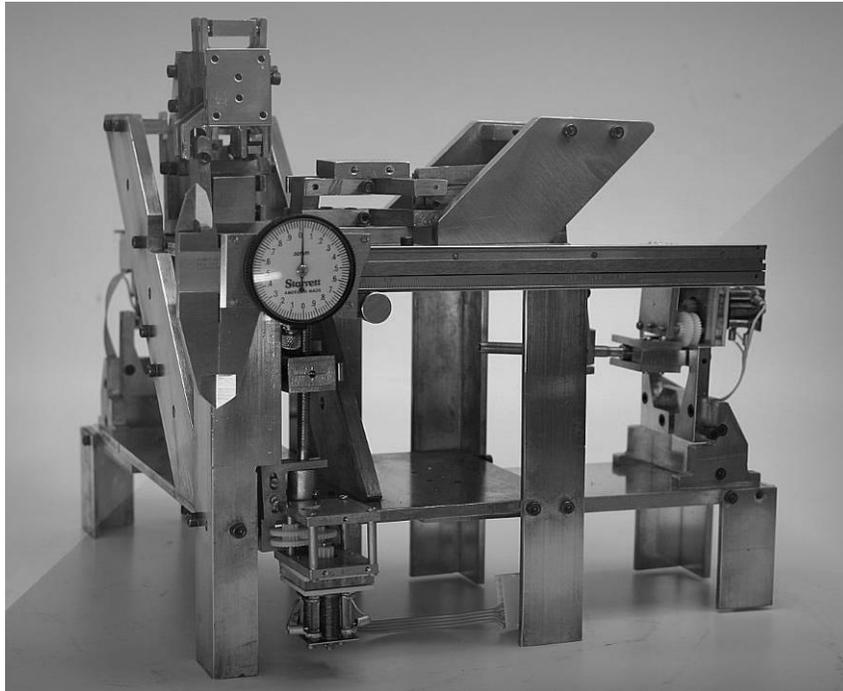




## FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño Modular Aplicado a un Microcentro de Maquinado de Bajo Costo



Ingeniería Mecánica  
(Área Mecatrónica)



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.

MICROEQUIPMENT TECHNOLOGY

# Diseño Modular Aplicado a un Microcentro de Maquinado de Bajo Costo

---





**L**os siguientes agradecimientos son un humilde reconocimiento a todos aquellos seres que han estado más cerca de mi vida y a quienes les debo el grato sentimiento que existe en mí al ver concretado este trabajo que tanto anhelaba desarrollar. Ustedes han sido una fuente de inspiración constante, firme y verdadera.

*Gracias **Dios**, infinito ser; la naturaleza y la curvatura universal pertenecen a tu dinámica edénica, a esas características no comprendidas del todo por la teología y la matemática. Gracias por permitirme conocer un poco de ti y por generar las condiciones necesarias para que mi madre pudiera gestarme en su seno. Gracias a ti **Mamá** por ser el pilar familiar que siempre ha estado en mi vida, sabiéndome guiar con fuerza y amor para ser un hombre de bien. Gracias por todos esos desvelos, por alimentarme, por nutrir mi cuerpo, mi mente y mi alma, por mi educación, ¿sabes mamá? Eres una mujer impresionante, fuerte, tu carácter me dio la seguridad necesaria para salir adelante en la vida. Te Amo mamá, gracias por tu mano fuerte y efectiva y gracias por elegir al mejor padre que pude haber tenido. Gracias a ti **Papá** por ser tan noble y tan divertido, por ser una figura paterna ejemplar, siempre recordaré tu forma tan hermosa de tomar la vida, de darle un toque dulce de tranquilidad, gracias papá por ofrecerme el sustento necesario, porque nunca me faltó absolutamente nada, porque siempre me diste más, porque nunca has sido egoísta sino un hombre ejemplar tanto de vida como de sentimientos. Te Amo viejo, gracias por darme un hermano tan auténtico y noble. Gracias a ti **Mauricio** por ser mi hermano, mi compañero de juegos y de peleas, eres un hombre inteligente y con cualidades muy superiores a mí en muchos aspectos, de nobleza entregada y humilde, divertido y sagaz; juntos verteremos nuestros sueños en la realidad de los negocios, te lo aseguro; nuestros padres te han mostrado siempre ese camino y su experiencia se ha vertido en ti como una semilla que florecerá muy pronto, Te Amo Mao. Y de una forma muy especial, gracias a ti **Gaby** por ser la representación del amor en mi vida, por ser mi vida misma y el carácter femenino de mi complemento perfecto. Te Amo exquisita prometida mía.*

*A mis Abuelitos y a mis Abuelitas. Gracias por haber sido y ser el origen de mi vida.*  
*A mi tía Caro y a Danila, gracias por ser mi familia más cercana y un ejemplo de tesón.*  
*A mi amigo Sabíb, que a pesar de la distancia siempre tendremos un lazo indestructible.*  
*A mi amigo Rubén, por estar siempre en los momentos adecuados y por esa vida llena de risas.*  
*A mi amiga Sandra, por escucharme siempre, por reírse de todo cuanto digo, por ser incondicional.*  
*Zu Ernesto, danke für das Vertrauen und die Joberfahrung innerhalb der unternehmerischen Welt.*  
*Du bist ein ausgezeichnete Leiter und immer ein großer Freund.*  
*Zu Juan Pablo, Du wirst von der Geschichte gebildet, aber Du entwickelst die Geschichte auch.*  
*Du wirst mein Freund für immer.*  
*Al Dr. Leopoldo Ruiz, por la formación y el empuje de siempre, gracias por tu amistad y tu calidez.*  
*Estás presente tanto en neuronas como en tornillos en este trabajo, te lo agradezco.*  
*Al Dr. Kussul, por ser una fuente de inspiración profesional y de vida, pocos ingenieros como usted.*  
*A todos mis compañeros e investigadores del antes LMM y en especial a Don Mario.*  
*A Elizabeth, por haber sido parte de mi existir y por ese aprendizaje conjunto.*  
*A mis amigos Horacio, Karla, Héctor y Angélica, gracias por su apoyo, son parte de este logro.*  
*A mis amigos José Luis y Siulfer, gracias por la experiencia musical y el compadrazgo lupaz.*  
*A mis profesores y compañeros de la Facultad de Ingeniería, por tan extraordinaria comunidad.*  
*A todos los miembros de la Sociedad de Mecatrónica de la F.I., por impulsar nuestra iniciativa.*  
*A la profesora Gloria Palomo Colín, por ser la guía marcial y deportiva de mi vida:*  
*tesón, fuerza, ímpetu, coraje, disciplina, belleza... Taekwondo*  
*A la E.N.P. 6 “Antonio Caso”, por tan bellos momentos y experiencias y por mis amigos.*  
*A todos aquéllos a quienes mi memoria no permitió recordar en este momento, gracias.*

태권도

*Eugenio*

# ÍNDICE

<b>EPÍGRAFE</b> .....	10
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>14</b>
Orígenes de los Microsistemas.....	14
➤ Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) .....	17
Esbozo de la Micromecánica y su Desarrollo en México.....	19
➤ Miniaturización por Generaciones .....	21
➤ Tecnologías M <sup>3</sup> .....	22
➤ Problemas y Leyes de Escalamiento .....	23
Estado de la Técnica en Microtecnología.....	24
➤ Iniciativas Mundiales .....	24
➤ Estados Unidos de América .....	25
➤ Japón .....	26
➤ Alemania .....	28
<b>CAPÍTULO 2. EL DISEÑO MODULAR EN LA MICROMECAÁNICA</b> .....	<b>29</b>
El Proceso de Diseño .....	29
Principios y Recomendaciones de Diseño .....	30
Diseño para Ensamble .....	32
Diseño Axiomático .....	32
Otras Aproximaciones .....	33
Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva, TRIZ .....	33

Diseño Mecatrónico .....	35
El Diseño de Sistemas Modulares .....	37
➤ Beneficios de la Modularidad .....	37
➤ El Poder y La Opción de Valor de la Modularidad .....	38
➤ La Medición de la Modularidad .....	40
➤ Sobre la Metodología del Diseño Modular .....	43
• Selección y Evaluación .....	45
• Preparación de Bocetos .....	45
• Ventajas y Limitantes de los Sistemas Modulares .....	46
➤ La Realidad Virtual en el Diseño de Productos Modulares .....	47
➤ Sistemas de Manufactura Reconfigurable .....	48
➤ Diseño para Ensamble de Productos Modulares .....	49
<b>CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>50</b>
Objetivo .....	50
➤ Metas, Parámetros .....	50
➤ Especificaciones, Recursos.....	51
Experiencia Previa como Base del Diseño .....	51
Especificaciones de Diseño .....	55
Diseño del Módulo .....	55
➤ Los Primeros Esbozos e Ideas .....	56
➤ Diseño y Análisis Asistidos por Computadora .....	57
➤ Diseño del Actuador .....	59
➤ Diseño del Tren Motriz .....	64
Manufactura y Construcción del Módulo .....	65
➤ Generalidades y Estructura .....	64
➤ El Actuador .....	67
➤ El Tren Motriz .....	68

Control del Módulo .....	69
Aplicación del Diseño Modular al Caso de Estudio .....	72
<b>CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
Descripción del Prototipo .....	75
➤ Pruebas Experimentales del Prototipo.....	76
➤ Prueba de Runout .....	77
➤ Prueba de Backlash .....	78
➤ Prueba de Velocidad .....	79
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>80</b>
Recomendaciones .....	81
Trabajo a Futuro .....	82
<b>ANEXO 1. Árbol de Componentes .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO 2. Tabla Constitutiva de Diseño .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO 3. Plano General de Fabricación .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO 4. Matriz de Evaluación de Modularidad .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO 5. Diagrama de Control .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Fig. E1. Portada de la Obra de Galileo Galilei: “Dialogo”, 1632. [Refs. 1 y 2].....	10
Fig. E2. Hueso de un Gigante comparado con uno de proporciones ordinarias de acuerdo con Galileo. [Refs. 1 y 2].....	11
Fig. 1.1. Escala Dimensional de las Cosas. Un metro es $10^6 \mu\text{m}$ , $10^9 \text{nm}$ ó $10^{10}\text{Å}$ . [Ref. 11] .....	15

Fig. 1.2. (a) Richard Feynman observando el micromotor construido por McLellan. (b) El motor de 3.81 mm de espesor. El gran objeto encima es la cabeza de un alfiler. [Ref. 13] .....	16
Fig. 1.3. a) Micromotor comparado con un cabello humano, y b) Patas de una pequeña araña sobre los engranes de un sistema microelectromecánico. [Ref. 9] .....	17
Fig. 1.4. (a) MEMS con superficies de rodamiento y engranes de aseguramiento interno (Sandia National Laboratories). (b) Sensores de presión micromaquinados con dimensiones 17 x 700 x 1000 $\mu\text{m}^3$ . [Ref. 15] .....	18
Tabla 1.1. Comercialización de Algunos Dispositivos MEMS. [Ref. 15] .....	19
Fig. 1.5. Clasificación de la Micromecánica por el GMM .....	20
Fig. 1.6. LMM, se investiga y genera tecnología de punta automatizada, enfocada al desarrollo de Microequipo de Bajo Costo. [Ref. 18] .....	21
Fig. 1.7. Esquema de Miniaturización por Generaciones. [Ref. 19] .....	22
Fig. 1.8. Efecto de la Miniaturización en el Área Superficial y el Volumen. [Ref. 15] .....	23
Fig. 1.9. Puntos Importantes de la Miniaturización en EE.UU. en el 2000. [Ref. 8] .....	25
Tabla 1.2. Resumen del Estatus Relativo en el Desarrollo Internacional de Tecnologías de Micromanufactura. *-Lo más bajo, *****-Lo más alto. [Refs. 23, 24] .....	26
Fig. 1.10. Puntos Importantes de la Miniaturización en Japón en el 2000. [Ref. 8] .....	26
Fig. 1.11. Desktop Factory®. [Ref. 29] .....	27
Tabla 1.3. Especificaciones técnicas “3D Milling Machine: Kukulcán”. [Ref. 32] .....	27
Fig. 1.12. Vista Posterior y Frente del Proyecto “3D Milling Machine: Kukulcán”. [Ref. 32] .....	27
Fig. 1.13. Puntos importantes de la Miniaturización en Alemania en el 2000. [Ref. 8] .....	28
Fig. 1.14. (a) Mini-Factory / AMMS (FhG-IPA), (b) Módulo Pick & Place. [Ref. 33] .....	28
Fig. 2.1. El proceso de diseño incluyendo retroalimentación. [Ref. 34].....	29
Fig. 2.2. Esquema General del Profesor Altshuller. [Ref. 38] .....	34
Fig. 2.3. Diagrama de Definición de la Mecatrónica (inglés). [Ref. 41].....	36
Fig. 2.4. La Modularidad Crea Opciones. [Ref. 49] .....	39

Fig. 2.5. Matriz de Evaluación de Modularidad Generalizada. Cada subensamble y proceso se despliega en sus elementos constitutivos, atributos y subtarefas. Los cuadros contendrán valores de las relaciones de dependencia y similitud. [Ref. 44].....	41
Tabla. 2.1. Conceptos de la Metodología del Diseño Modular. [Ref. 50].....	44
Fig. 3.1. Máquinas CNC, Fresadora y Torno de la marca Boxford® .....	51
Tabla 3.1. Tabla Comparativa de Diseño .....	52
Fig. 3.2. (a) Ejes en configuración de paralelogramo, (b) Barra para transferencia de movimiento (convertidor a baja velocidad y alto par) .....	53
Fig. 3.3. (a) Prototipos de motores de 4 pasos, estator simple y control bimodal, (b) Detalle del módulo de actuación .....	53
Fig. 3.4. (a) Módulo de actuación comparado con una moneda de 1 peso, (b) Módulo de actuación completo montado en su base de acoplamiento .....	53
Fig. 3.5. (a) Módulo de actuación montado en la MMH, (b) Modelo CAD de la MMH con los módulos de actuación .....	54
Fig. 3.6. Portada de la Revista <i>Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo</i> . [Ref. 47].....	54
Fig. 3.7. Vista General de la MMH, Espacio de Trabajo.....	55
Fig. 3.8. Esbozos y dibujos iniciales del proceso de diseño .....	56 y 57
Fig. 3.9. Modelos tridimensionales del módulo. (a) Vista sólida, (b) Vista alámbrica.....	57
Fig. 3.10. Análisis espacial del módulo y algunos componentes anexos.....	58
Fig. 3.11. Configuración de algunos elementos. (a) Pertenecientes a la estructura, (b) pertenecientes al motor, (c) pertenecientes al tren motriz, (d) pertenecientes a la electrónica de retroalimentación, y (e) pertenecientes a la carcasa de protección del módulo.....	58
Fig. 3.12. Módulo de sujeción en análisis espacial y de movimiento en la MMH .....	59
Fig. 3.13. (a) Circuito magnético del motor con una fase excitada. (b) Alineación de los polos salientes del estator con los polos del rotor .....	60
Fig. 3.14. Estatores del motor a pasos de tres fases. Ejemplo: A - G - J - D, constituye una fase .....	60
Fig. 3.15. Pistas internas de los circuitos alojados en los estatores del motor. Las vistas (izq) y (der) corresponden a los frentes que se presentan en la Fig. 3.14 .....	61

Fig. 3.16. Rotor del motor a pasos de tres fases. Croquis en [mm] .....	61
Fig. 3.17. Diagrama esquemático de conexiones eléctricas de las fases del motor.....	62
Tabla 3.2. Tabla de polarización en fases para giro en un sentido del motor (sp, significa sin polarización).....	63
Tabla 3.3. Tabla de especificaciones de diseño del motor.....	63
Fig. 3.18. (a) Vista frontal de la pared central de la estructura con algunas cotas en [mm], (b) Detalle del tren motriz diseñado.....	64
Fig. 3.19. Elementos del Módulo, en etapa de construcción.....	66
Fig. 3.20. (a) Vista de las paredes trasera y central de la estructura, (b) La estructura con sus dos espacios principales.....	66
Fig. 3.21. (a) Manufactura de detalle en el collar o mandril del módulo, (b) Collar o mandril de proporciones complejas, razón geométrica de ( $\Phi$ -1, 1:14) .....	66
Fig. 3.22. (a) y (b) Conexiones del motor en sus circuitos internos y alojamiento de las bobinas como estructura propia.....	67
Fig. 3.23. Vista frontal de las conexiones del motor. Véanse las figuras 3.14 y 3.15 .....	67
Fig. 3.24. (a) y (b) Vistas del motor listo para su montaje en el módulo .....	67
Fig. 3.25. (a) Detalle del inicio del tren motriz, en la salida del motor, (b) Detalle del tren motriz en el módulo.....	68
Fig. 3.26. (a) Ritek ®, pegamento utilizado en la integración de engranes dobles y otras partes, (b) Loctite ®, pegamento utilizado en la integración del rotor con la flecha del motor .....	68
Fig. 3.27. Transición del diseño a la construcción.....	69
Fig. 3.28. Diagrama esquemático de la etapa de potencia del módulo.....	69
Fig. 3.29. (a) Señales desfasadas a la salida del microcontrolador, (b) Señales desfasadas a la salida de la etapa de potencia (entrada al motor) .....	70
Fig. 3.30. Interfaz gráfica de control.....	71
Fig. 3.31. Sistema de control. 1) Módulo, 2) Etapa de potencia, 3) Microcontrolador e 4) Interfaz con la computadora.....	71

Tabla 3.4. Tabla de valores para la Similitud y la Dependencia [Ref. 44] .....	72
Fig. 3.32. Detalle de una gráfica de proceso para el Módulo de Sujeción .....	73
Fig. 4.1. Prototipo desarrollado.....	75
Fig. 4.2. Arreglo del sistema para pruebas .....	76
Fig. 4.3. (a) Detalle de prueba de <i>run-out</i> radial, (b) Detalle de prueba de <i>run-out</i> axial .....	77
Fig. 4.4. Prueba a 60 Hz (a) Posición inicial ( $47^\circ$ ), (b) 2 revoluciones en sentido antihorario ( $53^\circ$ ), (c) 2 revoluciones en sentido horario ( $50^\circ$ ) .....	78
Fig. 4.5. Rango de velocidades alcanzado en Lazo Abierto por el prototipo.....	79



Fig. E1. Portada de la Obra de Galileo Galilei: “Dialogo”, 1632. [Refs. 1 y 2]

### *Sagredo*

A eso me refiero, [...] [a la] conclusión que siempre he estimado una falsa idea que se hace el vulgo; es decir en éstas y otras máquinas parecidas no hay que argumentar de las pequeñas a las grandes por razón de que muchos diseños de máquinas dan resultado en tamaño reducido, mientras que no funcionan si son más grandes. Pero, dado que todas las leyes de la mecánica tienen sus fundamentos en la geometría, en la que no veo que el tamaño grande o pequeño de los círculos, triángulos, cilindros, conos o cualquier otra figura sólida afecte a sus propiedades, si la máquina más grande se fabrica de forma que todas sus partes estén en la misma proporción que las de la pequeña —siendo ésta fuerte y resistente para el trabajo al que se le destina— no veo por qué no ha de ser capaz de resistir los contratiempos adversos y destructivos que le puedan acaecer.

