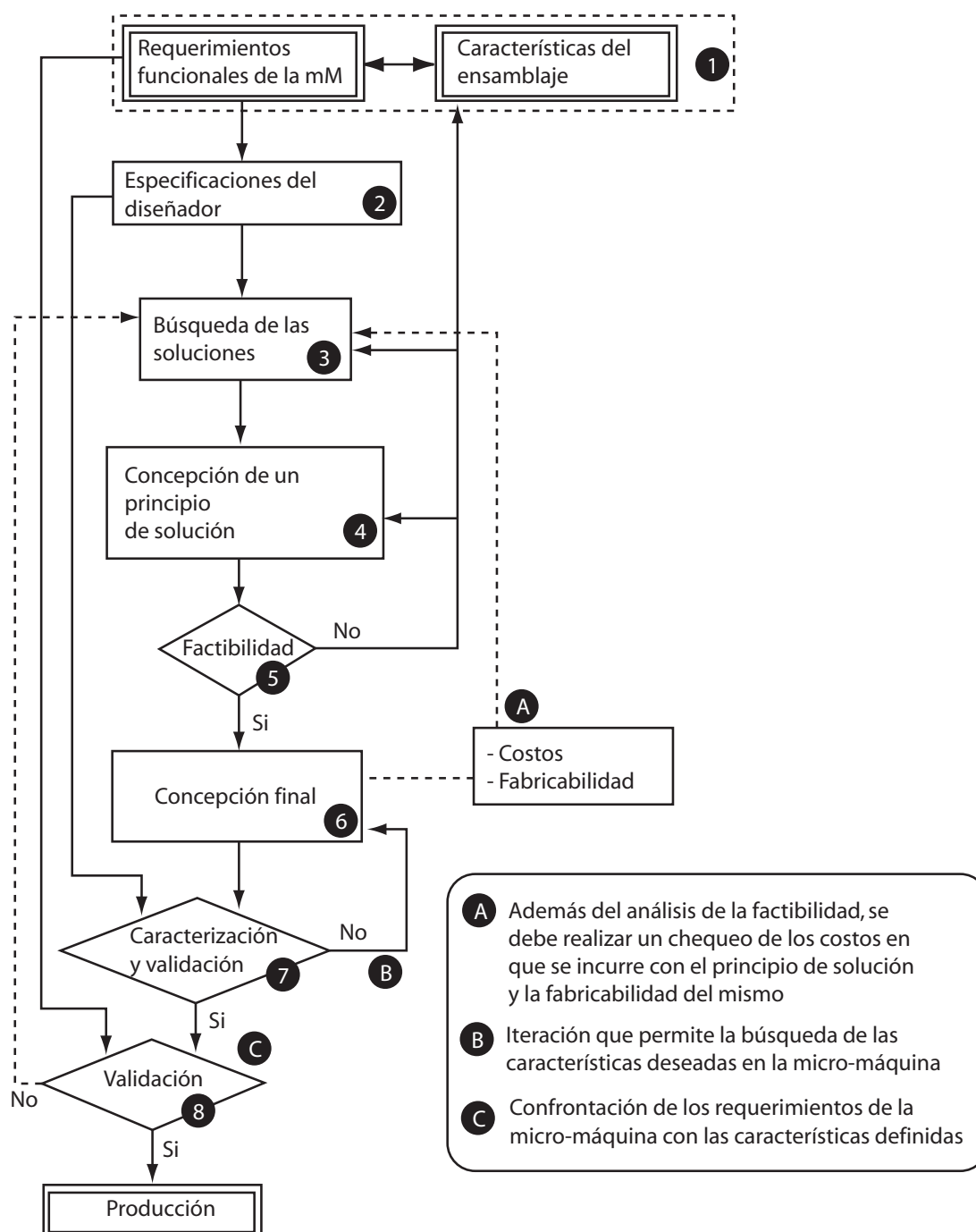
Basado en este modelo de referencia, se desarrolló un modelo particular para el diseño de la micro-máquina herramienta para el micro-fresado. En el siguiente acápite se presentan los detalles de la metodología para las etapas de conceptualización y de desarrollo básico de estas micro-máquinas.

### ***2.3 Metodología para el desarrollo de la micro-máquina***

La metodología desarrollada a partir de Sánchez (Sánchez, 2004) para el caso de las micro-máquinas, tiene como diferencia fundamental estar orientada hacia la obtención de micro-máquinas de bajo costo, por lo que se le adicionan criterios relacionados con el ensamble y la manufactura (Figura 2.2).

La metodología de concepción comprende las siguientes fases o etapas:

1. Establecimiento del listado de requerimientos funcionales de la micro-máquina, en interacción con las características del ensamble.
2. Establecimiento de las especificaciones del diseñador.
3. Selección del principio de solución.
4. Concepción de un principio de solución.
5. Evaluación de la factibilidad del principio de solución.
6. Concepción final, integración y optimización.
7. Caracterización y validación.
8. Validación del proceso.



**Figura 2.2.** Principales etapas para el desarrollo de la micro-máquina.

### ***2.3.1 Listado de requerimientos funcionales y especificaciones de concepción***

Antes de abordar las especificaciones propias del diseñador, deben analizarse las operaciones de ensamblaje (consideraciones de ensamblaje orientadas a disminuir los costos garantizando la función de la micro-máquina). El listado de requerimientos define las características en términos de facilidad de ensamblaje, precisión de la micro-máquina, rigidez de la estructura, temperatura de trabajo, consideraciones tecnológicas, etc.

Las características de los micro-componentes y las funcionalidades del sistema final va a sugerir las especificaciones del ensamblaje y orientará al diseñador. Además, los materiales y las calidades de las superficies de la micro-máquina van a jugar un importante papel en la definición de los requerimientos.

### ***2.3.2 Búsqueda de soluciones***

Sobre la base de las etapas precedentes (etapas 3 y 4 de la Figura 2.2), a continuación se realiza una búsqueda de principios de solución que den respuesta a los requerimientos establecidos. Estos principios se pueden comparar a partir de criterios no exhaustivos tales como:

- Factibilidad de construir. Incluye el análisis de la facilidad de construir y nivel de la precisión del posicionamiento de la micro-máquina.
- Accesibilidad: Incluye el espacio de trabajo de la micro-máquina, el tamaño máximo de piezas a maquinar y los medios de medición a utilizar.
- Nivel de automatización: Incluye facilidad de conexión, plataforma de software y tipo de conexión con la PC.

### ***2.3.3 Concepción de una solución***

El desarrollo de un prototipo de principio de solución permite corroborar los elementos definidos en el concepto de solución escogido en el paso anterior. Esta

primera etapa de factibilidad permite la integración de todos los elementos concebidos, a fin de verificar su comportamiento.

#### ***2.3.4 Factibilidad***

Esta etapa de verificación consiste en validar la factibilidad de los principios de solución adecuados a los requerimientos. Se verificarán aquellos aspectos esenciales que definen la funcionabilidad de la micro-máquina.

#### ***2.3.5 Concepción final***

Una vez que se ha probado la factibilidad del principio de solución, la concepción final consiste en la integración de los diversos elementos componentes. Se deberá tener en cuenta la repetitividad de lograr diversas micro-máquinas con el principio de solución seleccionado.