### *Salviati*

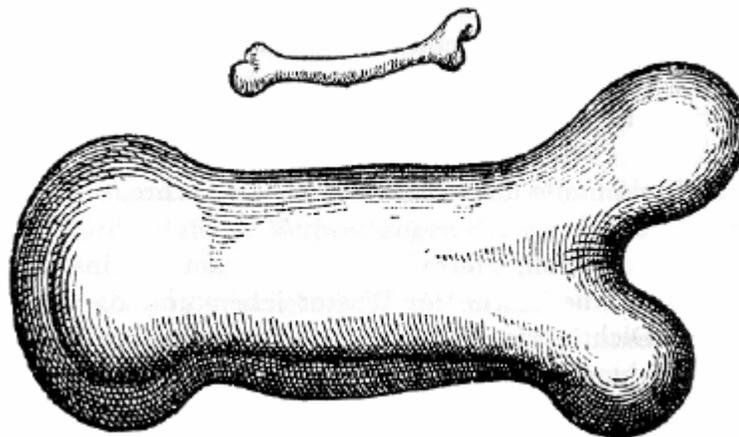
La opinión del vulgo es completamente falsa, y de tal modo banal que se puede afirmar lo contrario con la misma razón, sosteniendo que muchas máquinas se podrían hacer con más precisión en tamaño grande que en uno más reducido; así, un reloj grande, por ejemplo, mostrará y dará las horas con más exactitud que uno pequeño. Hay otras personas más inteligentes que defienden este mismo saber popular, dándole un fundamento mejor; éstos, al ver que las máquinas de grandes dimensiones no se conforman a lo que seguiría de las puras y abstractas demostraciones de la geometría, atribuyen la causa de ello a la imperfección de la materia, la cual está sujeta a gran número de alteraciones e imperfecciones. Llegados a este punto, no sé si podré, sin caer en el riesgo de ser arrogante, decir que recurrir a las imperfecciones de la materia, capaces de contaminar las purísimas matemáticas,

tampoco es suficiente para explicar la desobediencia de las máquinas, en la realidad, a las leyes abstractas e ideales de la mecánica. A pesar de todo, lo he de afirmar, sosteniendo que si se eliminan todas las imperfecciones de la materia llegando a suponerla perfectísima e inalterable, así como exenta de cualquier mutación accidental, no es menos cierto que, por el simple hecho de ser material, la máquina más grande, fabricada con la misma materia y según las mismas proporciones que la pequeña, será perfectamente simétrica con ésta y responderá a las mismas condiciones, si exceptuamos lo que atañe a la solidez y resistencia contra los asaltos violentos; y es que cuanto más grande sea tanto más débil, proporcionalmente ha de ser. Y puesto que doy por supuesto que la materia es inalterable; es decir, siempre la misma, es evidente que de ella pueden deducirse demostraciones no menos que de las puras y abstractas matemáticas.

Por todo ello, señor Sagredo, abandonad, pues, la idea que sustentabais, tal vez al unísono con otros muchos que han hecho estudios de mecánica, de que las máquinas y los artefactos compuestos de la misma materia y que mantienen con toda exactitud las mismas proporciones entre sus partes hayan de ser igualmente o, por decirlo mejor, proporcionalmente dispuestas a resistir y a ceder a los choques y violencias externas, puesto que se puede demostrar geoméricamente que las más grandes son siempre, proporcionalmente, menos resistentes que las menores. De modo que, y para acabar, hay un límite que se impone con necesidad no sólo a todas las máquinas, sino a las naturales incluso, y más allá del cual no puede pasar ni el arte ni la naturaleza, ni siquiera en el caso de que las proporciones permanezcan invariables y la materia idéntica.

*Salvati*

[...] Del mismo modo que los animales más pequeños son proporcionalmente más fuertes y robustos que los más grandes, así también se sostienen mejor los arbustos que son más pequeños. [...] Del mismo modo, creer, si se trata de máquinas artificiales, que las más grandes y las más pequeñas se pueden construir y conservar bajo las mismas condiciones, es un error manifiesto. [...] [Ref. 1]



**Fig. E2. Hueso de un Gigante comparado con uno de proporciones ordinarias de acuerdo con Galileo. [Refs. 1 y 2]**



## INTRODUCCIÓN

*Se presenta brevemente el rol de la micromecánica a nivel mundial y de manera sucinta el contenido del trabajo desarrollado.*

Las líneas de investigación relacionadas con la micromecánica presentan un importante auge en nuestra época. Tendencias tales como el uso de sistemas microelectromecánicos (MEMS's, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de microequipo se ven por todas partes del mundo. Sin embargo, más allá del tamaño, existe otra tendencia que exige el desarrollo de sistemas mecánicos compactos que permiten hacer operaciones tridimensionales. Dichas operaciones permiten realizar prácticamente cualquier tipo de operación derivada de la mecánica convencional y sus procesos de manufactura. Industrias tales como la electrónica, la relojera, la automotriz, la aeroespacial, etc.; y sectores tan importantes como la química, la medicina y la biotecnología, se encuentran en búsqueda de soluciones a problemas relacionados con el tamaño.

En la actualidad se producen industrialmente dispositivos de bajas dimensiones. Generalmente, las máquinas utilizadas para dichos elementos son de grandes dimensiones —en proporción al tamaño de la pieza—, por tal motivo se percibe la necesidad de colocar a escala dichos procesos productivos. Tal necesidad ha generado que se destinen recursos humanos y materiales al desarrollo de microfábricas.

Las microfábricas son un conjunto de máquinas de bajas dimensiones, destinadas a la producción de elementos de bajas dimensiones. Dichas microfábricas pueden conformarse —al igual que para fábricas de escala humana—, en células productivas. Estas células productivas o de manufactura, presentan la característica de estar destinadas a realizar una parte específica dentro de un proceso productivo de mayores dimensiones.

Por definición etimológica la micromecánica es el área relacionada con las investigaciones de dispositivos mecánicos con dimensiones en el rango de 1  $\mu\text{m}$  a 1 mm. La micromecánica se ha convertido, en los últimos 40 años, en un importante campo de estudio. Esto se debe en gran medida a la necesidad de generar sistemas compactos de alta

eficiencia, bajo consumo de espacio y consumo energético aminorado. Para la generación de micromecánica existen, al momento de escribir este trabajo, una gran cantidad de técnicas, sin embargo todas ellas presentan sus propios inconvenientes y ventajas. [3-21]

La gran mayoría de las técnicas empleadas para el desarrollo de la micromecánica están derivadas de otras utilizadas en el área microelectrónica. Actualmente existen diversos dispositivos que emplean MEMS, tal es el caso de cartuchos para impresoras, acelerómetros, micro-robots, micromotores, sensores de inercia, de presión, de gasto, microbombas, etc. En el 2003, el mercado de MEMS era de más de 10 mil millones de dólares a nivel mundial [22]. En los últimos años, en México ha nacido un interés por comenzar trabajos relacionados con esta área, pero hay muchas dificultades, en su mayoría relacionadas con el alto nivel de tecnología microelectrónica necesaria para producir dispositivos de este tipo. Existe otra técnica de producción de microdispositivos que no demanda tecnología microelectrónica. Esta técnica emplea microequipo para producir microdispositivos y es en la que se sustenta este trabajo.

Para desarrollar este método el Dr. Ernst Kussul, precursor del Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, junto con un grupo de colaboradores mexicanos, propuso crear una primera generación de microequipo mecánico automatizado con dimensiones pequeñas, pero que fuese posible desarrollar con máquinas herramienta convencionales y, a partir de ahí, desarrollar generaciones subsecuentes con dimensiones menores, en las cuales, cada nueva generación es producida por la generación anterior. Las ventajas de esta técnica son: desarrollo de microdispositivos de bajo costo; posibilidad para emplear diversos materiales de manufactura; posibilidad de producir microcomponentes tridimensionales; posibilidad de usar tecnologías que ya existen en México, etc. Proyectos similares se han desarrollado en Japón, Alemania, Estados Unidos, y otros países.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un prototipo de módulo de sujeción como parte del sistema de rotación de un microcentro de maquinado, origen de una propuesta para implementar sistemas modulares como una aportación clara al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo. Es en este sentido que la aportación de este trabajo vincula un caso de estudio técnico con el desarrollo de la micromecánica de generaciones en México y su futuro industrial y comercial.

En el Capítulo 1 (antecedentes) se detalla el estado de la técnica de la micromecánica, su concepción mecatrónica y los conceptos fundamentales en que se basa la investigación de esta tesis. El Capítulo 2 aborda las generalidades de la propuesta de este trabajo en torno a las bases del diseño y su aplicación modular en la micromecánica. En el Capítulo 3 se desarrolla el caso de estudio: el módulo de sujeción, como un componente funcional de una micromáquina herramienta de primera generación, sus especificaciones y las restricciones en el diseño del mismo. En el Capítulo 4 se analiza el funcionamiento del módulo, se presentan las pruebas propuestas y una descripción del comportamiento de dicho sistema. Por último, en las conclusiones, se presenta un análisis de resultados que sitúan la aportación real de este trabajo y se propone un seguimiento a futuro dentro de las líneas de investigación de la micromecánica de generaciones.

## ANTECEDENTES

*En este capítulo se establece el estado tecnológico mundial referido en este trabajo. Asimismo se muestran avances en las técnicas y tendencias de la micromecánica y el desarrollo de microequipo.*

Como base del proceso evolutivo de los productos, diferentes autores mencionan la compactación y la miniaturización como una estrategia tecnológica de gran relevancia; de esta manera se distingue claramente la necesidad de desarrollar técnicas de diseño y producción de equipo acordes con estas necesidades cada vez más demandantes. [3-8]

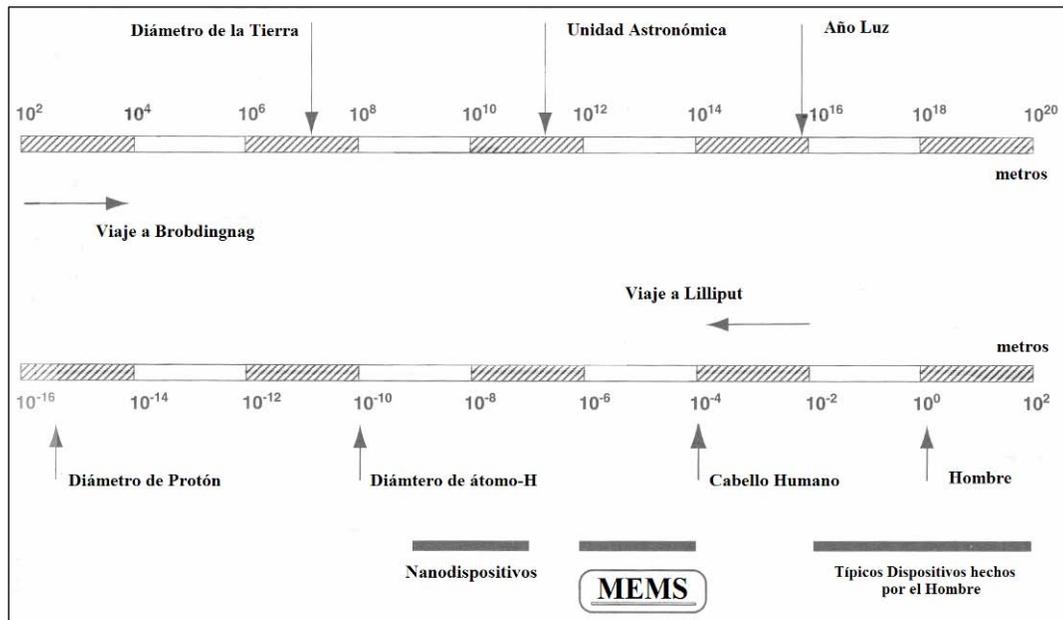
Actualmente en el mundo se desarrollan tecnologías para la miniaturización de sistemas. Ejemplo de estas tecnologías son: *Micro-ElectroMechanical Systems* (MEMS), desarrollados principalmente en los Estados Unidos de América; *MicroSystems Technology* (MST), cuyo mayor auge está en los países europeos; y por último *MicroMachine Technology* (MMT), cuyo mayor esfuerzo ha sido concentrado en Japón. [8-10]

## ORÍGENES DE LOS MICROSISTEMAS

Crear herramientas ha sido siempre una característica que nos diferencia de todas las demás especies. El *homo sapiens* arcaico era ya un *homo faber* hace algunos 400 mil años; éste diseñaba lanzas de madera aerodinámicamente funcionales. El hombre construye cosas consistentes con su tamaño, típicamente en el rango acotado por dos órdenes de magnitud mayor o menor que él mismo (véase la figura 1.1). [11]

El hombre se encuentra escasamente en el orden de ( $10^0$  m), sorprendentemente se sitúa precisamente entre las más pequeñas partículas subatómicas con órdenes de ( $10^{-26}$  m) y la extensión del universo observable, aproximadamente del orden de ( $10^{26}$  m). Un universo que se concibe no heliocéntrico, no geocéntrico sino muy homocéntrico dirían los teólogos modernos.

En los viajes de Gulliver a Lilliput que se describen en “Gulliver’s Travels” del escritor Jonathan Swift (1726) se especula sobre las posibilidades que existen en la miniaturización o magnificación de las dimensiones físicas.

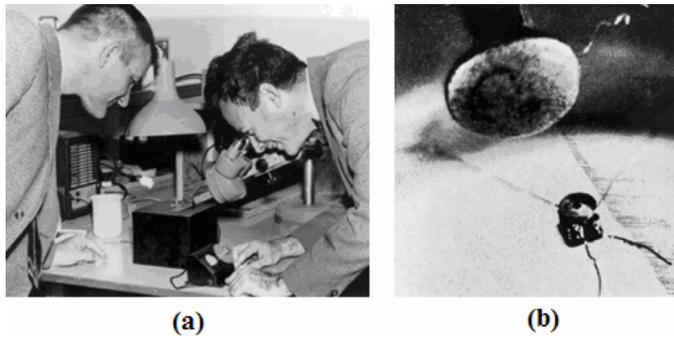


**Fig. 1.1. Escala Dimensional de las Cosas. Un metro es  $10^6 \mu\text{m}$ ,  $10^9 \text{nm}$  ó  $10^{10} \text{Å}$ . [Ref. 11]**

El físico visionario *Richard Feynman*, en su legendario discurso de 1959 ante la American Physical Society: “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” subtulado “*An invitation to enter a new field of physics*”, concibió la miniaturización de dispositivos electromecánicos que tendrían aplicaciones inimaginables. [12-14]

Este documento junto con una extensión del mismo, presentada en el Jet Propulsion Laboratory en 1983, titulado “*Infinitesimal Machinery*”, de Feynman, son frecuentemente citados como el primer eslabón en el campo de la nanotecnología. [13, 14]

Feynman habló del problema de manipular y controlar cosas en una escala pequeña. En esta conferencia, Feynman también ofreció un premio de 1000 dólares a aquel que lograra construir un motor eléctrico de  $1/64 \text{plg}^3$  y de igual manera, para aquel que pudiera tomar la información de una página de un libro y la pusiese en un área de escala lineal 25000:1, de tal manera que pudiera ser leída en un microscopio electrónico. El primer reto fue superado un año después (en 1960) por un alumno del Caltech: William McLellan.



**Fig. 1.2. (a) Richard Feynman observando el micromotor construido por McLellan. (b) El motor de 3.81 mm de espesor. El gran objeto encima es la cabeza de un alfiler. [Ref. 13]**

26 años más tarde pagó el segundo premio, esta vez a un estudiante graduado de Stanford llamado Tom Newman. La escala del reto de Feynman era equivalente a escribir 24 volúmenes de la enciclopedia británica en la cabeza de un alfiler: Newman calculó que cada letra debería tener tan sólo el ancho de 50 átomos. Utilizando litografía por haz de electrones, fue posible que escribiera en una escala de 25000:1 la primera página de “*A tale of two cities*” de Charles Dickens.

Richard Feynman señalaba que no hay nada en las leyes de la física que impida construir estructuras colocando átomo por átomo, en una forma específica. La analogía de este proceso está dada en la naturaleza; todos los seres vivos se construyen “átomo por átomo” siguiendo las instrucciones del ADN correspondiente. “La biología —dijo entonces Feynman— no es simplemente escribir información; es *hacer* algo con ella. Un sistema biológico puede ser extremadamente pequeño. Muchas de estas células son muy chiquitas, pero están muy activas; fabrican diversas sustancias, andan por ahí, se contonean, y hacen toda clase de maravillas, todo en una escala muy pequeña. Además almacenan información. Consideren la posibilidad de que también nosotros podamos construir una cosa muy pequeña y que ésta haga lo que queramos, que podamos fabricar un objeto que maniobre en ese nivel”.

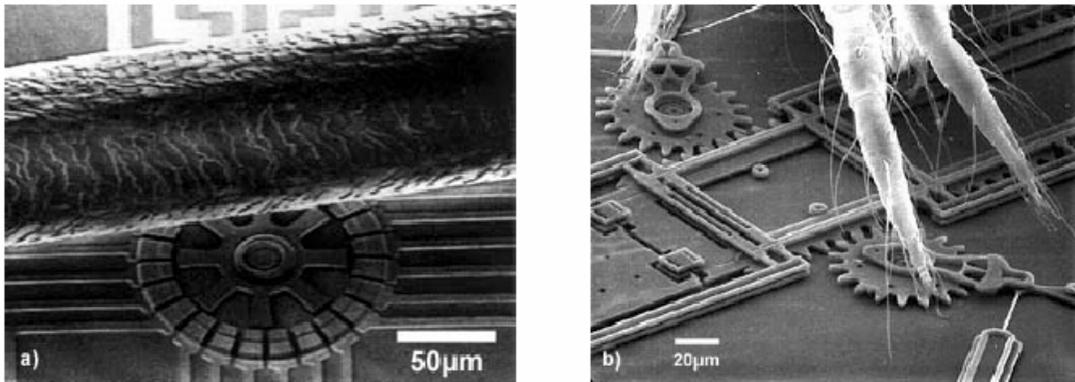
Unos 15 años después de la plática de Feynman, el científico japonés *Norio Taniguchi* introdujo el término “nanotecnología”. Recordemos que la tecnología es la actividad humana que genera herramientas o procesos a través de transformar los conocimientos científicos en aplicaciones para el desarrollo económico de una sociedad. En cuanto a “nano”, es sinónimo de enano y viene del latín *nanus*, que significa pequeñez excesiva. Nano aparece como prefijo en las unidades métricas para referirse a la milmillonésima parte de la unidad respectiva. [14]

Ishikawa [5] distingue que las tendencias tecnológicas alineadas en el campo de la ingeniería mecánica incluyen: diseño de mecanismos, diseño mecatrónico, materiales, producción, energía, información y sistemas, robots y máquinas inteligentes, biomáquinas, etc. Sin embargo, esto no será suficiente en un futuro, también serán necesarios los esfuerzos por romper las barreras entre las disciplinas humanas. Las tres direcciones que se identifican para guiar el desarrollo tecnológico en diversas áreas son: *miniaturización*

(siguiendo el desarrollo de la tecnología a los menores tamaños y con las más altas precisiones), *autonomía* (inteligencia, cooperación), y *conurrencia* (fusión de tecnologías utilizadas en otras áreas de estudio, de forma simultánea y paralela).

## LOS SISTEMAS MICROELECTROMECAÑICOS (MEMS)

Los Sistemas Micro Electro-Mecánicos (MEMS's, por sus siglas en inglés) son una conjunción de las capacidades de cómputo de la microelectrónica y la percepción y atributos de control de pequeños sensores y actuadores en un sustrato común de silicio. La electrónica se fabrica de la manera estándar de manufactura aplicada en los circuitos integrados, mientras que los elementos mecánicos son micromaquinados: ciertas partes del sustrato de silicio son selectivamente degradadas, o bien, nuevas capas estructurales son adheridas para formar el dispositivo deseado. El resultado, en esencia, es un completo sistema dentro de un chip. [11]



**Fig. 1.3. a) Micromotor comparado con un cabello humano, y b) Patas de una pequeña araña sobre los engranes de un sistema microelectromecánico. [Ref. 9]**

En ese chip es donde los sensores-MEMS obtienen información de su entorno. Mediante electrónica, estos datos son procesados, y así, los actuadores responden de alguna manera ante el estímulo. Entre los nuevos dispositivos basados en tecnología MEMS se encuentran los microsistemas de reacción en cadena de polimerasa (PCR) para la amplificación e identificación de ADN, los microscopios micromaquinados de barrido, los biochips para la detección de químicos peligrosos y agentes biológicos, y los microsistemas para la selección y seguimiento en la dosificación precisa de medicamentos. [15]

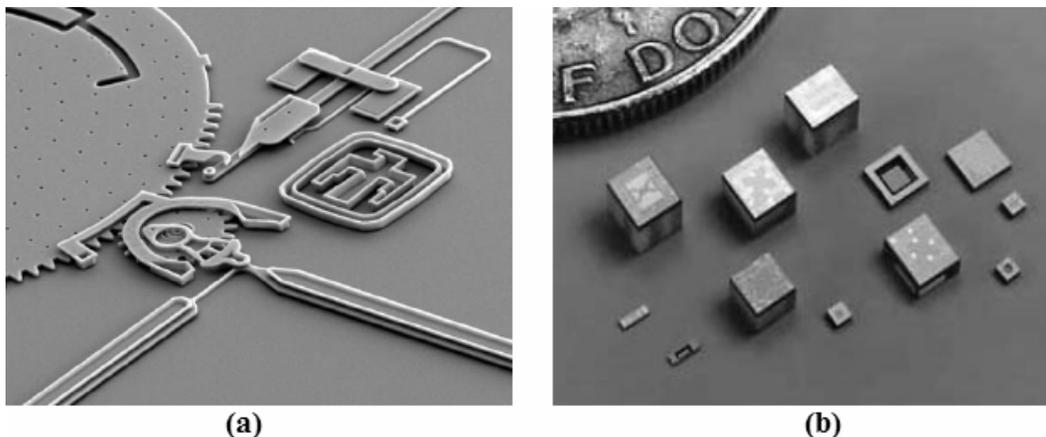
Los MEMS's y sus aplicaciones ofrecen una nueva manera de producir sistemas electromecánicos muy complejos mediante las técnicas de fabricación por lotes, algunos investigadores creen que eventualmente podría convertirse en una tecnología más poderosa que la de los circuitos integrados en microchips.

En muchas aplicaciones (desde la medicina y la biotecnología hasta la industria aeroespacial o la seguridad nacional), el uso de nano y microestructuras es de suma importancia. En especial, la teoría electromagnética y la mecánica comprenden los fundamentos para el análisis, el modelado, la simulación, el diseño y la optimización de

estos sistemas, mientras que la fabricación está basada en las técnicas del micromaquinado, que son una extensión de las tecnologías CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) desarrolladas para fabricar circuitos integrados.

Por muchos años, el desarrollo de MEMS's se ha concentrado en la fabricación de microestructuras mediante la adaptación, la modificación y el re-diseño de los procesos basados en silicio, así como de la tecnología comúnmente utilizada en microelectrónica. La razón para refinar los procesos convencionales así como la aplicación de nuevos materiales es simple: en general, las microestructuras son tridimensionales con grandes relaciones de aspecto en contraste de los dispositivos microelectrónicos que son bidimensionales. Las estructuras de silicio pueden ser formadas por micromaquinado de un volumen original utilizando procesos húmedos o en seco, o a través de micromaquinado superficial. Las técnicas de microconformado metálico, basadas en procesos fotolitográficos (*LIGA, Litographie Galvanoformung Abformung*), son ampliamente utilizadas para fabricar microestructuras. Los moldes son creados en capas poliméricas sobre superficies planas, y luego son llenados por electrodeposición de metal (ésta técnica juega un papel fundamental en la fabricación de microestructuras y microdispositivos, que son los componentes de los MEMS's).

La habilidad para utilizar y refinar las tecnologías de fabricación en microelectrónica y los materiales es muy importante, y el desarrollo de nuevos procesos para fabricar sistemas microelectromecánicos es un factor clave en el rápido crecimiento de la sustentación de la tecnología MEMS. [9, 15]



**Fig. 1.4. (a) MEMS con superficies de rodamiento y engranes de aseguramiento interno (Sandia National Laboratories). (b) Sensores de presión micromaquinados con dimensiones  $17 \times 700 \times 1000 \mu\text{m}^3$ . [Ref. 15]**

Existe un interés global en el desarrollo de la tecnología MEMS además de los EE.UU. que ha destinado recursos inusitados al desarrollo de esta área; países como Inglaterra, Alemania, Japón, Suecia, Suiza, entre otros, impulsan la investigación, el desarrollo y la comercialización de la tecnología MEMS.

Algunas líneas de desarrollo son [9]:

*Micromecanismos:* Generación de huecos, ranuras y canales; Microflexiones; Microsuperficies de rodamiento, etc.

*Microsensores:* Galgas de deformación; Detección capacitiva de posición; Sensores de presión; Sensores Inerciales; Magnetómetros; Sensores Térmicos; Sensores Químicos; Sensores de gas basados en polímeros; Sensores de resonancia; Sensores electroquímicos; Biosensores; Sensores para *Airbags*, etc.

*Microactuadores:* Microactuadores electrostáticos; Microactuadores térmicos; Microactuadores magnéticos; Microactuadores piezoeléctricos, etc.

*Microsistemas:* *Micro Total Analysis System* ( $\mu$ TAS); Microsistemas para análisis genético; *Gene Chips*; Microbombas, microválvulas, microfiltros y microagujas, etc.

*MEMS CAD:* MEMSCAP; COVENTOR; IntelliSuite, etc.

Producto	Descubrimiento	Evolución	Reducción de Costos/ Expansión de la Aplicación	Comercialización completa
Sensores de Presión	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1999- al presente
Acelerómetros	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Sensores de Gas	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005
Válvulas	1980-1988	1988-1996	1996-2002	2002
Boquillas (nozzles)	1972-1984	1984-1990	1990-1998	1998
Displays/Fotónica	1980-1986	1986-1998	1998-2004	2004
Sensores químicos y Biosensores	1980-1994	1994-1999	1999-2004	2004
Interruptores RF	1994-1998	1998-2001	2001-2005	2005
Sensores de rotación (rate)	1982-1990	1990-1996	1996-2002	2002
Microelevadores	1977-1982	1993-1998	1998-2006	2006

**Tabla 1.1. Comercialización de Algunos Dispositivos MEMS. [Ref. 15]**

## ESBOZO DE LA MICROMECAÁNICA Y SU DESARROLLO EN MÉXICO

Considerando la importancia de la compactación en el desarrollo de productos, es necesario mencionar que el realizar tareas con dispositivos de bajas dimensiones es una actividad que requiere de equipo especializado. Habitualmente, los problemas relacionados con la producción de micromecánica de tres dimensiones son resueltos mediante el uso de equipo de dimensiones muy superiores a las del producto final. [16, 17]

Actualmente, en el *Grupo de Micromecánica y Mecatrónica* (GMM) (antes Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica, LMM) del *Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico* (CCADET) de la UNAM, se desarrollan máquinas proporcionales al producto que se espera de ellas; se proponen principios, diseños y métodos de manufactura de micromáquinas herramienta y micromanipuladores correspondientes a la primera y segunda generación de microequipo.

En la Fig. 1.5 se observa una clasificación del tipo de micromecánica que el GMM desarrolla, tipo que circunscribe el trabajo de esta tesis.

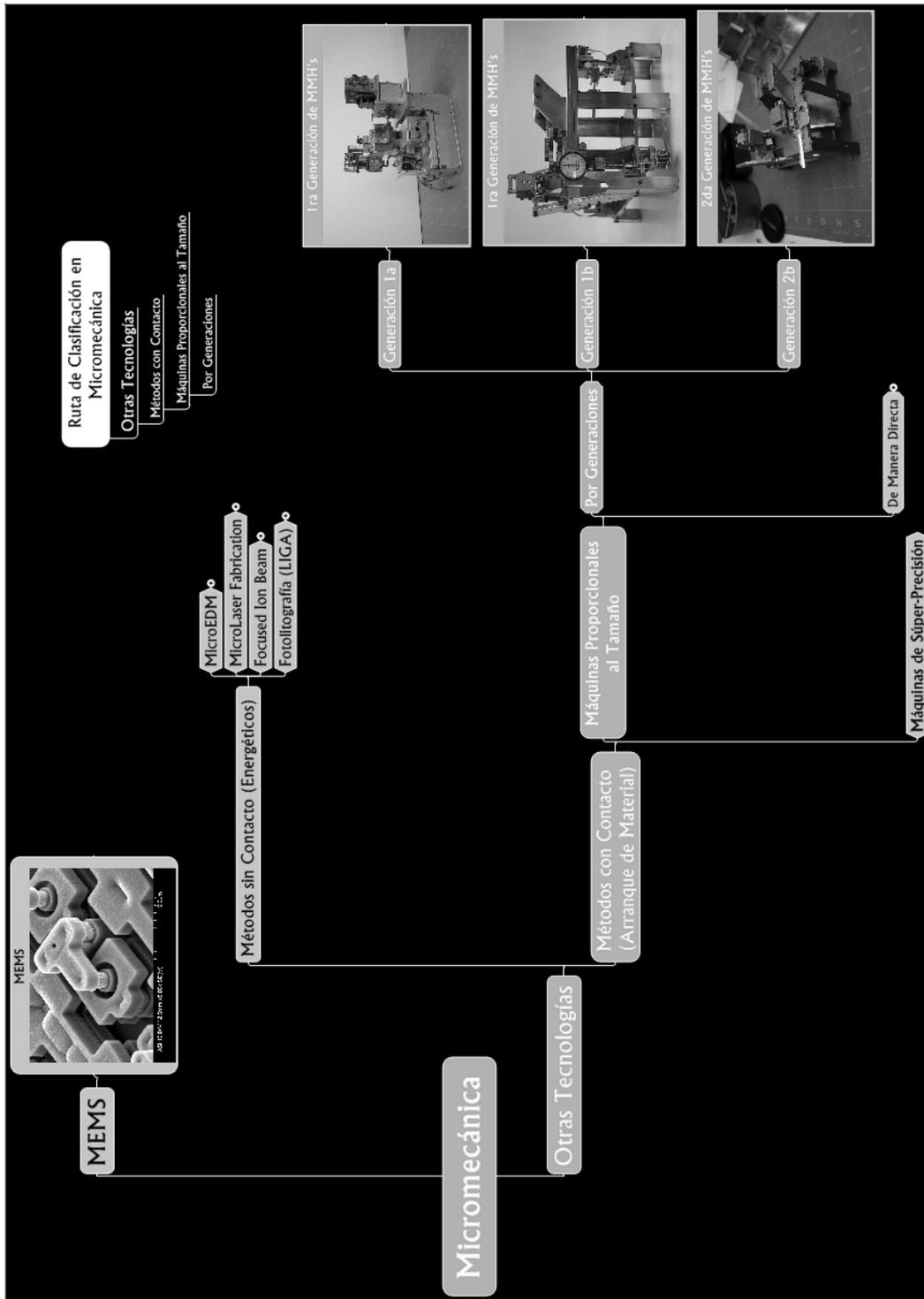


Fig. 1.5. Clasificación de la Micromecánica por el GMM



**Fig. 1.6. LMM, se investiga y genera tecnología de punta automatizada, enfocada al desarrollo de Microequipo de Bajo Costo. [Ref. 18]**

En el GMM un microcentro de maquinado se define desde 1999 como: *Una máquina herramienta que permite hacer un amplio rango de operaciones por arranque de material (taladrado, fresado, rimado, maquinado de cuerdas, etc.), que posee bajas dimensiones, o bien sus productos tienen dimensiones globales inferiores a 15 mm.* [19]

En su estudio “*Study on the Nanotechnology and Microsystems Technology Sector in Mexico*” [20], Volker Lieffering menciona la importancia y relevancia de la investigación y desarrollo de los sectores Micro y Nanotecnológicos en México. En la parte de Micromecánica la única referencia en México por el momento es el GMM, y se menciona que los puntos de investigación del antes LMM están enfocados al desarrollo de: Micromáquinas Herramienta, al estudio de la producción, procesos computacionales de ensamble y pruebas de prototipos, así como construcción de prototipos para aplicaciones prácticas. Lieffering, en el mismo estudio, expone los esfuerzos gubernamentales y de los organismos de educación mexicanos involucrados en todo este esfuerzo.

## **MINIATURIZACIÓN POR GENERACIONES**

Se parte de máquinas convencionales que permiten generar máquinas de menores dimensiones, que a su vez permiten generar máquinas de menores dimensiones. Cada reducción es considerada como una generación y cada generación tiene asociada una serie de aplicaciones y una serie de equipos adicionales, tales como actuadores y equipos finales de proceso, como pueden ser motores de pasos, o bien de combustión. [16, 17, 19]

Cabe mencionar que en lo referente al *hardware* mecánico se minimiza el uso de componentes comerciales, incluidos los motores de pasos, que son diseño y manufactura

propia. Se define como factor de compactación de generación (GDF), a la reducción que experimenta el equipo de una generación a otra. [19]

$$GDF = \frac{\text{Dimensiones de la generación anterior}}{\text{Dimensiones de la nueva generación}} \dots (1)$$

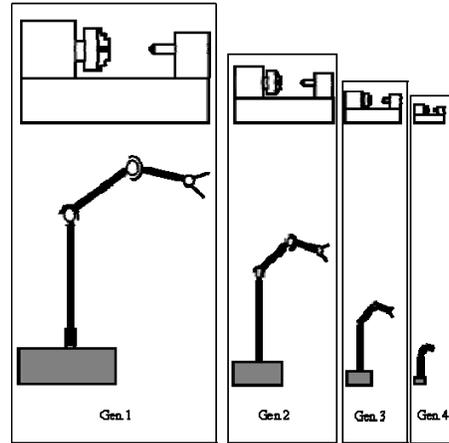


Fig. 1.7. Esquema de Miniaturización por Generaciones. [Ref. 19]

En este trabajo, se considera el diseño modular bajo la alternativa tecnológica de la producción de componentes micromecánicos. Esta tecnología se basa en la idea de la miniaturización del equipo mecánico convencional como las máquinas herramienta y los manipuladores, produciendo microequipo generacional. Se propone utilizar técnicas convencionales para el tratamiento mecánico de los materiales y el ensamble automático de dispositivos mecánicos y electrónicos para la manufactura de componentes micromecánicos y microelectromecánicos en rangos inferiores a 15 milímetros. Esta corriente de máquinas generacionales se denomina *MicroEquipment Technology (MET)* y propone utilizar procesos de producción en paralelo, teniendo como objetivo un decremento en el costo de manufactura. Esto contrasta directamente con el procesamiento por lotes utilizado en la fabricación de MEMS's. [16, 17]

### TECNOLOGÍAS M<sup>3</sup>

Los *Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)* (antecedentes: producción masiva de CI), la *Tecnología de los Microsistemas (MST)* (antecedentes: MEMS y Micromáquinas) y las *Micromáquinas (MMT)* (antecedentes: ingeniería de precisión); son términos que se utilizan de una manera semejante en Estados Unidos, Europa y Japón, respectivamente, haciendo alusión a las tecnologías de manufactura que hacen posible el desarrollo de fascinantes productos microminiaturizados. Para una mejor visión comercial y administrativa de estas tecnologías se ha convenido llamarlas M<sup>3</sup>. Pero existen diferencias conceptuales entre las M<sup>3</sup> que debemos tener muy en cuenta para objetivar los alcances de cada una de estas tecnologías. Dos clasificaciones no-técnicas, que nos ayudarán a enfocar nuestro trabajo, son [21, 22]:

- Tecnologías  $M^3$  *exógenas* (originadas desde fuera mediante un marco de referencia familiar); y
- Tecnologías  $M^3$  *disruptivas* (revolucionarias en vez de evolutivas).