#### ***2.3.6 Caracterización y validación, validación final***

Esta etapa permite finalmente comprobar todos los requerimientos definidos versus las funciones de la micro-máquina.

### ***2.4 Conclusiones***

- La metodología descrita para la concepción de micro-máquinas herramienta CNC permite seguir una secuencia lógica en el desarrollo de micro-máquinas y define las etapas fundamentales a seguir.

## Capítulo 3. Concepción y construcción de la micro-fresadora de bajo costo

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los aspectos fundamentales que se tuvieron en cuenta en la concepción y construcción de una micro-fresadora de bajo costo CNC.

### 3.2 Listado de requerimientos funcionales y especificaciones de concepción

En la Tabla 3.1 se muestra algunos de los requerimientos relacionados con el ensamble que se tuvieron en cuenta para la concepción de la micro-máquina siguiendo la metodología expuesta en la Figura 2.2. Estos requerimientos constituyeron restricciones al diseño, pues fueron fijos desde el inicio del proceso de diseño.

**Tabla 3.1.** Principales requerimientos iniciales de la micro-máquina (ensamblaje).

Empresa cliente: <b>Universidad de Holguín</b>		Producto: <b>Micro-máquina herramienta</b>		Fecha inicial: 11/02/2011 última revisión: 08/04/2011
Empresa de Ingeniería: <b>FACING</b>				Página 1/2
Especificaciones				
<b>Concepto</b>	<b>Fecha</b>	<b>Propone</b>	<b>R/D</b>	<b>Descripción</b>
Ensamblaje	11/4/2011	I	R	Base del microscopio óptico PZO 80245
		I	R	Pieza de mano Concentrix® III ( Rotor )
		I	R	Motores paso a paso de 12 Volt

Una vez definidos los requerimientos iniciales dirigidos al proceso de ensamble, que constituyeron los elementos fijos en la investigación, se definieron un conjunto de requerimientos funcionales (Tabla 3.2) ya definidos en la etapa de diseño (ver punto 2 de la Figura 2.2).

**Tabla 3.2.** Principales requerimientos de diseño de la micro-máquina.







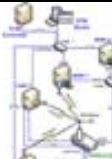




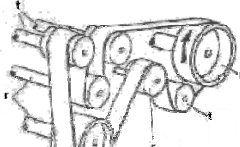

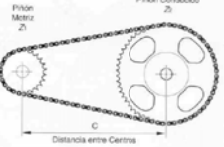
Empresa cliente: <b>Universidad de Holguín</b>		<b>Producto:</b> <b>Micro-máquina herramienta</b>		Fecha inicial: 11/02/2011 última revisión: 08/04/2011
Empresa de Ingeniería: <b>FACING</b>				Página 2/2
Especificaciones				
<b>Concepto</b>	<b>Fecha</b>	<b>Propone</b>	<b>R/D</b>	<b>Descripción</b>
Función	11/4/2011	I	R	Micro-máquina para el micro-fresado
Precisión	11/4/2011	I	R	En el primer prototipo, se deberá garantizar la rigidez del micro-mecanizado
Transmisión de datos	11/4/2011	I	R	Los datos de control de los motores paso a paso se gobernarán a través de una micro-computadora
Sistema de alimentación del rotor	11/4/2011	I	D	El rotor se alimentará con un compresor de aire de 2 kgf/cm <sup>2</sup>
Ensamblaje	11/4/2011	I	R	El ensamblaje deberá garantizar la rigidez del sistema y deberá ser rápido
Materiales de las piezas	11/4/2011	I	R	Las transmisiones dentadas serán plásticas para garantizar el peso mínimo de la micro-máquina
		I	R	El movimiento de los ejes se realizará a través de motores paso a paso con una transmisión dentada
Relaciones de transmisión	11/4/2011	I	D	El número de eslabones de la cadena cinemática que intervienen en la relación de transmisión se deberá minimizar para aumentar la precisión de la micro-máquina
Dimensiones	11/4/2011	I	D	Dimensiones de la micro-máquina mínimas (ancho, largo y alto; 25 x 25 x 30 cm)
Movimientos	11/4/2011	I	R	El movimiento de corte se efectuará con 3 grados de libertad (ejes X, Y, Z)
Piezas en bruto	11/4/2011	I	R	Piezas de materiales de buena maquinabilidad

### 3.3 Búsqueda de soluciones

La búsqueda de los principios de solución para dar respuesta a los requerimientos definidos anteriormente se realizó a través de una matriz morfológica (Tabla 3.3).



**Tabla 3.3.** Matriz morfológica para determinar los principios de solución.

Sub-funciones		Soluciones			
		1	2	3	4
	Base	 Base en U	 Base en C		
	Rotor	 SYNEA TA-97LED	 SYNEA TA-97LW	 ALEGRA TE-97	 Concentrix III
	Control	 Inalámbrico	 Wireless	 Puerto Paralelo PC	
	Motores	 Paso a paso Unipolar	 Paso a paso Bipolar		
	Transmisión	 Polea y correa	 Dentada	 Cadena Cadena	
Combinación de los principios de solución					

Para la función de la base de la micro-máquina se tuvieron en cuenta dos principios de solución, una base en forma de U y otra en forma de C, por ser las más comunes y ambas ofrecen buena estabilidad dimensional.

Para desarrollar un estudio preliminar de los tipos de rotores, se tomó como referencia los micro motores que se comercializan actualmente, a través de distribuidores como DENTALES PABLO HERMAN S.A. (Herman, 2011) y DENTAL AYALA (Ayala., 2011). La marca de micro motores que se analizará es A-DEC/W&H (A-DEC, 2011), debido a que éstos se encuentran en el mercado importados por las empresas mencionadas anteriormente. La Tabla 3.4 muestra una evaluación general de cuatro tipos diferentes de micro motores W&H. Es necesario indicar que los micro-motores evaluados en la Tabla 3.4 corresponden a un pequeño conjunto dentro de la variedad ofrecida por el fabricante W&H, se seleccionaron los más relevantes.

Se evaluaron tres tipos de sistemas de control que pueden aplicarse a la micro-máquina, estos son: sistemas wireless (necesita de infraestructura de repetidores y demás insumos), sistemas inalámbricos y conexión por cables por puerto paralelo de la PC.

Los motores disponibles para la micro-máquina fueron motores paso a paso, en este caso se optaron por los de tipo unipolar y de tipo bipolar.

Como sistemas de transmisión se consideraron los siguientes: transmisión por correa, transmisión por engranes y transmisión por cadena.





Una vez establecida esta caracterización de los diferentes principios de solución para desarrollar la micro-máquina, se calculó el número total de combinaciones posibles de conceptos, dada por la ecuación (1).

$$Ct = \prod_{i=1}^n Fi \quad (1)$$

$$Ct = 2 * 4 * 3 * 2 * 3 \quad (2)$$

$$Ct = 144 \text{ posibles conceptos} \quad (3)$$

**Tabla 3.4.** Evaluaciones entre micro motores existentes en el mercado.

<div>MICROMOTOR</div> <div>EVALUACIÓN</div>	<b>SYNEA TA – 97LED</b> 	<b>SYNEA TA – 97LW</b> 	<b>ALEGRA TE – 97</b> 	<b>Concentrix III</b> 
<b>Puntos principales</b>	Características generales: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pequeño mini-head (10 mm diámetro)</li> <li>– Lámpara incorporada</li> <li>– Peso de 40 g</li> <li>– Turbina de 17 Watts (59 dBA)</li> <li>– 45 Psi (3 bar) recomendado</li> </ul>	Características generales: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pequeño mini-head (10 mm diámetro)</li> <li>– Peso de 58 g</li> <li>– Turbina de 17 Watts (59 dBA)</li> <li>– Penta Spray (5-port) para una refrigeración eficiente</li> <li>– 45 Psi (3 bar) recomendado</li> </ul>	Características generales: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pequeño mini-head (10 mm diámetro)</li> <li>– No posee lámpara</li> <li>– Turbina de 12 Watts</li> <li>– Triple spray</li> <li>– 60 g de peso</li> </ul>	Characteristics generals: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Silenciosa</li> <li>– Peso ligero: 40 gramos</li> <li>– Compacta</li> <li>– Spray interno</li> <li>– Alta velocidad</li> <li>– Esterilizable</li> <li>– Mantenimiento mínimo</li> <li>– Fabricación en acero inoxidable</li> </ul>
<b>Función principal</b>	Tratamiento dental: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Desbaste</li> <li>– Rectificado</li> <li>– Pulido</li> </ul>	Tratamiento dental: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Desbaste</li> <li>– Rectificado</li> <li>– Pulido</li> </ul>	Tratamiento dental: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Desbaste</li> <li>– Rectificado</li> <li>– Pulido</li> </ul>	Tratamiento dental: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Desbaste</li> <li>– Rectificado</li> <li>– Pulido</li> </ul>
<b>Funciones auxiliares</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Iluminación del área dental tratada</li> <li>– Refrigeración del área dental tratada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Refrigeración del área dental tratada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Refrigeración del área dental tratada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Refrigeración del área dental tratada</li> </ul>
<b>Debilidades</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mayor costo debido al diseño altamente ergonómico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mayor costo debido al diseño altamente ergonómico</li> <li>– Carencia de iluminación LED incorporada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Diseño poco ergonómico debido a la ausencia de áreas de sujeción</li> <li>– Sistema de refrigeración menos eficiente que TA – 97LED y TA – 97LW</li> <li>– Carencia de iluminación LED incorporada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Carencia de iluminación LED incorporada</li> </ul>

Del total de 144 posibles conceptos, se evaluaron un total de ocho, debido a que no se tuvieron en cuenta un conjunto de principios de solución tales como:

- La base tipo C no se evaluó, pues la base del microscopio óptico que se tuvo como restricción al inicio del proceso de diseño, indica una base tipo U.
- El control inalámbrico no se tuvo en cuenta, debido a la no disponibilidad de la tecnología.
- El control wireless no se tuvo en cuenta, debido a la no disponibilidad de la tecnología.
- La transmisión por polea y correa no se tuvo en cuenta por sus desventajas para este tipo de micro-máquinas.
- La transmisión por cadena no se tuvo en cuenta por sus desventajas para este tipo de micro-máquinas.

Evaluando las ocho combinaciones restantes, se decidió por la combinación de los principios de solución indicada en la Tabla 3.3. En la Tabla 3.5 se muestran las diferentes combinaciones posibles y su evaluación respecto a los criterios definidos en el capítulo anterior. En la Tabla 3.6 se definen el significado de las diferentes combinaciones a partir de la matriz morfológica.

**Tabla 3.5.** Evaluación de posibles conceptos.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
Facilidad de construir	5	5	5	5	5	5	5	5
Nivel de la precisión	3	3	3	3	4	4	4	4
Espacio de trabajo	4	4	4	4	4	4	4	4
Tamaño máximo de piezas	4	4	4	4	4	4	4	4
Medios de medición	5	4	4	4	4	4	4	5
	4,2	4	4	4	4,2	4,2	4,2	4,4

**Tabla 3.6.** Significado de las diferentes combinaciones.

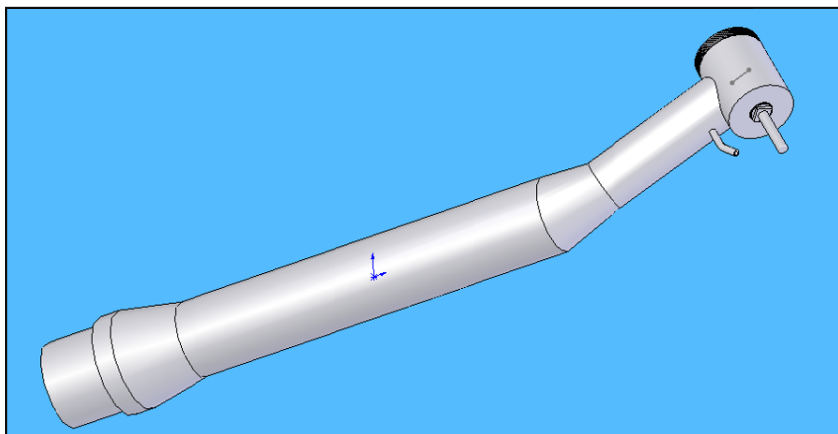
V1	Base en U	SYNEA TA-97LED	Bipolar	Dentada	Cable paralelo
V2	Base en U	SYNEA TA-97LW	Bipolar	Dentada	Cable paralelo
V3	Base en U	ALEGRA TE-97	Bipolar	Dentada	Cable paralelo
V4	Base en U	Concentrix III	Bipolar	Dentada	Cable paralelo
V5	Base en U	SYNEA TA-97LED	Unipolar	Dentada	Cable paralelo
V6	Base en U	SYNEA TA-97LW	Unipolar	Dentada	Cable paralelo
V7	Base en U	ALEGRA TE-97	Unipolar	Dentada	Cable paralelo
V8	Base en U	Concentrix III	Unipolar	Dentada	Cable paralelo

### **3.4 Modelación de los componentes del concepto seleccionado**

El concepto seleccionado para ser desarrollado como el prototipo de la micro-máquina se describirá a continuación.

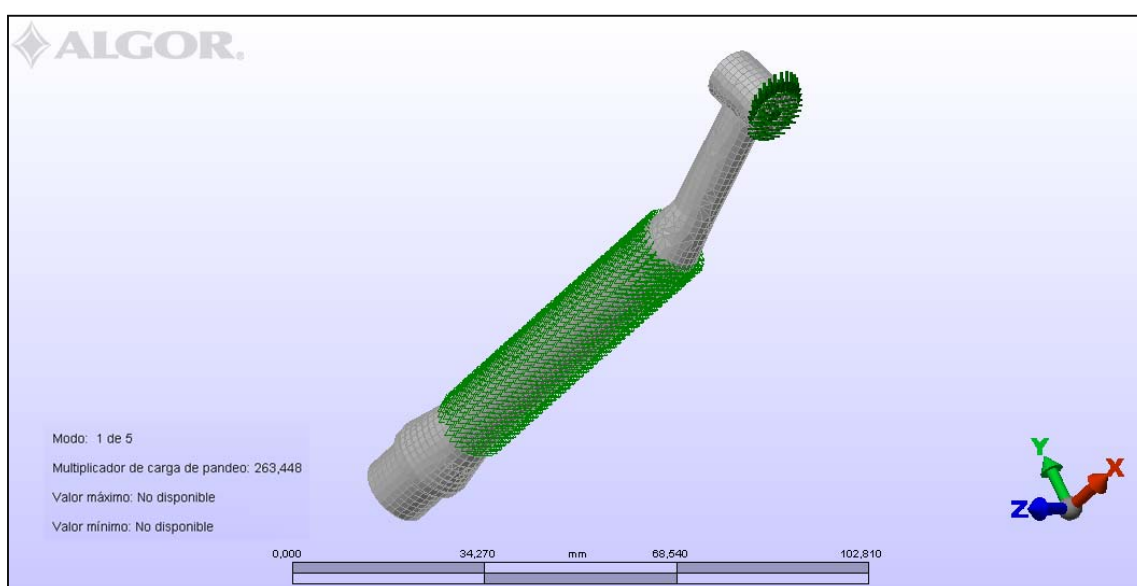
#### **3.4.1 Rotor Concentrix III**

El diseño del micro motor odontológico se ajusta a las medidas estándar, las cuales fueron tomadas de un micro motor convencional de accionamiento neumático. El modelo obtenido mediante el software SolidWorks se muestra en la Figura 3.1.