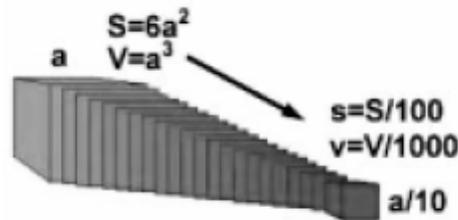
**Bajo este contexto, podemos clasificar el desarrollo de la MET en una tecnología  $M^3$  exógena, evolutiva.** Existen semejanzas al trabajo que en Japón se realiza en micromecánica, la micromaquinaria permite realizar prácticamente cualquier tipo de operación derivada de la mecánica convencional y sus procesos de manufactura. Y esto no está desligado de algunas funciones que realizan las  $M^3$ , cuyos enfoques industriales y comerciales comienzan a ser de suma importancia en el mundo. Las  $M^3$  [21]:

- permiten la manufactura de productos que de otra manera producirlos sería imposible;
- mejoran las eficiencias involucradas en la manufactura tanto como sus nuevos órdenes de magnitud se reducen;
- mejoran aspectos de desempeño en productos de uso corriente tanto como sus nuevos órdenes de magnitud se reducen; y/o
- mejoran la calidad de los productos reduciendo el número y el tamaño de los componentes.

## PROBLEMAS Y LEYES DE ESCALAMIENTO

La tecnología MEMS no es estrictamente una cuestión puramente de miniaturización sino una cuestión de manufactura especializada basada principalmente en las técnicas de fabricación de circuitos integrados. De forma similar, la miniaturización no es una cuestión puramente de la disminución de tamaño de los dispositivos existentes sino una cuestión de re-pensar por completo la estructura de un microsistema [15].

Para manufacturar exitosamente un dispositivo MEMS debe entenderse la física básica y los principios que operan incluyendo las leyes de escalamiento y apreciar tanto el nivel micro como el macro. Algunas veces no se ganan ventajas con los dispositivos MEMS en términos de desempeño, la relación tamaño/peso y confiabilidad.



**Fig. 1.8. Efecto de la Miniaturización en el Área Superficial y el Volumen. [Ref. 15]**

Algunos de los problemas a nivel micro son:

1. La fricción es mayor que la inercia. Las fuerzas capilares, electrostáticas y atómicas, así como la adherencia estática a nivel micro pueden ser de gran relevancia.

2. La disipación de calor es mayor que el almacenamiento del mismo y consecuentemente las propiedades del transporte térmico pueden ser un problema, o bien, un gran beneficio.
3. Las propiedades de los fluidos son extremadamente importantes. Los pequeños espacios de flujo tienden a ser puntos de bloqueo, o bien, regulan el movimiento de los fluidos.
4. Las propiedades de los materiales (módulo de Young, razón de Poisson, estructura de grano) y la teoría mecánica (esfuerzos residuales, desgaste y fatiga, etc.) son dependientes del tamaño.

Siguiendo a Ruiz-Huerta [19], en el ámbito de la micromecánica es conocido que las relaciones entre fuerzas y otros parámetros físicos cambian con respecto al tamaño de los dispositivos mecánicos. Para predecir las propiedades de las generaciones de microequipo se ha investigado la correlación que existe entre la precisión y los tamaños del microequipo.

## **ESTADO DE LA TÉCNICA EN MICROTECNOLOGÍA**

El estado de la técnica en el tema de microtecnología ha evolucionado los últimos 40 años, transformándose en un hito tecnológico de gran interés tanto en áreas industriales como en mercados potenciales de aplicación. Existen reportes y publicaciones desde los 90's que apuntalan la comparativa entre EE.UU., Europa y Asia de los esfuerzos que se hacen en el tema de microtecnología tanto a nivel tecnológico como político, con programas gubernamentales y leyes que impulsan la innovación y el desarrollo tecnológico. [8, 23-31]

## **INICIATIVAS MUNDIALES**

Actualmente se han identificado diversos temas que serán importantes en las tendencias microtecnológicas, algunos de estos temas son [23, 24]:

- Dificultad en alcanzar los niveles de tamaño requerido así como exactitud con los métodos de manufactura macroscópicos y los equipos actuales.
- La necesidad de *máquinas multifuncionales*, ej. máquinas que combinen procesos como el micromaquinado y la medición.
- Problemas asociados con el *manejo de partes, fixturing, y reposicionamiento*, debido al tamaño de las partes y los requerimientos de tolerancia.
- *Ensamble* como un proceso crítico, tal vez generando mayores retos que el procesamiento.
- *Metrología* como un proceso crítico, y la necesidad de medición *in situ*, así como métodos de inspección.
- *Reducciones del costo de equipo*, debido a la naturaleza intensiva de capital necesario para el micromaquinado.
- La necesidad de entender mejor *la influencia del escalamiento en el desempeño de los procesos*.
- Problemas en cuanto a *Materiales*, en particular, efectos de microestructura, propiedades de consistencia, e integración múltiple de materiales.

- *Propiedad Intelectual*, preocupa la inhibición a la cooperación y al libre intercambio de información; particularmente entre proveedores y clientes.
- La necesidad de un *pensamiento disruptivo y fuera de esquemas (out-of-the-box)*.

## ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

En los EE.UU. en el año 2000 se observaba la tendencia aumentada en el desarrollo de MEMS, con aplicaciones fuertes en la industria automotriz y el área de telecomunicaciones e informática. Comenzó una expansión de empresas tecnológicas *Start-Up* que impulsaron el desarrollo a nivel industrial. [8]

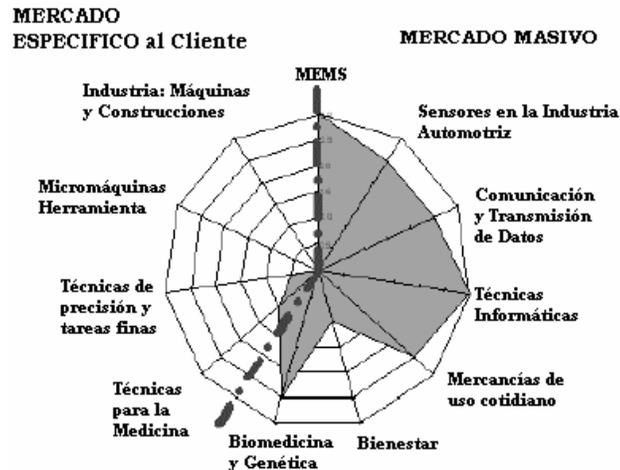


Fig. 1.9. Puntos importantes de la Miniaturización en EE.UU. en el 2000. [Ref: 8]

Las actuales tendencias de las actividades en EE.UU. llevan a la conclusión de que existen 2 principales líneas a seguir: (1) Desarrollo fundamental del entendimiento de los modelos analíticos de los procesos de micromanufactura, y (2) Desarrollo de equipo de manufactura miniaturizado. [23, 24]

La tabla 1.2 muestra que los EE.UU. alcanzan un nivel alto en I+D en nanotecnología, el énfasis de EE.UU. en I+D en micromanufactura se queda por debajo del resto del mundo. Esto tendrá seguramente efectos a largo plazo ya que se reconoce que la micromanufactura será una tecnología crítica de habilitación para cerrar la brecha (*gap*) entre los desarrollos en nanotecnología y su realización en productos y procesos útiles.

Los EE.UU. presenta niveles bajos particularmente en el financiamiento gubernamental en I+D en micromanufactura y el desarrollo de las interacciones industria-universidad-gobierno. En este punto Europa parece ser muy fuerte, particularmente en las alianzas y colaboraciones que afinan los desarrollos para la adaptación industrial y la comercialización.

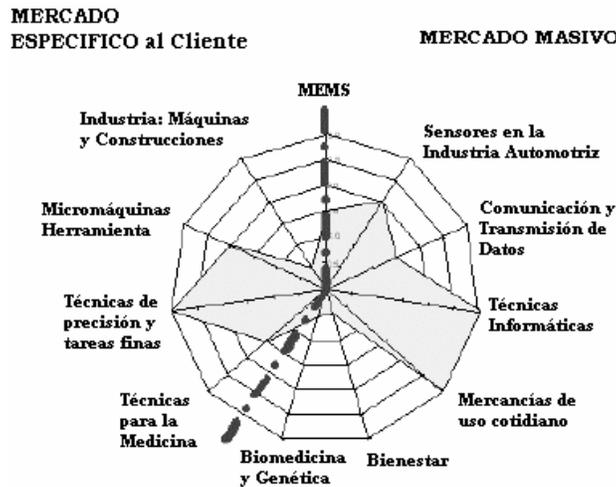
En Mayo del 2000 se realizó el Workshop M<sup>4</sup> “Micro/Meso-Mechanical Manufacturing” en los EE.UU. bajo el auspicio de la *National Science Foundation (NSF)*. En dicho Workshop se concluyó que se debía clarificar la importancia de estas tecnologías y la necesidad de educar en este sentido para retomar el liderazgo en este campo [30].

Actividades	Japón	Taiwán	Corea	Europa	EE.UU.
Financiamiento Gubernamental en Micromanufactura	****	****	***	*****	*
Estado de la tecnología de Micromanufactura	*****	****	***	*****	**
Industria/Universidad/Gobierno	***	***	****	*****	*
Estado de la nanotecnología	****	**	*	***	*****

**Tabla. 1.2. Resumen del Estatus Relativo en el Desarrollo Internacional de Tecnologías de Micromanufactura. \*-Lo más bajo, \*\*\*\*\*-Lo más alto. [Refs. 23, 24]**

## JAPÓN

En Japón, en el año 2000 se observaba una tendencia acentuada en la miniaturización de todo tipo de sistemas, aprovechando su conocimiento (*know-how*) en las técnicas de precisión y producción en el desarrollo de componentes miniaturizados y altamente sofisticados. [8]

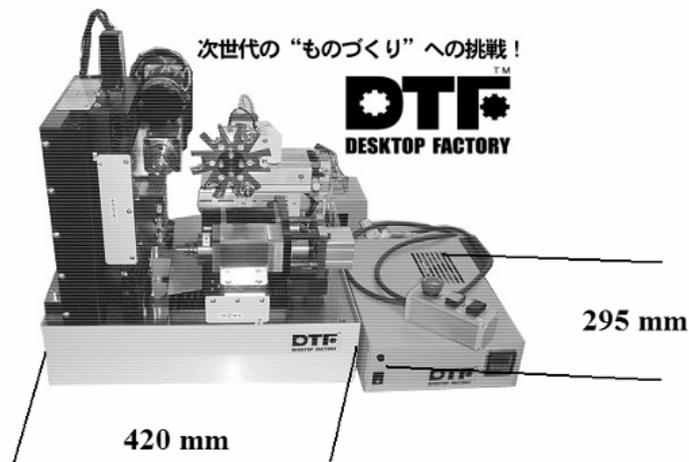


**Fig. 1.10. Puntos importantes de la Miniaturización en Japón en el 2000. [Ref. 8]**

Actualmente el desarrollo de las Microfábricas radica en la necesidad de mejorar las técnicas de micromanufactura. Las ventajas actuales esperadas en el uso de microfábricas se enuncian de forma completa en [28], pero hay una que nos llama la atención relacionada con aspectos modulares:

- Diseño de máquinas orientadas al usuario: podrá desarrollarse fácilmente el Diseño Modular, y las máquinas podrán ser reconfigurables. Los usuarios podrán diseñar y configurar sus máquinas por sí mismos.

En desarrollos más recientes, asociados a la comercialización de productos, encontramos el ejemplo de la empresa Sankyo Seiki Mfg. Co., que bajo la estrategia de competir en mercados globales en el sector de manufactura ha implementado el concepto de Microfábrica como Desktop Factory® (o DTF®).



**Fig. 1.11. Desktop Factory®.** [Ref. 29]

Siguiendo a Okazaki [28], los impactos en la manufactura se verán reflejados en la construcción de los equipos y sus mecanismos tanto en que serán más simples y mucho más baratos. Las máquinas se modularizarán por funciones, interconectándose inteligentemente tal que la transferencia del trabajo será el siguiente tema a tratar. No será necesario contar con equipos muy sofisticados (*high tech*) y de numerosos ajustes para tener buenos parámetros de eficiencia. El concepto de Microfábrica disminuye el número de procesos y las técnicas de producción son fáciles de asimilar.

Algunos mexicanos han trabajado con el doctor Okazaki bajo el auspicio del programa JICA de intercambio entre México y Japón. Un ejemplo de esto es el proyecto “3D Milling Machine: Kukulcán”, trabajo desarrollado en el 2005 [32]. Las especificaciones técnicas como resultado de este trabajo son:

ESPECIFICACIÓN	UNIDAD	VALOR	
Dimensiones de la Máquina	mm	295 x 295 x 370	
Peso	kg	15	
Volumen de Trabajo. Ejes X, Y y Z	mm	35 x 35 x 40	
Resolución (misma para los tres ejes)	μm	0.5	
Máxima Velocidad de Alimentación en los ejes XYZ	mm/seg	25, 25, 10	
Velocidad de Husillo (motor con torque servocontrolado)	RPM	10,000 (máx)	
Diámetro de Vástago	mm	3	
Dimensiones Máximas de Pieza de trabajo.	Ancho	mm	50
	Largo	mm	sin límite
	Altura	mm	80

**Tabla. 1.3. Especificaciones técnicas “3D Milling Machine: Kukulcán”.** [Ref. 32]



**Fig. 1.12. Vista Posterior y Frente del Proyecto “3D Milling Machine: Kukulcán”.** [Ref. 32]

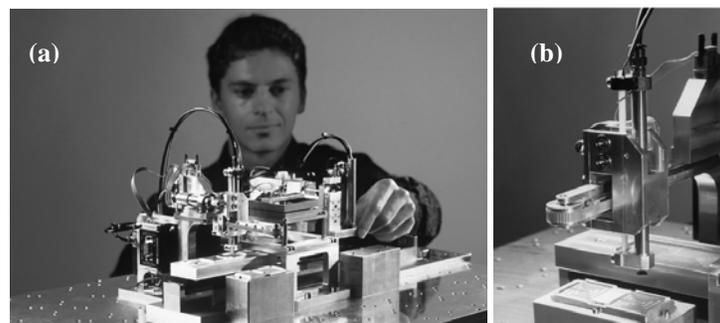
## ALEMANIA

En Alemania, en el año 2000 se observaba una tendencia acentuada en el desarrollo de la tecnología de sensores aplicados a la industria automotriz, las tecnologías biomédicas y de precisión también ocupaban los esfuerzos primarios, poco esfuerzo se encontraba en las tecnologías paralelas a los MEMS como las Micromáquinas Herramienta. [8]



**Fig. 1.13. Puntos importantes de la Miniaturización en Alemania en el 2000. [Ref. 8]**

Actualmente existen esfuerzos de investigación importantes. El *Fraunhofer Institute für Produktionstechnik und Automatisierung* ha desarrollado el concepto Mini-Factory, el cual tiene una construcción modular incluyendo la plataforma de la base, los actuadores, las unidades de control y transferencia, así como el hardware y el software [31]. El concepto fue inclusive evolucionado al de Sistema de Microproducción Modular Avanzado (*Advanced Modular Microproduction System, AMMS*), apuntalándolo como un sistema muy flexible en la producción y listo para el mercado. [33]



**Fig. 1.14. (a) Mini-Factory / AMMS (FhG-IPA), (b) Módulo Pick & Place [Ref. 33]**

## EL DISEÑO MODULAR EN LA MICROMECAÁNICA

*En este capítulo se establecen algunas nociones referentes al diseño en ingeniería, sus principios, su integración con diversas disciplinas y tecnologías, así como una corriente de aplicación: el diseño modular.*

### EL PROCESO DE DISEÑO

El diseño en ingeniería es el proceso mediante el cual los requerimientos y las limitantes contenidas en la especificación de un diseño se transforman en soluciones de manufactura, con lo cual es posible desarrollar un producto. La efectividad del proceso de diseño se mejora introduciendo un factor de retroalimentación en algún punto de comparación donde es posible juzgar la solución dada utilizando criterios provenientes de la propia especificación de diseño (Fig. 2.1). Siguiendo este proceso de diseño, generalmente se requieren algunas iteraciones antes de que se alcance el nivel de calidad requerido en el diseño. [34]



**Fig. 2.1. El proceso de diseño incluyendo retroalimentación. [Ref. 34]**

Siguiendo a Aguirre Esponda [34], el grado con que un diseño es modificado durante su evaluación, indica el grado inicial de *mérito técnico*. El mérito técnico de una solución de diseño refleja su capacidad para ser optimizado, esto es, la eficiencia con que los materiales y otros recursos han sido utilizados.