**Figura 3.1.** Micro motor odontológico Concentrix III.

### 3.4.2 *Análisis preliminar FEM del rotor Concentrix III*

Para comprobar el diseño preliminar del micro motor odontológico se realizó un análisis mediante el método de los elementos finitos (FEM) sobre el cuerpo básico del mismo. El modelo tridimensional, elaborado en el software SolidWorks, fue analizado posteriormente en el software ALGOR. Básicamente, el análisis FEM realizado consiste en una prueba de estabilidad, la cual permite determinar la carga máxima que soportará el sistema antes de fallar por estabilidad. Este tipo de análisis es de mucha importancia en elementos esbeltos, debido a que dichos elementos en la mayoría de los casos suelen fallar por estabilidad antes que por esfuerzos. El análisis de estabilidad, al procesar una carga unitaria de interés junto con las condiciones de frontera, arroja como resultado un factor de carga que finalmente será un indicador de la carga máxima permisible para el sistema. Los resultados obtenidos en el análisis FEM se muestran en la Figura 3.2.

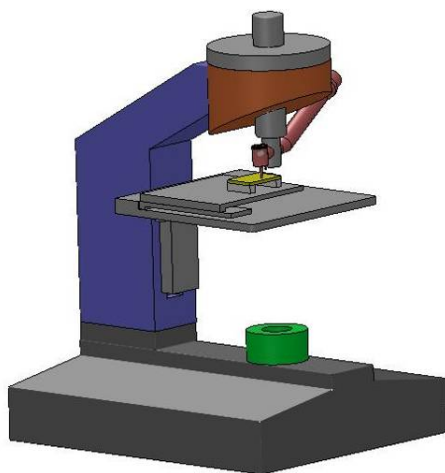


**Figura 3.2.** Software ALGOR: condiciones de frontera, cargas aplicadas, mallado.

El material utilizado para el análisis FEM fue acero para instrumental quirúrgico de la serie 400 (AISI 430). En la Figura 3.2 se observa el factor de carga obtenido a partir de una carga unitaria de 1 N. Este factor, equivalente a 263.45, indica que la carga máxima permisible para el sistema será de 263.45 N, es decir, 26.3 kgf aproximadamente. En la práctica, cualquier operación de micro-fresado no alcanzará estos niveles de carga, por lo tanto, el modelo operaría dentro de un rango de seguridad adecuado.

### **3.4.3      *Modelación del ensamble***

Utilizando el SolidWork, se realizó la modelación de cada componente de la micro-fresadora. En la Figura 3.3 se muestra una vista del ensamble obtenido. Se observa la base constituida por la base del microscopio, la adecuación de un dispositivo para la sujeción del rotor (husillo), la sujeción de la pieza de trabajo y la mesa que soporta la pieza en bruto.

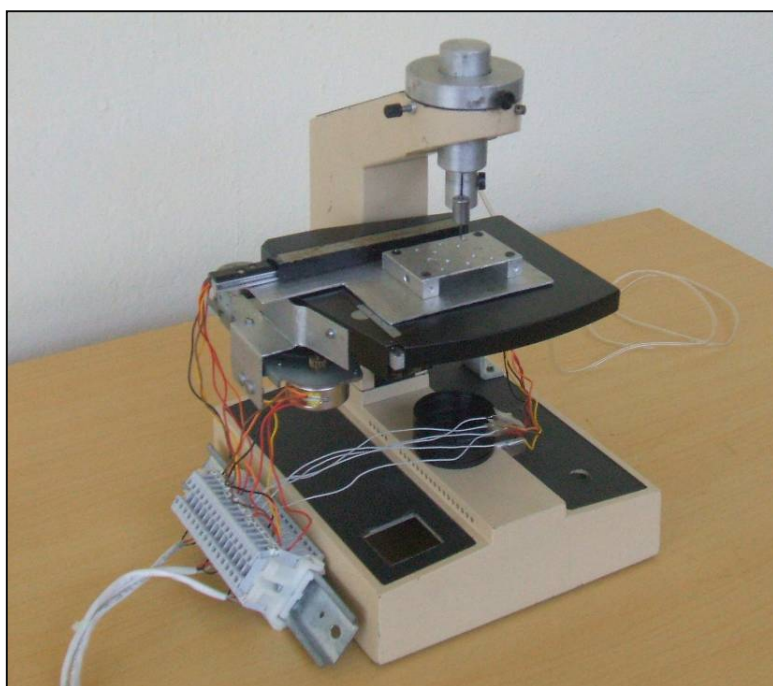


**Figura 3.3.** Modelo de la micro-fresadora a través del SolidWork.

### **3.5 Descripción del ensamble de la micro-fresadora**

#### **3.5.1 Componentes mecánicos de la micro-fresadora**

En la Figura 3.4 se muestra el ensamble de la micro-fresadora CNC de bajo costo, donde se integran los componentes mecánicos, eléctricos (motores) y el husillo



(rotor), para proporcionar la funcionalidad de la micro-máquina.

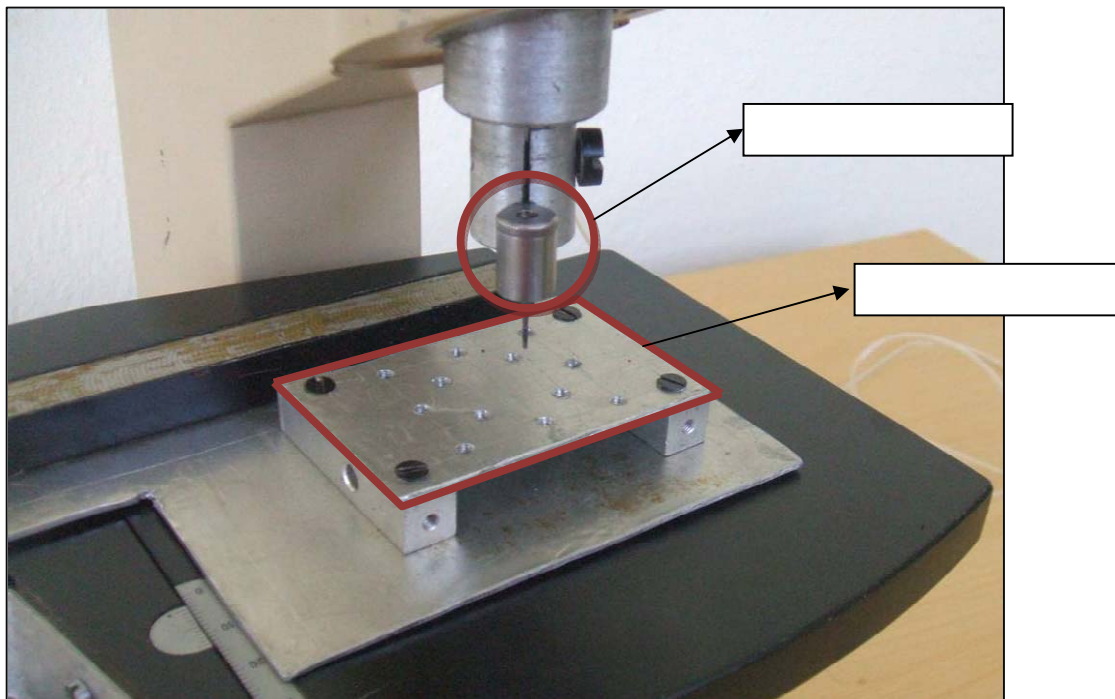
**Figura 3.4.** Ensamble de la micro-fresadora CNC de bajo costo.

En la Figura 3.5 se muestra en detalle el rotor (husillo) utilizado para ejecutar el movimiento principal de la micro-fresadora y la mesa de trabajo donde se colocará la pieza en bruto a maquinar. Se seleccionó un rotor con denominación Concentrix III, que posee las siguientes características generales:

- Rotor silencioso, trabaja con aire comprimido a  $2 \text{ kgf/cm}^2$
- Un peso de 40 gramos
- Rotor compacto
- Alta velocidad

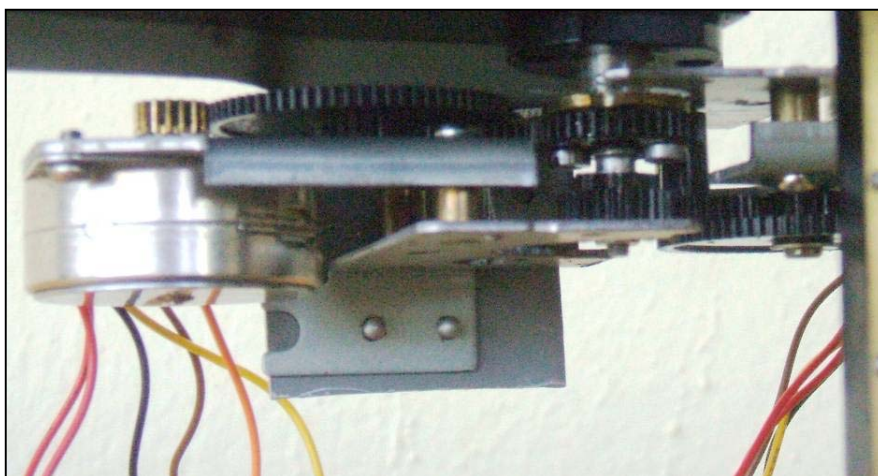


- Mantenimiento mínimo
- Fabricación en acero inoxidable



**Figura 3.5.** Mesa de trabajo y husillo de la micro-fresadora CNC de bajo costo.

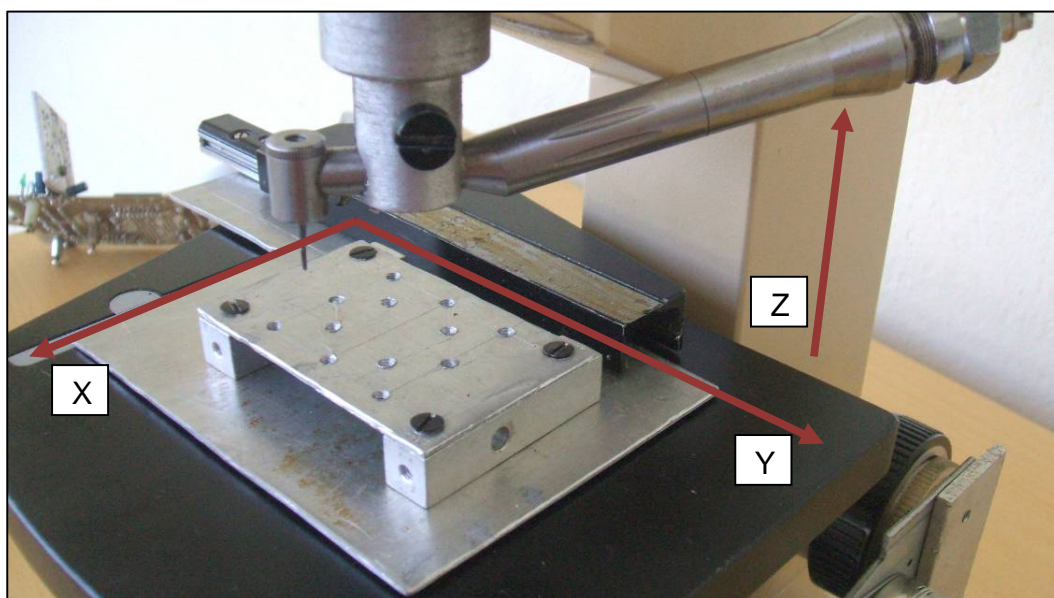
Se utilizó una transmisión mecánica por engranes (tres engranes en cada módulo) para transmitir el movimiento de los motores paso a cada uno de los ejes de la micro-fresadora. En la Figura 3.6 se muestra dos de las transmisiones utilizadas, para el caso de los ejes X e Y.



**Figura 3.6.** Tipo de transmisión mecánica utilizada.

### ***3.5.2 Sistema de ejes de la micro-fresadora***

La micro-fresadora desarrollada posee tres ejes de trabajo, el eje Z, que es el movimiento que garantiza la profundidad de corte en el micro-fresado, el eje X y el eje Y, que garantizan los otros dos grados de libertad para el micro-maquinado de piezas (Figura 3.7).