Al definir la *configuración*<sup>1</sup> de un diseño conceptual nos acercamos al problema del *diseño preliminar (embodiment)*, que resulta en un prototipo o versión beta del diseño. El diseño preliminar define el número y la disposición de las partes en un sistema técnico. Los sistemas técnicos con una configuración deficiente normalmente presentan un bajo desempeño, una baja confiabilidad y están sobre-diseñados. Las ventajas de encontrar una configuración óptima incluyen ganancias en el desempeño, la confiabilidad y la economía.

## PRINCIPIOS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Recomendaciones de Diseño (*Design Guidelines*) es un término genérico que se refiere a diversas máximas, reglas u otras formas de experiencia en diseño que sugieren líneas a seguir para solucionar problemas de diseño, y en especial para nuestro interés, líneas que sirven de apoyo en las etapas que aborda el diseño preliminar. [34]

La mayoría de los diseñadores desarrollan un conjunto propio de recomendaciones de diseño a partir de su experiencia, y muchas recomendaciones de diseño están disponibles en la literatura. Sin embargo, las recomendaciones de diseño más útiles para encontrar configuraciones de alto mérito técnico están relacionadas con la experiencia y la habilidad del diseñador para aplicarlas.

Muchas publicaciones presentan los principios de diseño como verdades incuestionables, bajo la consideración de un alto número de ejemplos. Muy pocas de ellas reportan alguna investigación o trabajo experimental para probar su validez. A pesar de ello, no se demerita la valiosa contribución que los autores de dichas publicaciones han hecho hacia la identificación de verdaderos principios de diseño.

Los principios de diseño deben tener 2 características fundamentales [34]:

- Que los sistemas técnicos alcancen cualidades relacionadas con su configuración, esto es, cualidades relacionadas con los elementos del sistema y su disposición interna.
- Que se alcancen características o propiedades inherentes a todos los sistemas técnicos para que su validez vaya más allá de las aplicaciones particulares.

En la investigación de Aguirre Esponda [34] se han identificado tres principios básicos:

**Principio de Simplicidad.** *El número de elementos en la configuración de un sistema técnico debe ser el mínimo necesario para su correcta operación.*

Algunas recomendaciones de diseño relacionan la simplicidad con la manufactura económica, así como al efecto negativo que normalmente aparece sobre la simplicidad del sistema al incrementar la eficiencia. Es claro también que la simplicidad no es el único criterio que debe ser considerado cuando se busca un alto mérito técnico.

---

<sup>1</sup> Generalmente muchos de los parámetros de desempeño de un diseño dependen propiamente de su configuración. [35]

**Principio de Claridad u Homogeneidad.** *El grado de independencia entre las relaciones físicas y funcionales que definen la configuración de un sistema técnico debe ser el mínimo necesario para su correcta operación.*

Parafraseando una vez más a Aguirre Esponda: Reuleaux dice que la *exactitud en los movimientos de una máquina* (claridad) es una cualidad prioritaria, aun cuando tenga aunada la multiplicación del número de partes (menos simplicidad).

**Principio de Unidad.** *La contribución relativa que cada elemento en la configuración de un sistema técnico aporta a la correcta operación del sistema técnico debe ser igual.*

El estado que reporta Aguirre Esponda de las recomendaciones y los principios de diseño, así como nuestro propio acercamiento a algunas de las diferentes propuestas actuales en torno a este tema, sugieren la no-aplicabilidad rigurosa de éstas y éstos. A continuación se transcriben algunas recomendaciones de diseño; el cúmulo completo puede consultarse en el Apéndice 1 de la referencia [34]<sup>2</sup>:

Atherton (1940) *Téngase como objetivo la simplicidad y la economía de fabricación incluyendo las partes intercambiables.*

Harrisberger (1966) *¡Simplifique! ¿Cuál es el camino más simple posible? La segunda regla fundamental en diseño es la simplicidad – obtenga el menor número de partes – con la forma más simple.*

Pahl & Beitz (1984) *La simplicidad generalmente garantiza la posibilidad de crear de manera económica. Un menor número de componentes con formas simples es producido más rápida y fácilmente.*

Pahl & Beitz (1984) *Elija formas simples para patrones y núcleos: líneas rectas, rectángulos.*

Pahl & Beitz (1984) *Una solución parece más simple si puede ser llevada a cabo con un menor número de componentes. Sin embargo, el diseñador debe siempre tener en cuenta un mínimo número de componentes con las formas más simples.*

Parr (1970) *Un producto de diseño simple es casi siempre más barato de manufacturar. Sin embargo, diseñarlo usualmente requiere más tiempo y mayor habilidad.*

Pronikov (1973) *Diseñar una máquina más simple que lleve a cabo funciones dadas, es una labor mucho más ardua que el diseñar una compleja que lo haga, debido a que aquélla demanda más soluciones novedosas de diseño que ésta.*

Pronikov (1973) *La manera de incrementar la durabilidad de una máquina y sus ensambles es elevar la resistencia a perturbaciones externas.*

---

<sup>2</sup> Para la traducción de algunos términos se utilizó la referencia [36].

- Reuleaux (1876) *Las cosas más simples no siempre son aquéllas que tienen menos partes.*
- Woodson (1966) *Cuando exista la posibilidad, todas las partes deben ser fabricadas de igual resistencia, igual durabilidad, igual vida. Idealmente esto nos llevará a un máximo de eficiencia y un máximo de economía.*
- Furman (1981) *Con los engranes, una distancia entre centros ampliada reduce el ancho de cara pero causa altas velocidades de línea primitiva, incrementa pérdidas dinámicas y genera mayor sensibilidad a inexactitudes del paso y perfil del diente.*

## DISEÑO PARA ENSAMBLE

La configuración de un producto tiene relación directa con la facilidad con la que éste puede ser ensamblado. Por lo tanto, mucho del conocimiento utilizado para definir una buena práctica para ensamble también puede definir configuraciones favorables. Existen tres razones válidas para tener partes separadas. Estas razones están relacionadas con la necesidad de tener [34]:

- Movimiento relativo entre las partes,
- Diferentes propiedades de material, o bien
- Acceso a alguna otra de las partes.

## DISEÑO AXIOMÁTICO

El diseño axiomático parte de la suposición de que existe un conjunto de axiomas fundamentales que guían hacia el encuentro del mejor diseño (el más productivo). Este acercamiento fue desarrollado en el MIT por Nam Suh y un grupo de colaboradores [34].

El diseño axiomático se basa en las relaciones que existen entre 4 dominios del diseño: Clientes, Funciones, Elementos Físicos y Procesos. Las necesidades de los clientes dan pie a los requerimientos funcionales. Una función que se representa por medio de los requerimientos funcionales se satisface por medio de la interacción de los elementos físicos del producto. Estos elementos físicos están caracterizados por los parámetros de diseño. Los parámetros de diseño típicos son las dimensiones y otras propiedades geométricas, y propiedades tales como la densidad o el esfuerzo de fluencia. Finalmente, las variables de proceso relacionan a elementos del proceso de manufactura que afectan los parámetros de diseño. Si todas las relaciones entre estos 4 tipos de variables se conocen, entonces el efecto de cada variable de proceso en cada instrucción de manufactura es identificable. El enfoque de los axiomas de diseño está dado en la relación entre los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño, las funciones y la descripción de la forma que satisface las funciones.

Después de una investigación durante 12 años los axiomas fueron reducidos a dos [35]:

- **Axioma de Independencia:** *Manténgase la independencia de los requerimientos funcionales.* Esto significa que, idealmente, un cambio en un parámetro de diseño específico debe tener efecto sobre una sola función, desafortunadamente las funciones

usualmente no son independientes, pero no por ello debe ignorarse este axioma, ya que representa una base importante en la teoría de diseño.

- **Axioma de Información:** *Minimícese el contenido de información del diseño.* La importancia de este axioma radica en el siguiente enunciado: el diseño más simple tiene la mayor probabilidad de éxito y es la mejor alternativa.

Aún no es claro si los axiomas propuestos se aplican de igual forma al diseño de sistemas como al diseño de procesos, y si en su extensión pueden ser utilizados en todas las áreas de la ingeniería. El diseño es en sí el proceso de mapeo de los requerimientos en el dominio funcional a los parámetros en el dominio físico. Ya que no hay una sola forma correcta de mapeo entre estos dos dominios, los axiomas de diseño pueden utilizarse para optimizar el proceso de mapeo. [37]

## OTRAS APROXIMACIONES

Diversas aplicaciones apuntan hacia los *desarrollos experimentales y de comparación (benchmarking)* como una buena herramienta para optimizar los diseños, basadas en gráficas y tablas comparativas, de las cuales es posible extraer conclusiones de sistemas técnicos y naturales. Dentro de los ejemplos de estas aplicaciones se encuentran los siguientes métodos: *Graficar Datos Disponibles, Naturalismo, El Método de Taguchi, Quality Function Deployment (QFD), el método TRIZ (Teorija Rezhenija Izobretatelskikh Zadatech)*<sup>3</sup>, etc.

En contraste existen también algunos *desarrollos analíticos* como los *Cálculos Exhaustivos y la Optimización Paramétrica*, que en general están basadas en expresiones que describen relaciones entre las propiedades de los sistemas técnicos de una manera precisa y explícita. Dichas expresiones pueden mostrar información de funciones derivativas o integrales y son un método poderoso al relacionar variables de diseño. Desafortunadamente no todas las relaciones requeridas pueden ser expresadas en términos analíticos.

## TEORÍA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INVENTIVA, TRIZ

La metodología TRIZ fue introducida por el científico e inventor ruso Genrich Saulovich Altshuller (1926-1998) a finales de la década de los cuarenta cuando, analizando miles de patentes, descubrió las leyes de la evolución de la tecnología, los principios de innovación así como los parámetros de contradicciones que le permitieron cimentar las bases para estructurar toda una metodología para la innovación sistemática [38].

Hoy en día, la TRIZ se utiliza para la resolución de los problemas técnicos clasificados como extremadamente complejos, o imposibles de resolver. Este tipo de problemas existen en los procesos industriales y normalmente no se resuelven, sino sólo de manera parcial y aparente. Es necesario utilizar un grado de creatividad por encima de lo ordinario y generar una solución innovadora que, de acuerdo a los principios de la TRIZ, no es costosa, no es compleja, no utiliza

---

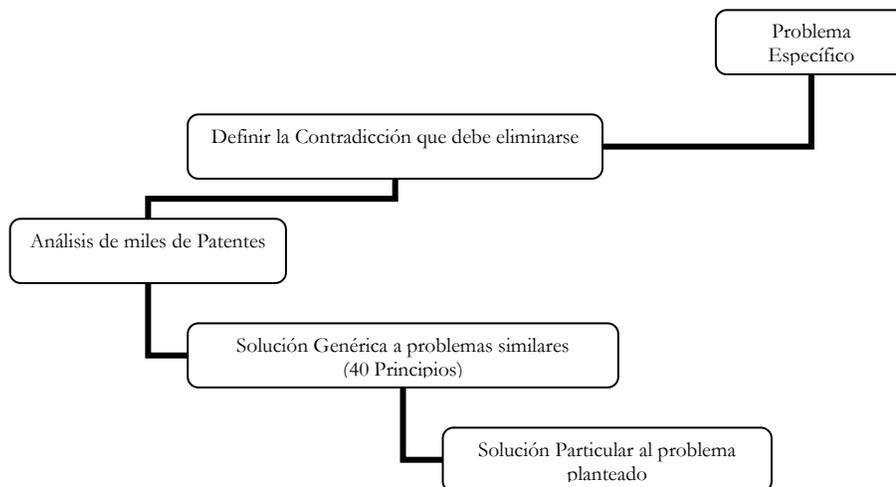
<sup>3</sup> Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva. Para inmersión en el tema de la metodología TRIZ, véase la referencia [38] y el apartado referido al tema en [35].

demasiada energía, no requiere inversión, no incrementa el esfuerzo humano y elimina la causa de la situación problemática.

Actualmente la TRIZ es utilizada por cientos de grandes industrias en los Estados Unidos, en los países europeos y en Japón. En el ámbito empresarial ha tenido una gran utilidad, a continuación se presentan solo algunas de las organizaciones y la forma en que han sido beneficiadas con dicha metodología [39]:

- BMW:** Reducir el número de partes de sus motores e incrementar su potencia.
- DELPHI:** Desarrollo de frenos de última generación.
- INTEL:** Agilizar el desarrollo de nuevos sistemas de producción.
- NOKIA:** Mejorar sus teléfonos celulares de tal manera que sean más potentes.
- FERRARI:** Mejorar componentes clave de sus motores.
- NESTLÉ:** Acelerar la producción de chocolate con reducción de costos.
- PROCTER & GAMBLE:** Optimizar procesos y productos a tal grado que ha incrementado hasta en un 200% el número de patentes que generan sus investigadores.
- BOSCH:** Generar innovaciones en sus componentes automotrices.
- SHELL:** Mejora en la prospección y refinación de petróleo.
- TOYOTA:** Reducir partes de sus motores.

En términos generales la teoría consiste en descubrir las principales contradicciones en un problema de innovación tecnológica o la necesidad de generar un invento, dichas contradicciones se dividen en: a) Contradicciones Técnicas que son las que involucran a dos elementos de un sistema tecnológico, b) Contradicciones Físicas que corresponden a una sola parte del sistema tecnológico. Altshuller propone 39 parámetros o características de cualquier sistema tecnológico así como, su aportación más importante, los 40 principios para inventar o innovar, mismos que son la base de la matriz de contradicción. Estos principios fueron obtenidos después de muchos años de estudio de miles de patentes, en la antigua Unión Soviética. Más tarde, todos los principios han sido confirmados, por otros investigadores en todo el mundo. El esquema general que aportó el profesor Altshuller para resolver un problema particular de inventiva o innovación tecnológica, se presenta en la siguiente figura:



**Fig. 2.2. Esquema General del Profesor Altshuller. [Ref. 38]**

**Axioma:** “La evolución de los sistemas tecnológicos está gobernada por leyes objetivas”

Según Altshuller, cualquier Sistema Tecnológico está integrado por “*subsistemas tecnológicos*”, por ejemplo: un automóvil tiene como subsistemas los siguientes: motor, mecanismo de frenado, sistema eléctrico, etc., los cuales tomados de manera individual, son también sistemas tecnológicos que contienen otros subsistemas.

## **DISEÑO MECATRÓNICO**

Actualmente, en el diseño de autos, robots, máquinas-herramienta, lavadoras, cámaras y muchos otros dispositivos, se adopta cada vez con mayor frecuencia este enfoque integrado e interdisciplinario para el diseño en ingeniería. A fin de poder diseñar sistemas que sean de menor costo, más confiables y flexibles es necesario lograr desde las primeras etapas del proceso de diseño la fusión a través de las fronteras tradicionales de las ingenierías mecánica, eléctrica, electrónica y de control. La mecatrónica adopta un enfoque concurrente o participativo entre estas disciplinas en lugar del enfoque secuencial tradicional del desarrollo, por ejemplo, del sistema mecánico, luego el diseño de la parte eléctrica y después la parte del microprocesador. En la mecatrónica se conjuntan áreas tecnológicas relacionadas con sensores y sistemas de medición, sistemas de mando y de accionamiento, análisis del comportamiento de los sistemas, sistemas de control y sistemas de microprocesador [40]. La definición original dada por la empresa japonesa Yasakawa Electric Company, en documentos legales de marca, versa de la siguiente manera:

*La palabra mecatrónica está compuesta por “meca” de mecanismos y por “trónica” de electrónica. En otras palabras, las tecnologías y los productos desarrollados incorporarán más y más electrónica en los mecanismos, íntimamente y orgánicamente, y con ello se hace imposible discernir dónde una termina y la otra comienza.*

Otras definiciones [41]:

- Es la integración sinérgica de la ingeniería mecánica, junto con electrónica y control inteligente, en el diseño y manufactura de productos industriales y procesos. (*Harashima, Tomizuka y Fukada*)
- Mecatrónica es la aplicación de la toma de decisiones complejas en la operación de sistemas físicos. (*Auslander y Kempf*)
- Mecatrónica es la metodología utilizada para el diseño óptimo de productos electromecánicos. (*Shetty y Kolk*)
- Un sistema mecatrónico no es simplemente la unión de sistemas eléctricos y mecánicos, y es más que un simple sistema de control: es una integración completa de todo lo anterior. (*W. Bolton*)

El desarrollo de la Mecatrónica exige cambios en la manera en que es diseñada la maquinaria. Uno de los cambios centrales en este sentido es la adopción de metodologías modulares en la construcción de máquinas. Los beneficios incluyen minimizar el tiempo de diseño, mejorar la confiabilidad de la maquinaria, reducir los costos de fabricación y simplificar las reparaciones y los servicios.