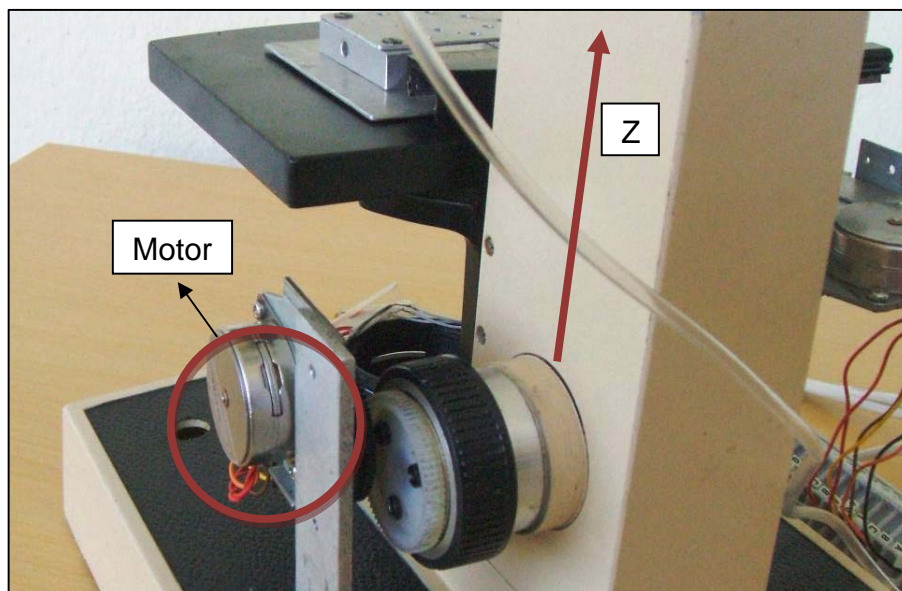


**Figura 3.7.** Ejes de trabajo de la micro-fresadora CNC de bajo costo.

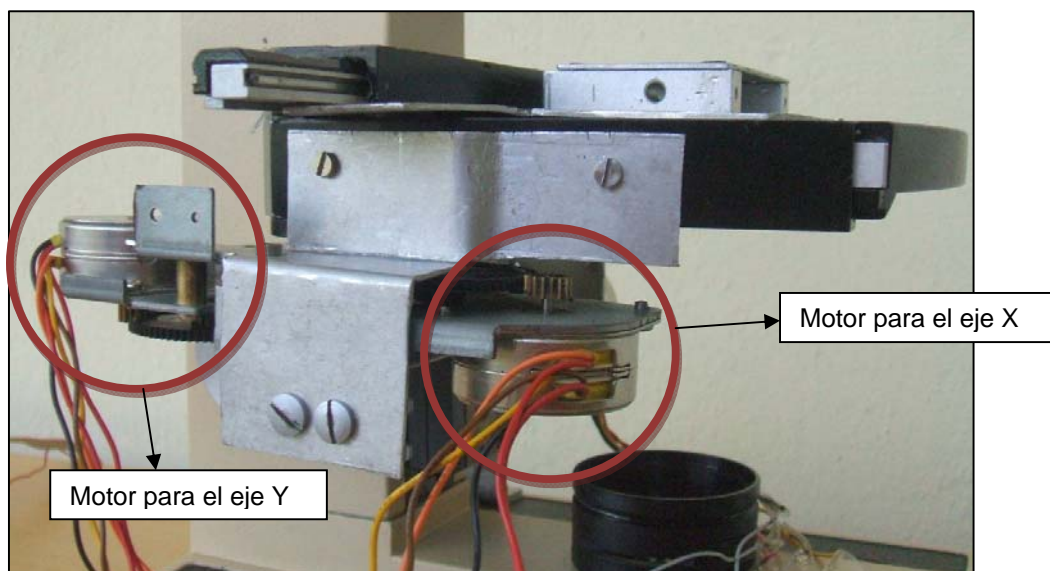
### ***3.5.3 Componentes eléctricos de la micro-fresadora***

A partir del proceso de diseño abordado en el capítulo anterior, se seleccionaron como motores para los tres ejes de la micro-fresadora motores paso a paso. Los mismos son ideales para la construcción de mecanismos donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$  (Allegro, 2011).

En la Figura 3.8 se muestra el motor paso a paso utilizado para el movimiento del eje z en la micro-fresadora. En la Figura 3.9 se muestra el motor paso a paso para los ejes X y Y de la micro-fresadora.



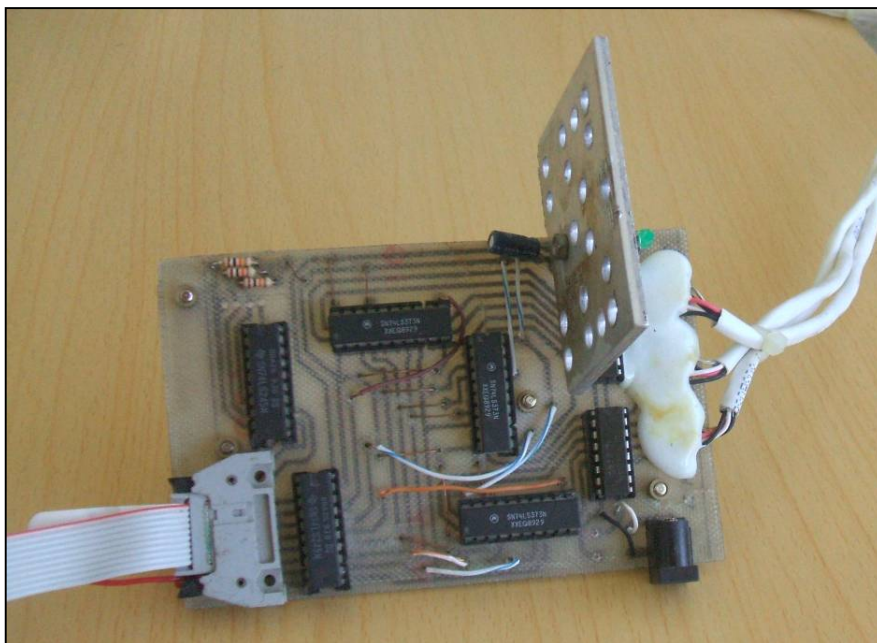
**Figura 3.8.** Motor paso a paso para el eje Z de la micro-fresadora.



**Figura 3.9.** Motor paso a paso para los ejes X y Y de la micro-fresadora.



Para la interface entre los motores y la computadora personal, se construyó una tarjeta de control para los tres motores paso a paso (Figura 3.10). La tarjeta se conecta a través del puerto paralelo.

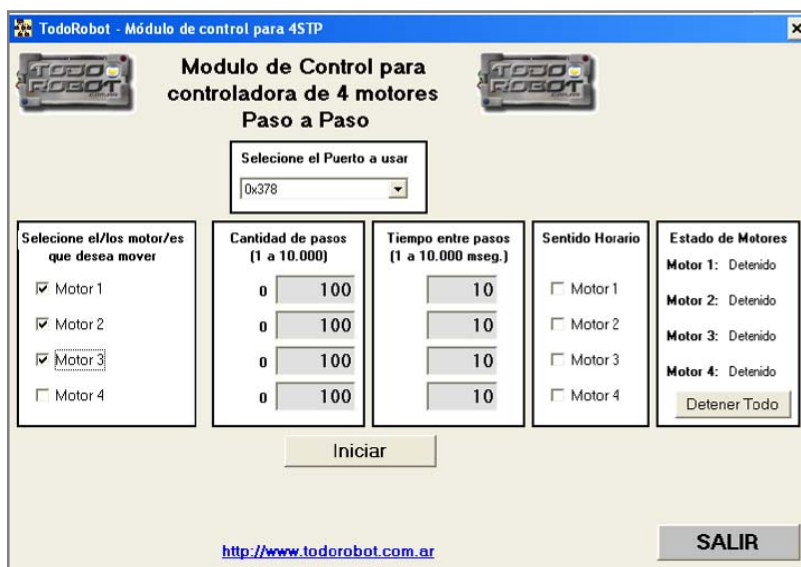


**Figura 3.10.** Tarjeta de control de los motores de la micro-fresadora.

#### ***3.5.4 Software de control utilizado***

El puerto paralelo de una PC es ideal para ser usado como herramienta de control de motores, relés, LED's, etc. El mismo posee un bus de datos de 8 bits (Pin 2 a 9) y muchas señales de control, algunas de salida y otras de entrada que también pueden ser usadas fácilmente. Las PC generalmente poseen solo uno de estos puertos (LPT1) (TodoRobot, 2011).

Se utilizó el software TodoRobot (TodoRobot, 2011) para el control de los tres motores paso a paso de la micro-fresadora (Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Módulo de control para los motores de la micro-fresadora.

### ***3.6 Análisis económico del prototipo de la micro-fresadora***

El costo total de la micro-máquina se determinó sumando el costo del maquinado de algunas piezas, el costo de los motores paso a paso, el costo de los componentes electrónicos y el costo del rotor.

La tarifa horaria utilizada para el cálculo del costo de fabricación fue de 21.8 kWh demandados por la Universidad de Holguín, con un saldo de \$10.9 aproximadamente, dando como tarifa horaria  $T_h = 0.49 \text{ \$/kWh}$ . Esta tarifa varía con frecuencia ya que depende del factor K, el cual es el precio del combustible en el mercado.

#### ***3.6.1 Cálculo del costo de las piezas maquinadas***

— Soporte del vástago (Figura 3.5).

- Torneado de desbaste

$$T_{\text{torneado}}^1 = T_{\text{principal}}^2 \quad (4)$$

---

<sup>1</sup> Tiempo para la operación tecnológica de torneado (min).

$$T_{\text{torneado}} = 3 \text{ min} \quad (5)$$

• Fresado de desbaste

$$T_{\text{fresado}} = T_{\text{principal}} \quad (6)$$

$$T_{\text{fresado}} = 2 \text{ min} \quad (7)$$

• Taladrado

$$T_{\text{taladrado}} = T_{\text{principal}} \quad (8)$$

$$T_{\text{taladrado}} = 1 \text{ min} \quad (9)$$

**Costo del torneado**

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = \text{Costo}_{\text{salario}} + \text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} \quad (10)$$

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = 0.245 + 0.072 \quad (11)$$

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = \$ 0.317 \quad (12)$$

• Costo por consumo eléctrico en el torneado

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (T_{\text{principal}}/60) * N_{\text{mep}}^3 * T_h \quad (13)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (3 \text{ min}/60) * 10 \text{ kW} * 0.49 \$/\text{kWh} \quad (14)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.245 \quad (15)$$

• Costo por salario en el torneado de un 1 operador (S = 1.44 \$/h)

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (T_{\text{principal}}/60) * S \quad (16)$$

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (3 \text{ min}/60) * 1.44 \quad (17)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.072 \quad (18)$$

**Costo del fresado**

$$\text{Costo}_{\text{Fresado}} = \text{Costo}_{\text{salario}} + \text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} \quad (19)$$

<sup>2</sup> Tiempo principal (min).

<sup>3</sup> Potencia de la Máquina Herramienta.

$$\text{Costo}_{\text{Fresado}} = 0.13 + 0.048 \quad (20)$$

$$\text{Costo}_{\text{Fresado}} = \$ 0.178 \quad (21)$$

- Costo por consumo eléctrico en el fresado

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (T_{\text{principal}}/60) * N_{\text{mep}} * T_h \quad (22)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (2 \text{ min}/60) * 8 \text{ kW} * 0.49 \$/\text{kWh} \quad (23)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$0.13 \quad (24)$$

- Costo por salario en el fresado de un 1 operador (S = 1.44 \$/h)

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (T_{\text{principal}}/60) * S \quad (25)$$

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (2 \text{ min}/60) * 1.44 \quad (26)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.048 \quad (27)$$

### **Costo del taladrado**

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = \text{Costo}_{\text{salario}} + \text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} \quad (28)$$

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = 0.012 + 0.024 \quad (29)$$

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = \$ 0.036 \quad (30)$$

- Costo por consumo eléctrico en el taladrado

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (T_{\text{principal}}/60) * N_{\text{mep}} * T_h \quad (31)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (1 \text{ min}/60) * 1.5 \text{ kW} * 0.49 \$/\text{kWh} \quad (32)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.012 \quad (33)$$

- Costo por salario en el taladrado de un 1 operador (S = 1.44 \$/h)

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (T_{\text{principal}}/60) * S \quad (34)$$

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (1 \text{ min}/60) * 1.44 \quad (35)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.024 \quad (36)$$

### Costo total en el maquinado

$$\text{Costo}_{\text{Total maquinado}} = \text{Costo}_{\text{Torneado}} + \text{Costo}_{\text{Taladrado}} + \text{Costo}_{\text{Fresado}} \quad (37)$$

$$\text{Costo}_{\text{Total maquinado}} = 0.317 + 0.036 + 0.178 \quad (39)$$

$$\text{Costo}_{\text{Total maquinado}} = \$ 0.531 \quad (40)$$

— Soporte del rotor (vástago) (Figura 3.5).

#### • Torneado de desbaste

$$T_{\text{torneado}} = T_{\text{principal}} \quad (41)$$

$$T_{\text{torneado}} = 3 \text{ min} \quad (42)$$

#### • Taladrado

$$T_{\text{taladrado}} = T_{\text{principal}} \quad (43)$$

$$T_{\text{taladrado}} = 1 \text{ min} \quad (44)$$

### Costo del torneado

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = \text{Costo}_{\text{salario}} + \text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} \quad (45)$$

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = 0.245 + 0.072 \quad (46)$$

$$\text{Costo}_{\text{Torneado}} = \$ 0.317 \quad (47)$$

#### • Costo por consumo eléctrico en el torneado

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (T_{\text{principal}}/60) * N_{\text{mep}} * Th \quad (48)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (3 \text{ min}/60) * 10 \text{ kW} * 0.49 \$/\text{kWh} \quad (49)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$0.245 \quad (50)$$

#### • Costo por salario en el torneado de un 1 operador (S = 1.44 \$/h)

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (T_{\text{principal}}/60) * S \quad (51)$$

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (3 \text{ min}/60) * 1.44 \quad (52)$$



$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.072 \quad (53)$$

### **Costo del taladrado**

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = \text{Costo}_{\text{salario}} + \text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} \quad (54)$$

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = 0.012 + 0.024 \quad (55)$$

$$\text{Costo}_{\text{Taladrado}} = \$ 0.036 \quad (56)$$

- Costo por consumo eléctrico en el taladrado

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (T_{\text{principal}}/60) * N_{\text{mep}} * T_h \quad (57)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = (1 \text{ min}/60) * 1.5 \text{ kW} * 0.49 \$/\text{kWh} \quad (58)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.012 \quad (59)$$

- Costo por salario en el taladrado de un 1 operador (S = 1.44 \$/h)

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (T_{\text{principal}}/60) * S \quad (60)$$

$$\text{Costo}_{\text{salario}} = (1 \text{ min}/60) * 1.44 \quad (61)$$

$$\text{Costo}_{\text{consumo eléctrico}} = \$ 0.024 \quad (62)$$

### **Costo total en el maquinado**

$$\text{— Costo}_{\text{Total maquinado}} = \text{Costo}_{\text{Torneado}} + \text{Costo}_{\text{Taladrado}} \quad (63)$$

$$\text{— Costo}_{\text{Total maquinado}} = 0.317 + 0.036 \quad (64)$$

$$\text{— Costo}_{\text{Total maquinado}} = \$ 0.353 \quad (65)$$

### **3.6.2 Costo de los motores paso a paso**

Los motores paso a paso se obtuvieron de un equipo en desuso, ya retirado de su objeto de trabajo (caja registradora).