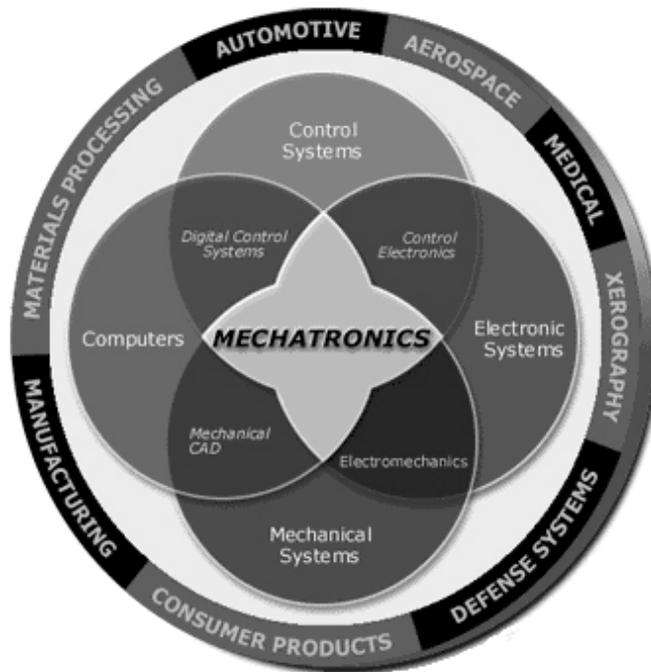


Fig. 2.3. Diagrama de Definición de la Mecatrónica (inglés). [Ref. 41]

Más allá, la fabricación de máquinas modulares (mecatrónicas) se está convirtiendo en un medio importante para satisfacer un mercado amplio y creciente en torno a la automatización de la manufactura flexible y de bajo costo. Un ejemplo de este tipo de investigaciones en torno al diseño de maquinaria modular se lleva a cabo en la *Curtin University of Technology* en Australia. [42]

La flexibilidad es el tema clave en el diseño de productos mecatrónicos. Esto puede satisfacerse creando dispositivos con módulos compatibles tipo *plug-and-play*. La modularidad reduce los costos de ensamble. El proceso de ensamble generalmente tiene un impacto aproximado del 50% del total del costo de manufactura, y de un 40 al 60% del total del tiempo de pruebas. La generación de productos modulares a través de la combinación de módulos considerando el desempeño de los mismos (ej. La capacidad de realizar pruebas *-testability-*), se considera frecuentemente como un objetivo en las mejores prácticas del diseño. [43]

Desde la perspectiva de pruebas de subsistemas electrónicos, siguiendo a Huang [43], la capacidad de los sistemas modulares de realizar pruebas mejora considerablemente si los módulos electrónicos se prueban por separado. Luego, los diseños modulares *hardware-software* deberán incorporar rutas de acceso para realizar pruebas. Esta capacidad de realizar pruebas es difícil de definir. En términos técnicos, incorpora controlabilidad y observabilidad. La controlabilidad es una medida de la facilidad o la dificultad de que se conozca el estado de los circuitos y la observabilidad es una medida de la capacidad de determinar los valores lógicos presentes en un circuito. Un sistema mecatrónico integra sistemas mecánicos, electrónicos y de tecnologías de la información.

*Como se ha expuesto, existen varias propuestas en torno al tema de diseño en ingeniería que son muy útiles al ser consideradas de manera ecléctica, ya que esta disciplina alcanza diferentes niveles de convergencia para hallar soluciones óptimas. Al seguir una sola de dichas propuestas a pie juntillas incurrimos en la necesidad de fundamentar la utilización de una u otra, lo que para fines prácticos en el desarrollo de esta tesis queda fuera de nuestro alcance. En este trabajo se han presentado algunas ideas de dichas propuestas, de las cuáles se tomarán algunas recomendaciones, que junto con la propia experiencia, se harán presentes en el caso de estudio presentado en el siguiente capítulo.*

## **EL DISEÑO DE SISTEMAS MODULARES**

Si bien es cierto que al modularizar un producto se incrementa su complejidad, también es cierto que ayuda en otro sentido. Generalmente es más fácil trabajar con un número bien definido de sistemas interconectados que con un sistema extenso e inflexible [41]. Los productos modulares tienden a contar con menos partes para el ensamble y por lo tanto resultan más baratos en su proceso de ensamble. La *modularidad* permite la reducción de costos al agrupar componentes de tal forma que es más fácil acceder a componentes menos confiables. [44]

La mayor parte de la investigación hecha sobre la modularidad se origina del axioma de independencia de Suh<sup>4</sup> que nos dice que “en un buen diseño la independencia de los requerimientos funcionales se mantiene”. En uno de los primeros trabajos de discusión de la teoría del diseño modular, Ulrich y Tung [45] utilizan la modularidad del producto como un objetivo de diseño. Chen [46] propone una medida de la modularidad basada en la independencia de los requerimientos funcionales y su sensibilidad a los cambios existentes en los parámetros de diseño. En suma, existen trabajos que: definen la modularidad, desarrollan métodos para medir la modularidad y que aplican la modularidad al diseño de productos. Aquí se expone una de esas metodologías, no de manera exhaustiva y definitiva pero como parte de lo que se apreciará prácticamente en el caso de estudio de esta tesis.

## **BENEFICIOS DE LA MODULARIDAD**

La modularidad permite al diseñador controlar el grado con que los cambios en los procesos o requerimientos afectan el producto; y al promover la *intercambiabilidad*, la modularidad da a los diseñadores más flexibilidad de conocer esos procesos variables. Esta flexibilidad genera retrasos en las decisiones de diseño hasta que más información está disponible sin retrasar así el proceso de desarrollo del producto.

Al relacionar lo anterior con el tema de este trabajo y sus fines de aplicación, encontramos que se ha definido la modularidad como *la capacidad del microequipo para integrar funciones por medio de módulos* [47]. Y algunas de las características de la modularidad observadas en el estudio referido son las siguientes:

- Permite interpretar los módulos como unidades en sí.

---

<sup>4</sup> *Vid supra* Diseño Axiomático

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

Siguiendo a Gershenson [44], los módulos contienen un alto número de componentes que tienen algunas dependencias entre sí y pocas similitudes con otros componentes no contenidos en dicho módulo. En un módulo ideal, cada componente es independiente de todos los componentes no contenidos en dicho módulo a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. Finalmente, dependiendo del producto, las conexiones entre los módulos deben permitir la intercambiabilidad de los mismos otorgando al sistema un grado mayor de funcionalidad.

## **EL PODER Y LA OPCIÓN DE VALOR DE LA MODULARIDAD**

Existe un incremento en la atención que se ha puesto en la modularidad en una gran variedad de campos, desde la neurociencia y la inteligencia artificial hasta la arquitectura, el diseño urbano y la administración. La virtud más importante de un sistema modular es la interacción de sus componentes para alcanzar el mayor valor de configuración posible en un *setting* particular. La mezcla y la compatibilidad es posible debido a que los diseñadores no tienen la necesidad de conocer de manera precisa el arreglo que los módulos tomarán una vez realizada la etapa de diseño, sólo deben saber generalmente lo que el módulo hará, cómo se conectará y fijará, y los parámetros que generan el buen desempeño del mismo. La esencia de la modularidad recae en las opciones que da a los diseñadores de revisar las decisiones clave posteriormente. [48]

Siguiendo a Baldwin [48], no todas las decisiones acerca del diseño de un dispositivo se pueden posponer: algunas decisiones son necesarias para proveer un marco de referencia para las demás. Esas decisiones preliminares servirán como reglas de diseño. Ciertas reglas de diseño son necesarias para gobernar la constitución de un sistema modular, asegurando que las partes respectivas no entren en conflicto (ej. colisiones, *bugs* de programación, incompatibilidad geométrica, etc.) tal que el sistema completo evite las fallas. Cuando dichas reglas están bien estructuradas, existe armonía entre las diferentes partes del sistema modular. El mensaje central de la exposición de Baldwin está contenido en dos frases:

1. Los diseños modulares crean opciones; y
2. Los diseños modulares pueden evolucionar mientras las opciones se persigan y se ejecuten.

Se sabe que la modularidad es una propiedad general de los sistemas complejos, luego, la modularidad estará presente de una u otra forma en casi todos los contextos industriales. Algunos diseñadores siempre tratan de crear opciones a través de la modularidad, mientras otros desean integrar todos los componentes para alcanzar altos niveles de desempeño.

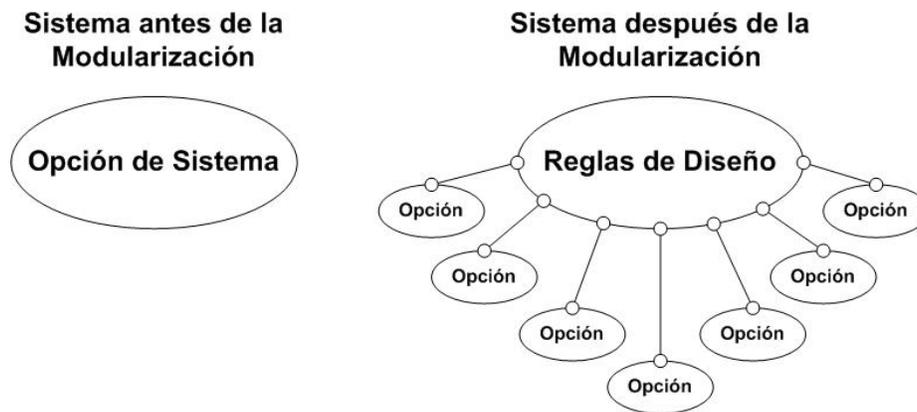
Cuando el diseño de un dispositivo se “modulariza”, los elementos del diseño se separan y se reagrupan en módulos de acuerdo con un plan o arquitectura formal. Desde una perspectiva

económica, la opción de valor de un sistema de módulos puede aproximarse mediante la suma de los valores inherentes a cada módulo y restando luego el costo de crear la arquitectura modular. Un valor positivo en este cálculo justifica la inversión en una nueva arquitectura o configuración modular. La compatibilidad entre módulos se asegura mediante las reglas de diseño, que gobiernan la arquitectura y las interfaces del sistema. Las reglas de diseño deben construirse y adherirse entre sí, esto puede ser una fuente de poder económico para las compañías que las controlen. [49]

Siguiendo de nuevo a Baldwin [49], en general, la modularización tiene 3 propósitos, los cuáles justifican una inversión en modularidad:

- La modularidad hace que lo complejo sea manejable;
- La modularidad permite el trabajo en paralelo; y
- La modularidad es tolerante a la incertidumbre.

Los diseños modulares ofrecen alternativas que los diseños no-modulares no proveen. La siguiente figura muestra de manera esquemática cómo la opción de estructura de un sistema cambia cuando va de una estructura interdependiente a una estructura modular.



**Fig. 2.4. La Modularidad Crea Opciones.** [Ref. 49]

En lo expuesto por Baldwin, el valor de cada módulo puede ser comparado con el valor comparativo establecido (*benchmark*) para cada módulo. Si el diseño de un nuevo módulo tiene un valor mayor a cero, que significa que su desempeño a los ojos del cliente es superior al existente, entonces el nuevo diseño se incorporaría al sistema, de otra forma se continuaría utilizando el módulo existente. Asumiendo que el valor agregado a un producto es conservativo, puede mostrarse que un “portafolio de opciones” es más valioso que una “opción en un portafolio”.

Intuitivamente, un diseño modular genera experimentos desacoplados y permite a los diseñadores sustituir los diseños por diseños superiores para cada módulo. En general, el número apropiado de experimentos o pruebas depende del potencial técnico del módulo, de su complejidad y visibilidad ante otros módulos. La modularidad crea valor pero esto no es gratis.

Inicialmente está el costo de crear un sistema modular interdependiente. El proceso de modularizar sistemas complejos es generalmente largo y engorroso. Claramente es más difícil separar diseños tridimensionales, complejos, curvados, y crear interfaces flexibles para éstos: aquí existen más dependencias que manejar y las tolerancias son menos permisivas. Así que, modularizar el diseño de un automóvil es un mayor problema que modularizar el diseño de un circuito electrónico: el costo de crear una arquitectura modular y sus interfaces relacionadas será mucho mayor que crear un circuito VLSI (*Very Large Scale Integration*).

La promesa implícita en un diseño modular es que las partes del sistema -los módulos- pueden ser modificadas a bajo costo antes de la fase final del producto. Las opciones de valor en un diseño modular motivan a que los actores económicos persigan la innovación y ejecuten las opciones que constituyen dicha innovación.

## LA MEDICIÓN DE LA MODULARIDAD

La medición de la modularidad, así como la medida de la “bondad” o la “habilidad X”, es más utilizada cuando se comparan modularidades relativas entre dos productos similares. Siguiendo la exposición de Gershenson [44], se han identificado 4 pasos para la medición, que implican un conocimiento profundo de las relaciones físicas y de proceso involucradas entre los componentes.

Paso 1: *Generar un Árbol de Componentes*. Un árbol de componentes detalla las relaciones físicas entre los componentes en todos los niveles de abstracción. Véase el Anexo 1, donde se ha desarrollado el árbol de componentes del módulo de sujeción de la MMH (caso de estudio de esta tesis).

Paso 2: *Generar Gráficas de Proceso*. Los diferentes procesos de ciclos de vida de los componentes en todos los módulos denotan procesos de manufactura, ensamble, función, servicio, etc.

Paso 3: *Construcción de Matrices*. Utilizando el árbol de componentes y las gráficas de proceso, se desarrollan dos matrices de evaluación de modularidades, una que registra las similitudes y otra que registra las dependencias. Existen 6 posibles relaciones dentro de la similitud y la dependencia: Dependencia componente-componente, Similitud componente-componente, Dependencia componente-proceso<sup>5</sup>, Similitud componente-proceso, Dependencia proceso-proceso y Similitud proceso-proceso; estas últimas dos relaciones no afectan directamente el diseño del producto debido a la exclusión de la interacción de sus componentes, por lo que se excluyen de la medición de la modularidad relativa y la metodología de diseño. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo general de una matriz de evaluación de modularidad.

Paso 4: *Cálculo de la Modularidad Relativa utilizando la Matriz de Evaluación para la Modularidad*.

---

<sup>5</sup> *El proceso guía el diseño*. Si el mismo proceso guía el diseño de dos componentes, los componentes deben ser agrupados en el mismo módulo para que sean susceptibles de evolucionar con el proceso y minimizar efectos en otros componentes.

$$Modularidad = \frac{S_{in}}{S_{in} + S_{out}} + \frac{D_{in}}{D_{in} + D_{out}} \quad \dots (2)$$

Donde:

$S_{in}$  (Alta Similitud entre componentes dentro del módulo)

$S_{out}$  (Baja Similitud entre componentes dentro del módulo y componentes fuera del mismo)

$D_{in}$  (Alta Dependencia entre componentes dentro del módulo)

$D_{out}$  (Baja Dependencia entre componentes dentro del módulo y componentes fuera del mismo)

<b>Matriz de Evaluación de Modularidad</b>				COMPONENTE						PROCESO					
				SubEnsamble 1				SubE 2		Proceso 1				Pro2	
				Componente 1		Componente 2		Componente 3		Tarea 1		Tarea 2		T 3	
				Attr 1	Attr 2	Attr 3	Attr 4	Attr 5	Attr 6	SubT 1	SubT 2	SubT 3	SubT 4	SubT 5	
COMPONENTE	SubEnsamble 1	Componente 1													
				Componente 2											
						Componente 3									
	SubE 2	Componente 3													
PROCESO	Proceso 1	Tarea 1													
				Tarea 2											
	Pro2	T 3													

**Fig. 2.5. Matriz de Evaluación de Modularidad Generalizada. Cada subensamble y proceso se despliega en sus elementos constitutivos, atributos y subtareas. Los cuadros contendrán valores de las relaciones de dependencia y similitud [Ref. 44]**

En esta medición se encuentra la razón de la suma de las similitudes dentro de los módulos a la similitud total, resultado que se suma con la razón de la suma de las dependencias dentro de los módulos a la dependencia total. **El rango de los valores que se obtienen del resultado final de la modularidad oscila entre 0 y 2.** El cálculo de los parámetros de la ecuación (2) se describe brevemente a continuación:

$$S_{in} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{j=i}^s \sum_{k=1}^T \sqrt{S_{ik} * S_{jk}} \quad \dots (3)$$

Donde: m (Es un módulo, i, j son componentes del mismo módulo, y k es una tarea)

M (El # de módulos en el producto)

r (Primer componente dentro del módulo m o el módulo n)

s (Último componente dentro del módulo m o el módulo n)

T (El # de procesos bajo consideración)

$S_{ik}$  (Similitud entre el componente i y la tarea k)

$S_{jk}$  (Similitud entre el componente j y la tarea k)

Este cálculo atañe sólo a la interacción Componente-Proceso. Entonces el cálculo de  $S_{in}$  para un componente del módulo A hace uso de las evaluaciones de las interacciones de Similitud Componente-Proceso para cada componente *dentro del módulo A*.  $S_{in}$  tiene un efecto positivo en la medición en tanto se trate de agrupar componentes con un ciclo de vida similar.

$$S_{out} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{n=m+1}^M \sum_{j=r}^s \sum_{k=1}^T \sqrt{S_{ik} * S_{jk}} \quad \dots (4)$$

Donde i, j son componentes de diferentes módulos, y n es un módulo. El cálculo de  $S_{out}$  para un componente del módulo A hace uso de las evaluaciones de las interacciones de Similitud Componente-Proceso para cada componente *fuera del módulo A*.

$$D_{in} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{j=i+1}^s \sum_{k=1}^T (\sqrt{D_{ik} * D_{jk}} + D_{ij}) \quad \dots (5)$$

$D_{in}$  = Interacciones Componente-Proceso + Interacciones Componente-Componente

Donde: i, j (Componentes del mismo módulo)

$D_{ik}$  (Dependencia entre el componente i y la tarea k)

$D_{jk}$  (Dependencia entre el componente j y la tarea k)

$D_{ij}$  (Dependencia entre el componente i y el componente j)

El cálculo de  $D_{in}$  para un componente del módulo A hace uso de las evaluaciones de las interacciones de Dependencia Componente-Componente y Componente-Proceso para cada componente *dentro del módulo A*. Las dependencias Componente-Componente se toman directo de la Matriz de Evaluación de Modularidad.  $D_{in}$  tiene un efecto positivo en la medición ya que es importante para agrupar componentes dependientes.

$$D_{out} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{n=m+1}^M \sum_{j=r}^s \sum_{k=1}^T (\sqrt{D_{ik} * D_{jk}} + D_{ij}) \quad \dots (6)$$

$D_{out}$  = Interacciones Componente-Proceso + Interacciones Componente-Componente

Donde:  $i, j$  (Componentes de diferente módulo)

El cálculo de  $D_{out}$  para un componente del módulo A hace uso de las evaluaciones de las interacciones de Dependencia Componente-Componente y Componente-Proceso para cada componente *fuera del módulo A*.  $D_{out}$  tiene un impacto negativo en la medición total, ya que para tener módulos independientes deben minimizarse las dependencias externas.