### ***3.6.3 Costo de los componentes electrónicos***

Los componentes electrónicos utilizados en la construcción tuvieron un costo de 50 CUP.

### ***3.6.4 Costo de la base***

La base de la micro-máquina se obtuvo de un microscopio en desuso.

### ***3.6.5 Costo del rotor***

El rotor de la micro-máquina se obtuvo de un equipo en desuso, al adquirirse una nueva tecnología.

### ***3.6.6 Costo del software***

El software utilizado para el control de los motores paso a paso se obtuvo de manera gratis de un sitio web (TodoRobot, 2011).

### ***3.6.7 Costo total del prototipo desarrollado.***

El costo total de la micro-máquina se estima según la ecuación (66).

$$\text{Costo}_{\text{Total}} = \text{Costo}_{\text{Maquinado}} + \text{Costo}_{\text{Componentes electrónicos}} \quad (66)$$

$$\text{Costo}_{\text{Total}} = 0.531 + 0.353 + 50 \quad (67)$$

$$\text{Costo}_{\text{Total}} = \$ 50.884 \quad (68)$$

### **3.7 Conclusiones**

- Se construyó una micro-fresadora CNC de bajo costo, a partir de la aplicación de la metodología de diseño planteada.
- La evaluación económica demostró la factibilidad de la construcción de este tipo de micro-máquina a un bajo costo.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

- Se concibió una micro-fresadora CNC de bajo costo para la operación tecnológica de micro-fresado.
- Se construyó un prototipo de micro-fresadora CNC de bajo costo para la operación tecnológica de micro-fresado, demostrándose la factibilidad de este tipo de máquinas.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar a través de métodos de medición, la precisión de la micro-fresadora y los intervalos de maquinabilidad.
- Desarrollar un software CAM para la programación de la micro-fresadora con códigos CNC ISO.
- Realizar un análisis de factibilidad económica para desarrollar futuras micro-fresadoras CNC.
- Implementar su utilización en la Carrera de Ingeniería Mecánica para la enseñanza de las materias afines.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A-DEC. (2011). A-DEC, Inc. Retrieved 04/04/2011, 2011, from [http://www.a-dec.com/html/Products/Dental-Handpieces/Synea\\_TA-97LED.asp](http://www.a-dec.com/html/Products/Dental-Handpieces/Synea_TA-97LED.asp)
- Aca, J. (2004). *Reference Model and Methodology to Configure/Reconfigure Integrated Product, Process and Facility Development Processes*. Unpublished Master Thesis in Manufacturing Systems, ITESM, Monterrey.
- AECID. (2011). Micro-manufacturing. Retrieved 4/03/2011, 2011, from <http://www.micromanufacturing.org>
- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H. N., & Bissacco, G. (2003). *Micro Engineering*. Paper presented at the Annals of CIRP.
- Allegro. (2011). Allegro-micro. Retrieved 04/04/2011, 2011, from <http://www.allegromicro.com>
- Ayala. (2011). DENTAL AYALA. Retrieved 04/04/2011, 2011, from <http://www.dental-ayala.com>
- Chae, J., Park, S. S., & Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), 313-332.
- Ehmann, K. F., Bourell, D., Culpepper, M. L., Hodgson, T. J., Kurfess, T. R., Madou, M. J., et al. (2005). *International assessment of research and development in micromanufacturing*. Paper presented at the World Technology Evaluation Center (WTEC).
- EURIMUS. (2003). *Eureka Industrial Initiative for Microsystems Uses: Blue Book*, Grenoble.
- Herman, P. (2011). DENTALES PABLO HERMAN S.A. Retrieved 04/04/2011, 2011, from [http://ecuador.acambiode.com/proveedor\\_65740010080465696550685265654565.html](http://ecuador.acambiode.com/proveedor_65740010080465696550685265654565.html)

- Honegger, A., Kapoor, S. G., & DeVor, R. E. (2006). A Hybrid Methodology for Kinematic Calibration of Micro/Meso-Scale Machine Tools (mMTs). *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 513-522.
- Honegger, A. E., Langstaff, G. Q., Phillip, A. G., VanRavenswaay, T. D., Kapoor, S. G., & DeVor, R. (2006a). Development of an automated microfactory: Part 1 - microfactory architecture and sub-systems development. *Transactions of NAMRI/SME*, 34, 333-340.
- Honegger, A. E., Langstaff, G. Q., Phillip, A. G., VanRavenswaay, T. D., Kapoor, S. G., & DeVor, R. (2006b). Development of an automated microfactory: Part 2 - experimentation and analysis. *Transactions of NAMRI/SME*, 34, 341-348.
- Huo, D., & Cheng, K. (2008). A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives. *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, 222(SPECIAL ISSUE), 1-13.
- ITRS. (2005). *The international technology roadmap for semiconductors*.
- Kurfess, T. R. (2006). Micro-machines: worth the cost? *CONTROL ENGINEERING*.
- Kurita, T., & Hattori, M. (2005). Development of new-concept desk top size machine tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 959-965.
- Kussul, E., Baidyk, T., & Wunsch, D.-C. (2010). *Neural Networks and Micromechanics*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kussul, E. M., Ruiz-Huerta, L., Caballero-R., A., M.-Kasatkin, A., M.-Kasatkina, L., N-Baidyk, T., et al. (2004). CNC machine tools for low cost micro devices manufacturing. *Journal of Applied Research and Technology*, 2(1), 76-91.
- Madou, M. J. (2001). *Fundamentals of Microfabrication*: CRC Press.
- MEL. (2011). Mechanical Engineering Laboratory. Retrieved 20/02/2011, 2011, from <http://www.aist.go.jp>
- MINATECH. (2001). *Reports on Micro and Nano Technologies*: European Project, VDI/VDE-IT GmbH, Germany.
- NEXUS. (2011). NEXUS. Retrieved 15/03/2011, 2011, from <http://www.nexus-mems.com>
- Pérez, R., Molina, A., & Romero, D. (2010). *Diseño reconfigurable de micro-máquinas herramienta CNC de primera generación*. Paper presented at the II Conferencia Internacional de la Ingeniería en Cuba, Varadero.
- Sánchez, J. L. (2004). *Diseño de un cepillo reconfigurable para el procesamiento del Bambú*. Universidad de Holguín, Holguín.
- Subramanian, R., & Kornel F., E. (2002). *Development of a Meso-scale Machine Tool (mMT) for Micro-machining*. Paper presented at the Japan- USA Symposium on Flexible Automation, Hiroshima, Japan.
- Sun, X., & Cheng, K. (2008). *Design of generic modular reconfigurable platforms (GMRPS) for a product-oriented micro manufacturing system*. Paper presented

at the The 6th International Conference on Manufacturing Research, Brunel University, UK.

TodoRobot. (2011). Todo Robot. Retrieved 4/02/2011, 2011, from <http://www.todorobot.com.ar>

Vasco, G. (2000). *Programa de Microtecnologías. Investigación Estratégica. Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación (PCTI) 2001-2004.*

Vogler, M. P., DeVor, R. E., & Kapoor, S. G. (2003). Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-milling of Multi-Phase Materials. *Transactions of the ASME*, 125, 202-209.