***Esta medición tiene poco significado por sí sola pero es bastante útil cuando se comparan opciones de diseño y sirve como guía en el proceso de rediseño.***

La *modularidad* se utiliza para describir el uso de unidades comunes para crear variantes del producto. Esto proviene de la división del producto en componentes independientes, lo que permite la estandarización de los componentes y con ello una variedad de productos diversificados. [50]

## **SOBRE LA METODOLOGÍA DEL DISEÑO MODULAR**

Siguiendo de nuevo la exposición de Gershenson [44], la metodología de diseño es un conjunto de recomendaciones cuantitativas que guían el desarrollo del producto hacia productos modulares con todos los beneficios asociados.

Se refiere comúnmente a los productos modulares como aquellas máquinas, ensambles y componentes que satisfacen varias funciones generales a través de la combinación de distintos bloques o módulos. Debido a que los productos modulares diversifican los tamaños, frecuentemente dichos productos involucran una componente de escalamiento. Los módulos deberán así ser producidos por medio de técnicas semejantes cuando esto es posible. El desarrollo de productos modulares demanda la elaboración de la estructura funcional completa, lo que requiere de mayor esfuerzo en la etapa de diseño preliminar (*embodiment*) que en el desarrollo del escalamiento en tamaños.

Los productos modulares también permiten el incremento en la producción de partes idénticas al ser éstas manufacturadas en lotes para ser utilizadas luego en diferentes módulos o unidades. Este objetivo adicional, que ayuda mucho a racionalizar la producción se relaciona con la disociación del producto en componentes elementales. Frecuentemente, el desarrollo modular se inicia cuando de lo que se ha concebido inicialmente o se ha desarrollado para un rango determinado de tamaños se espera alcance un número de variantes o escalamientos. Así, los productos que se han lanzado al mercado son comúnmente rediseñados como sistemas modulares. La desventaja aquí es que dichos productos están más o menos predeterminados; la ventaja es que sus propiedades esenciales están ya probadas, lo que un gasto caro en un nuevo desarrollo puede ser sostenible. [50]

Siguiendo a Pahl & Beitz [50] y a Huang [51], los módulos pueden clasificarse como: *básico*, *auxiliar*, *adaptivo* y *no-módulo* (véase la tabla 2.1):

1. Un *módulo básico* es un módulo que implementa funciones básicas. Las funciones básicas no son variables en principio y son fundamentales para el sistema o producto.

2. Un *módulo auxiliar* corresponde a funciones auxiliares que se utilizan en conjunto con módulos básicos para crear diversos productos.
3. Un *módulo adaptivo* es un módulo que incorpora funciones adaptivas. Las funciones adaptivas adaptan una parte o un sistema a otros productos o sistemas. Los módulos adaptivos manejan restricciones impredecibles.
4. Un *no-módulo* implementa funciones específicas del cliente que existirán en el desarrollo del diseño a pesar del cuidado que se haya tenido. Los no-módulos deben ser diseñados para tareas específicas en la satisfacción de las necesidades del cliente.

Uno de los objetivos de la metodología de diseño modular es el rediseño de productos eliminando componentes o módulos, reconfiguración de los mismos o cambios en los atributos de los componentes. A pesar de esto, en la propuesta de este trabajo se ha incluido la metodología desde una etapa temprana del diseño (*embodiment*).

Criterios de Clasificación	Distinción de Atributos
Tipos de Módulo:	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Módulos de Función</li> <li>⊕ Módulos Básicos</li> <li>⊕ Módulos Auxiliares</li> <li>⊕ Módulos Especiales</li> <li>⊕ Módulos Adaptivos</li> <li>⊕ No-Módulos</li> <li>➤ Módulos de Producción</li> </ul>
Importancia de Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Módulos Esenciales</li> <li>➤ Módulos Posibles</li> </ul>
Complejidad de Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Módulos Grandes</li> <li>➤ Módulos Pequeños</li> </ul>
Combinación de Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sólo módulos similares</li> <li>➤ Sólo módulos diferentes</li> <li>➤ Módulos similares y diferentes</li> <li>➤ Módulos y no-módulos</li> </ul>
Divisibilidad de Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Número de partes por módulo</li> <li>➤ Número de unidades y sus posibles combinaciones</li> </ul>
Aplicación de Módulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sistemas cerrados con plan combinatorio</li> <li>➤ Sistemas abiertos con plan de espécimen</li> </ul>

**Tabla. 2.1. Conceptos de la Metodología del Diseño Modular [Ref. 50]**

La eliminación es el proceso más simple. La reconfiguración es el intercambio de componentes o de módulos para incrementar la modularidad relativa total. El rediseño es más difícil que la reconfiguración porque existe la necesidad de hacer una vez más, análisis de ingeniería. La lógica de esta propuesta metodológica establece lo siguiente:

1. Eliminar módulos si éstos no son necesarios;
2. Si todo el módulo no puede ser eliminado, búsquese eliminar componentes de dicho módulo;
3. Si la eliminación es imposible, entonces trate de cambiar componentes a otros módulos o a nuevos módulos para incrementar el valor global de la modularidad del producto;

4. Si la reconfiguración no es posible, rediseñense los atributos de los componentes para disminuir o eliminar similitudes o dependencias con componentes externos o bien aumentense las similitudes con componentes del mismo módulo.

La modularidad relativa de todos los componentes en un módulo se calcula y se trata de eliminar al componente con la modularidad relativa más baja. Si el componente no puede eliminarse entonces deberá tratarse de hacer reconfiguraciones. Para reconfigurar, es necesario determinar hacia qué otro módulo es posible mover el componente. Una vez que el componente ha sido cambiado a otro módulo una revisión de factibilidad deberá llevarse a cabo para determinar la practicidad del cambio. Si la reconfiguración es imposible, los atributos de los componentes deberán ser rediseñados. Este ciclo se mantiene hasta que los componentes se cambian a módulos donde mantienen la más alta modularidad relativa posible.

## SELECCIÓN Y EVALUACIÓN

Además de determinar las necesidades técnicas, los factores económicos son cruciales en el diseño de sistemas modulares y su evaluación de lanzamiento al mercado. Ya que los módulos básicos aparecen en diversas variantes de los productos, se deberán seleccionar los principios de solución que generen los módulos básicos más efectivos en la relación costo-beneficio. El boceto (*layout*) de los módulos básicos deberá adaptarse a la demanda esperada tal que la influencia de los módulos remanentes mantiene su importancia. [50]

## PREPARACIÓN DE BOCETOS

Una vez que se ha seleccionado la solución conceptual, los módulos individuales deberán ser diseñados tomando en cuenta tanto sus funciones como los requerimientos de producción. En el diseño de productos modulares la manufactura y el ensamble son factores económicos de alta importancia. *El diseñador deberá tratar de proveer módulos básicos, auxiliares y especiales con el mayor número de partes similares y el mínimo número de partes diferentes o con procesos de manufactura diferentes.*

La determinación del número óptimo de partes en un módulo es, sin embargo, una tarea complicada pero se deberán tomar en cuenta los siguientes factores [50]:

- Los requerimientos y la calidad deben mantenerse y deberá tomarse en cuenta la propagación de errores. Entre mayor sea el número de componentes individuales, mayor es el riesgo de errores y esto tendrá repercusiones en las funciones, como por ejemplo la vibración de la máquina.
- La diversidad de funciones deberá crearse por el ensamble simple de los módulos.
- Los módulos deberán eliminarse tanto como las funciones y los costos lo permitan.
- En el *marketing* de productos modulares vistos como sistemas generales, donde el cliente puede ensamblar combinaciones de los módulos por él mismo, los módulos más comunes deben ser diseñados para permitir un desgaste homogéneo y tener la capacidad de ser remplazados fácilmente.

- Al determinar la modularidad más eficiente en la relación costo-beneficio, el diseñador deberá poner especial atención a los costos, no sólo del diseño en sí, sino en los tiempos de desarrollo y los procesos de manufactura asociados, incluyendo el ensamble, la manipulación y la distribución.

## VENTAJAS Y LIMITANTES DE LOS SISTEMAS MODULARES

Desde el punto de vista de manufactura, los sistemas modulares proporcionan ventajas en casi todas las áreas [50]:

- Agiliza el proceso de documentación para propuestas, planeación de proyecto y diseño; el desarrollo de diseño se hace una vez y se mantienen vigencias en los módulos, aunque esto representa altos costos;
- Se necesita un esfuerzo de diseño adicional para necesidades inesperadas;
- Las combinaciones con no-módulos son posibles;
- Los cronogramas generales de desarrollo se simplifican y se pueden mejorar los tiempos de entrega;
- Se pueden satisfacer órdenes de producción de módulos en paralelo; y además la proveeduría de partes es más rápida;
- Los cálculos se simplifican una vez estimados los escalamientos de los productos;
- Los módulos pueden ser fabricados para *stock* con sus consecuentes ahorros;
- La tecnología de productos modulares puede ser aplicada a los siguientes niveles de desarrollo de los productos, por ejemplo, en la planeación del producto, en la preparación de dibujos y listas de partes, en la compra de materia prima y materiales semi-terminados, en la manufactura de partes, en el trabajo de ensamble, así como en el *marketing*;
- Mejora en los tiempos de entrega;
- Más facilidad en el mantenimiento;
- Mejora en los servicios de reparación y sustitución de partes;
- Casi la total eliminación de errores, gracias a que los productos son bien desarrollados, etc.

Las limitantes de los sistemas modulares se alcanzan cuando las subdivisiones en módulos conducen a defectos o fallas técnicas y pérdidas económicas:

- Ciertas adaptaciones a los deseos especiales de los clientes no son fáciles de satisfacer con los diseños individuales (falta de flexibilidad y orientación de mercado);

- Los cambios en el producto sólo pueden ser considerados a intervalos largos de tiempo, debido a que los costos del desarrollo de diseño son altos;
- Los atributos técnicos son fuertemente influenciados por el diseño de módulos y la modularidad que lo que podrían ser si se diseñarán de forma individual;
- Hay un incremento en los costos de manufactura, por ejemplo, en superficies de acoplamiento la calidad deberá ser mayor ya que el re-maquinado sería imposible;
- La necesidad de generar combinaciones extrañas para implementar requerimientos inusuales es más costoso que generar diseños hechos a la medida;

Para el usuario hay algunas desventajas como:

- Los deseos especiales no pueden satisfacerse fácilmente;
- Algunas características cualitativas podrían ser menos satisfactorias que lo que serían con diseños de propósito específico; y
- Los pesos y volúmenes estructurales de los productos modulares son usualmente mayores que aquellos productos diseñados *ad hoc*, lo que incrementa los requerimientos de espacio y los costos de operación.

El enfoque modular ofrece beneficios a la producción de grandes volúmenes (que se origina de la producción de módulos estándar) y, al mismo tiempo, permite la producción de una gran variedad de productos a la medida que genera la satisfacción de diversos clientes. El diseño de productos modulares tiene como uno de sus objetivos la práctica del diseño óptimo en áreas de ingeniería concurrente. [51]

De los grandes inconvenientes de esta metodología es el trabajo necesario para aplicarlo, sobre todo en las matrices ya que se necesita un profundo conocimiento del producto y conlleva un arduo y tedioso trabajo de investigación y diseño, por lo mismo no se utilizará a ultranza en el desarrollo del caso de estudio de este trabajo pero sí se seguirán los principios y recomendaciones fundamentales.

## **LA REALIDAD VIRTUAL EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS MODULARES**

La presentación de un producto es crucial, especialmente cuando el diseño es colaborativo. Las técnicas existentes utilizan el protocolo VRML (*Virtual Reality Modeling Language*). Sin embargo, éste tiene dos limitaciones básicas [51]:

- Es fundamentalmente estático;
- Se pierde interacción, animación y capacidades de comportamiento de los modelos.

Una parte importante de la animación en un mundo 3-Dimensional depende de la descripción y modelado del comportamiento de los objetos. Ya que la mayoría de los sistemas mecánicos y eléctricos son diseñados utilizando *software* CAD (permitiendo su disponibilidad como modelos 3-Dimensionales), VRML es un protocolo que se espera sea extendido para permitir, por ejemplo, operaciones de desensamble y re-ensamble de partes virtuales de motores, equipos, vehículos, etc.

## **SISTEMAS DE MANUFACTURA RECONFIGURABLE**

La metodología de productos modulares es un tanto diferente del diseño de productos con partes intercambiables o reconfigurables aunque comparten ciertos objetivos y desarrollos comunes. Un Sistema de Manufactura Reconfigurable (RMS, por sus siglas en inglés) está diseñado para ejecutar cambios rápidos en su estructura así como en sus componentes de hardware y software, con el objetivo de hacer ajustes rápidos en [52]:

- la capacidad de producción en respuesta a nuevas circunstancias de mercado y
- en la funcionalidad para producir nuevas partes de la misma familia de partes.

Los Sistemas de Manufactura Reconfigurable son desarrollados mediante módulos de software y hardware que permiten diversos arreglos de una manera rápida y confiable. En un RMS la mayoría de los componentes son modulares (elementos estructurales, ejes, controles, software, herramientas, etc.). Cuando es necesario, los componentes pueden ser remplazados o actualizados para ajustarse a las nuevas aplicaciones. Los módulos son más fáciles de mantener e implican disminución de costos en el ciclo de vida. Ciertos algoritmos de compensación y calibración pueden integrarse rápidamente a los controladores de la máquina, resultando en una mayor exactitud. La aproximación modular es natural y ha sido utilizada en diferentes contextos del desarrollo humano. Las preguntas fundamentales son: a) ¿Cuáles son los módulos apropiados? y b) ¿Cómo deben conectarse para funcionar como un todo? La selección de los módulos básicos y la manera en que se conectan permite la creación de sistemas que son fáciles de integrar, diagnosticar, customizar y transformar. [52]

El *Engineering Research Center (ERC) for Reconfigurable Machining Systems* de la Universidad de Michigan desarrolla un nuevo tipo de fábrica que contiene sistemas de manufactura reconfigurable. Este Centro desarrolla herramientas analíticas y metodologías que [53]:

- Reducen el tiempo de desarrollo y aplicación de diseño en sistemas de manufactura.
- Permiten cambios rápidos en la capacidad de manufactura en respuesta a la demanda de las variaciones del mercado.
- Permiten la reconfiguración de los sistemas existentes de manufactura para producir rápidamente nuevas partes y/o productos.
- Permiten que nuevos procesos tecnológicos se integren en los sistemas de producción existentes.

Algunas de las metas de la investigación en RMS incluyen el desarrollo de metodologías en: Diseño Asistido por Computadora (CAD) para sistemas de manufactura; Diseño de nuevas generaciones de máquinas-herramienta reconfigurables (RMT's, por sus siglas en inglés) con controladores de arquitectura abierta; Puesta a punto de manera rápida y sistemática después de reconfigurar con el objetivo de minimizar las pérdidas en ventas, etc.

## **DISEÑO PARA ENSAMBLE DE PRODUCTOS MODULARES**

La modularidad de un producto permite producir productos diferentes al combinar componentes estandarizados. Una de las características de los productos modulares es que comparten las mismas operaciones de ensamble para una parte de su estructura. *Una estructura especial de un producto modular permite retos y oportunidades para el diseño de sistemas de ensamble.* Dada una familia de productos modulares, el diseño de sistemas de ensamble de bajo costo es un problema importante. [54]

Siguiendo la exposición de He [54], la habilidad de producir una variedad de productos a través de la combinación de componentes modulares es un beneficio de la modularidad de los productos. El intercambio de componentes se alcanza cuando dos o más alternativas de tipos de componentes están asociados con la misma línea del producto base para crear variantes de dicho producto. El intercambio de componentes está generalmente asociado con la creación de una variedad de productos, tal como lo percibe el cliente. Además de los beneficios de la variedad de productos, los diseños modulares permiten cambiar la apariencia y las funciones del producto.

Los sistemas de manufactura deben ser diseñados tal que se alcancen los mínimos costos y los menores movimientos del equipo (ej. eliminar frecuentes re-arreglos de máquinas herramienta, lo que es caro, especialmente en los procesos de corte de metales y ensamble mecánico). También deberá asegurarse la repetibilidad de la producción (ej. cumplimiento de calidad y estándares). Un sistema de ensamble debe diseñarse para cumplir las características especiales de los productos modulares.

## CASO DE ESTUDIO

*En este capítulo se reporta propiamente la investigación y el trabajo realizado en torno al diseño y la fabricación del prototipo de un módulo de sujeción para un microcentro de maquinado de primera generación.*

### OBJETIVO

Desarrollar un prototipo de módulo de sujeción y rotación<sup>6</sup> de una MMH de primera generación basada en palancas y paralelogramos.

### METAS

- Diseñar y construir un prototipo de módulo de sujeción de una MMH de primera generación y realizar pruebas de funcionalidad del mismo.
- Evaluar la modularidad relativa del módulo de sujeción como ejercicio práctico del desarrollo teórico del diseño modular (Cap. 2).
- Generar recomendaciones para futuros desarrollos de MMH's en términos de la aplicación del diseño modular.

### PARÁMETROS

Para el desarrollo de este prototipo, los parámetros fueron:

- De diseño simple pero incorporando conceptos de modularidad, y manufactura acorde a los procesos desarrollados por el GMM, en función de los recursos disponibles.
- De bajo costo, relativo a los desarrollos mundiales y alineado con el desarrollo del microcentro de maquinado del cual formará parte.
- Para la manufactura de piezas de revolución.

---

<sup>6</sup> A lo largo de este trabajo se ha referido a este módulo simplemente como módulo de sujeción, entendiendo su función de rotación intrínseca al mismo; se continuará refiriendo éste de la misma manera en lo siguiente.

## ESPECIFICACIONES

Las especificaciones propuestas se originan de las especificaciones generales del microcentro de maquinado de la primera generación de microequipo fabricado en México:

- Capacidad de producir piezas dentro del rango de 1 a 4 milímetros.
- Tamaño adecuado para operar en el volumen de trabajo de la MMH e intercambiable dentro de la misma MMH o bien con otros módulos asociados.

## RECURSOS

Para el desarrollo de este trabajo es importante mencionar los recursos con los que se contó, a fin de establecer el entorno de capacidades del proyecto.

Este trabajo fue desarrollado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, a través del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica. Como parte de la infraestructura con la que se contó se puede mencionar:

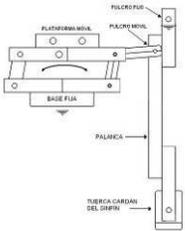
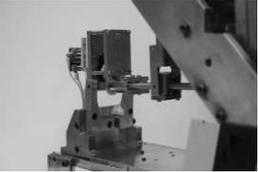
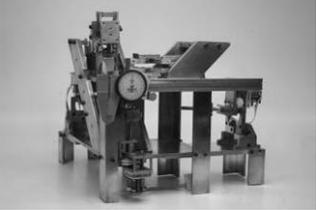
- Taller mecánico con máquinas herramientas convencionales y cuatro máquinas de control numérico de uso ligero, marcas *Sherline®* y *Boxford®*.
- Apoyo de instrumentos de medición convencionales.
- Equipo de cómputo y software para diseño tridimensional (CAD).
- Taller electrónico con equipo convencional.



**Fig. 3.1. Máquinas CNC, Fresadora y Torno de la marca Boxford®**

## EXPERIENCIA PREVIA COMO BASE DEL DISEÑO

La experiencia del GMM en el desarrollo de prototipos generacionales es la base de los desarrollos subsecuentes. La siguiente es una tabla comparativa de diseño entre el primer prototipo y el segundo de MMH's de 1ª generación:

	Primer prototipo	Segundo prototipo	Imágenes 2do Prototipo
<b>Materiales Generales</b>	Placas de aluminio y de latón de 3.125 y 6.35 mm (1/8" y 1/4" respectivamente)	Placas de latón de 3.125 y 6.35 mm (1/8" y 1/4" respectivamente)	
<b>Uniones</b>	Tornillos de 2 mm.	Tornillos Allen 1/8", elementos esféricos con sujeción a presión.	
<b>Movimientos Traslacionales</b>	(Ortogonalidad en los ejes). Se colocaron tres arreglos de motor de pasos, reductor de velocidad y tornillo de avance.	La configuración general es a partir de barras y esferas que se unen para formar paralelogramos. Se colocaron 3 módulos de actuación.	
<b>Avances en los Ejes</b>	Se utilizan guías con carros que son utilizadas comúnmente en los sistemas de avance. Estas guías son movidas por el arreglo anterior.	La idea principal consiste en utilizar una barra como un convertidor a baja velocidad y alto par. Esta barra es movida por los módulos de actuación.	
<b>Reducción y Velocidad</b>	Se tienen velocidades de avance para los ejes ortogonales de 33 mm/minuto y velocidades angulares para el eje rotacional de 196 rpm.	La velocidad estimada (con carga) es de 33 rpm en el eje sinfín y 12900 rpm del motor, debido a la reducción en la transmisión.	
<b>Resolución</b>	Se obtiene de esta manera un sistema con una resolución de 1.875µm por cada paso de avance del motor. La alimentación de la máquina es con 12 [V] de corriente directa.	El cálculo teórico y experimental confirmado de la resolución para esta micromáquina es de <b>0.596µm</b> por cada paso de avance del motor. La alimentación aprox. de 9 [V] de corriente directa.	

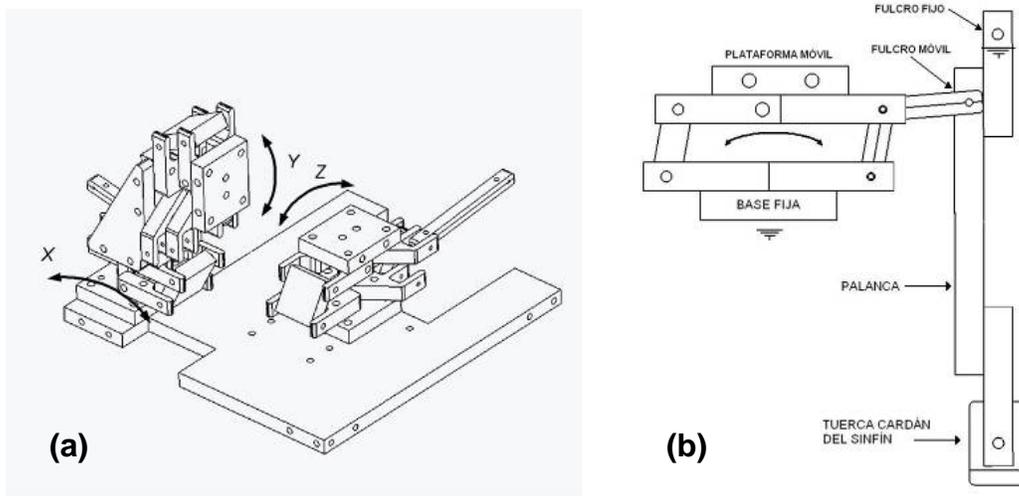
**Tabla 3.1. Tabla Comparativa de Diseño**

La tabla comparativa 3.1 muestra una evolución en el desarrollo de los prototipos y se muestran algunas de las características más importantes. La MET como se menciona en el capítulo 1 es una tecnología evolutiva, lo que nos permite refinar los desarrollos una vez generadas las especificaciones previas o bien de la siguiente generación.

Con base en la experiencia obtenida en la manufactura del segundo prototipo de MMH de primera generación, donde operará el módulo de sujeción, y el desarrollo de los módulos de actuación del mismo, se observaron algunas características que fueron enunciadas anteriormente (págs. 37 y 38).

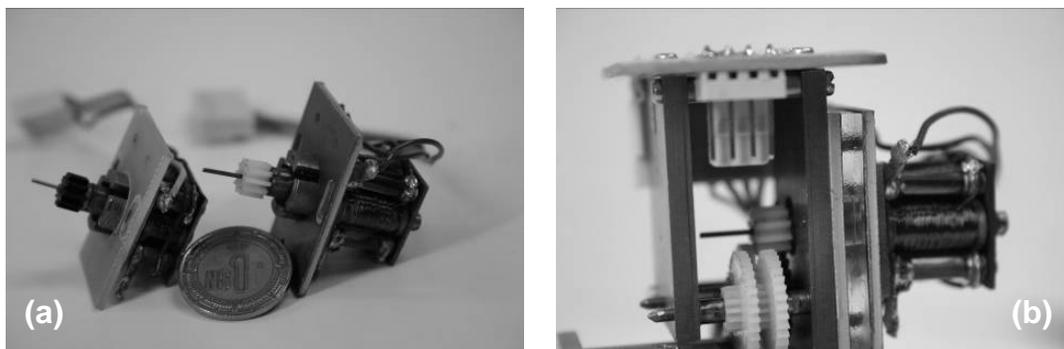
El diseño de los módulos de actuación del segundo prototipo implicó el desarrollo de diversos prototipos de motores de pasos y generó una serie de implicaciones funcionales que derivaron en algunas recomendaciones de diseño. El resultado de este trabajo previo fue la caracterización del movimiento de los ejes de la MMH y el análisis de la resolución, cuyo resultado arrojó un valor experimental de 596 nanómetros en contraste con los 534 nanómetros estimados teóricamente.

Siguiendo a Ruiz Huerta [19], el tren motriz, después de los elementos que configuran el movimiento, es el sistema más importante de una micromáquina herramienta. Los actuadores empleados son motores de cuatro pasos de estator simple, que tras acoplarse a trenes de engranes, que a su vez se conectan a un tornillo sinfín, transfieren el movimiento a una palanca mediante una tuerca montada sobre una configuración de cardán. La operación de esta MMH se basa en la dependencia de dos ejes mediante barras de acoplamiento cuyo movimiento se da mediante articulaciones rotacionales en una configuración de paralelogramo. [55]

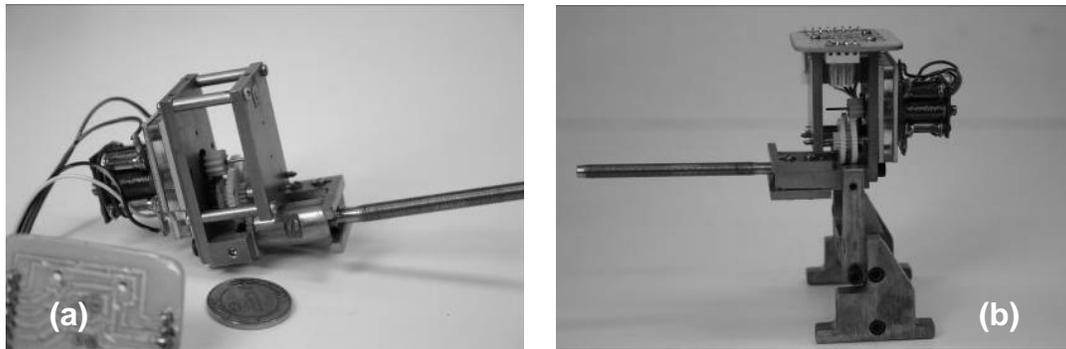


**Fig. 3.2. (a) Ejes en configuración de paralelogramo, (b) Barra para transferencia de movimiento (convertidor a baja velocidad y alto par).**

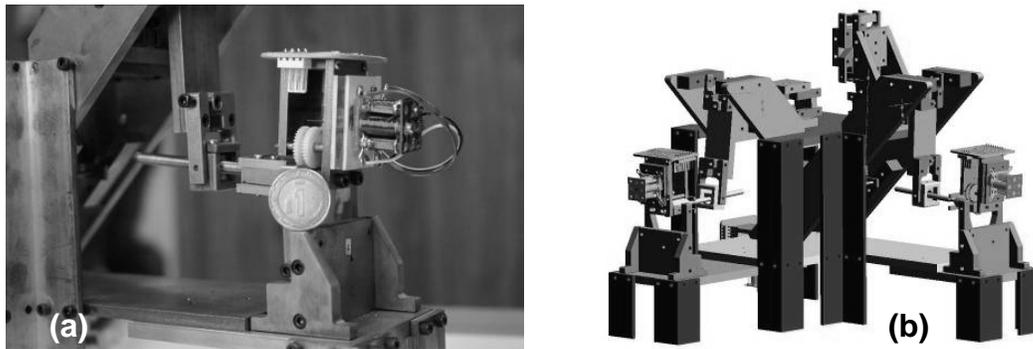
Aquí se muestran algunas imágenes como resultado de esta fase previa en la experiencia de diseño en el ámbito de la micromecánica:



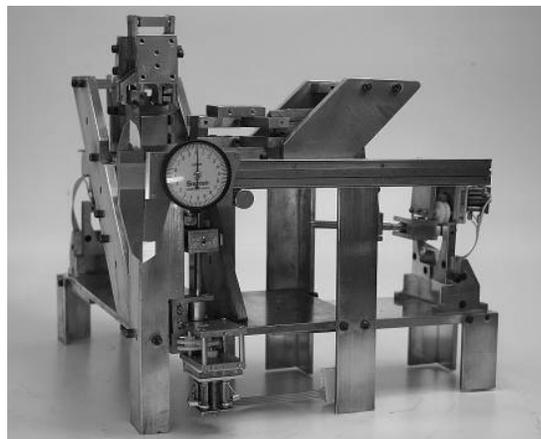
**Fig. 3.3. (a) Prototipos de motores de 4 pasos, estator simple y control bimodal, (b) Detalle del módulo de actuación.**



**Fig. 3.4. (a) Módulo de actuación comparado con una moneda de 1 peso, (b) Módulo de actuación completo montado en su base de acoplamiento.**



**Fig. 3.5. (a) Módulo de actuación montado en la MMH, (b) Modelo CAD de la MMH con los módulos de actuación.**



**Fig. 3.6. Portada de la Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo. [Ref. 47]**

La necesidad de un módulo de sujeción existe en vistas de la funcionalidad de la MMH dentro de una célula productiva, con el objetivo de iniciar los procesos de maquinado y sus respectiva caracterización. Siguiendo a Marín-Aguilar [47], la función principal de este desarrollo se estableció de la siguiente forma:

*El módulo de sujeción debe ser un dispositivo utilizado para posicionar y sujetar una pieza de trabajo para llevar a cabo alguna operación de manufactura en coordinación con el control de los módulos de actuación de la MMH.*

La secuencia de desarrollo de este trabajo se describe a continuación:

1. Propuesta de diseño tras conocer los parámetros y especificaciones del prototipo (*Brainstorming*), manteniendo la posibilidad de la alimentación automática.
2. Elaboración del diseño conceptual preliminar (*embodiment*).
3. Desarrollo de modelos tridimensionales y planos de fabricación.
4. Fabricación y desarrollo de un prototipo para el módulo de sujeción.
5. Evaluación independiente del prototipo en sus funciones y establecimiento del trabajo a futuro para evoluciones del prototipo.

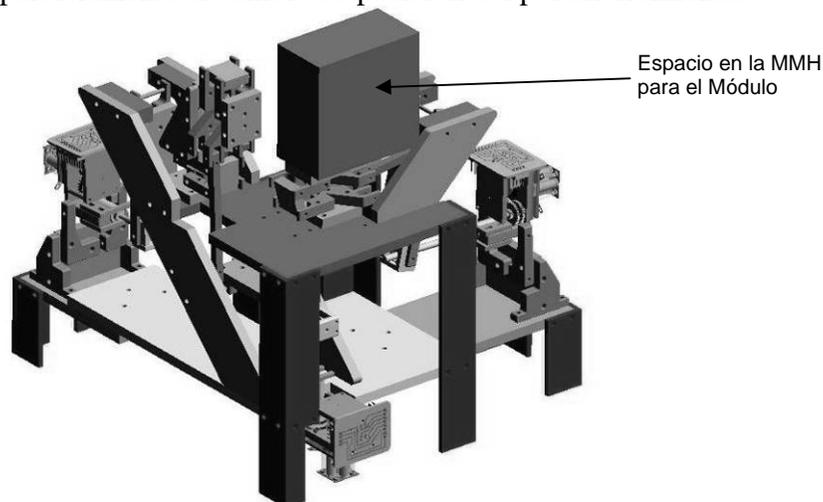
## ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Las especificaciones primordiales son:

- Volumen que ocupará el sistema  $\leq$  Volumen que se tiene disponible
- Volteo:  $\Phi_{min} = 1[mm]$  —  $\Phi_{max} = 4[mm]$ . Sistemas únicos para barras de diámetro comercial comprendidos en el rango de 1 a 4mm o la utilización de un sistema universal de sujeción tipo broquero o *chuck*.

Algunas consideraciones son:

- Espacio en plataforma para el módulo: Placas ( $e = 1/4''$ ) 30 X 25 mm.
- Versatilidad de cambio de posición (desmontaje e intercambio) del módulo de una placa a otra, paralelamente al cambio de posición del portaherramientas.



**Fig. 3.7. Vista General de la MMH, Espacio de Trabajo.**

## DISEÑO DEL MÓDULO

Dadas las características de modularidad que se comenzaron a desarrollar en esta propuesta, se propone el diseño modular estructurado como sigue [19]:

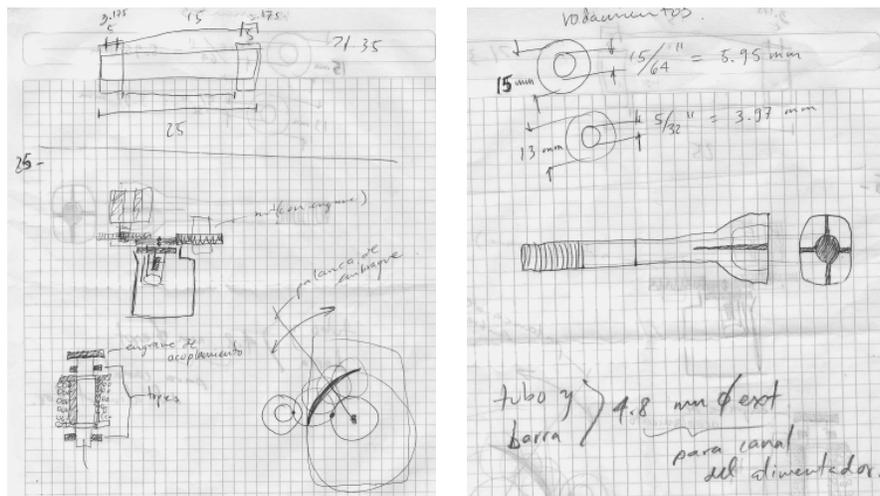
- Sistema Rotacional
  - **Módulo de sujeción (Propio de este trabajo)**
  - Módulo de alimentación (Trabajo a futuro)
  
- Sistema Traslacional
  - Módulo de paralelogramos (Listo, [19])
  - Módulo de palancas (Listo, [19])
  - Módulo de actuación (Listo, antecedente directo de este trabajo [19])
  
- Sistema Estructural
  - Módulo de estructura (Listo, [19])

El sistema rotacional involucra al módulo de sujeción, para el movimiento del eje rotacional. Este módulo es el caso de estudio propio de este trabajo. El árbol de componentes, en extenso, del módulo de sujeción se muestra en el Anexo 1 de este trabajo.

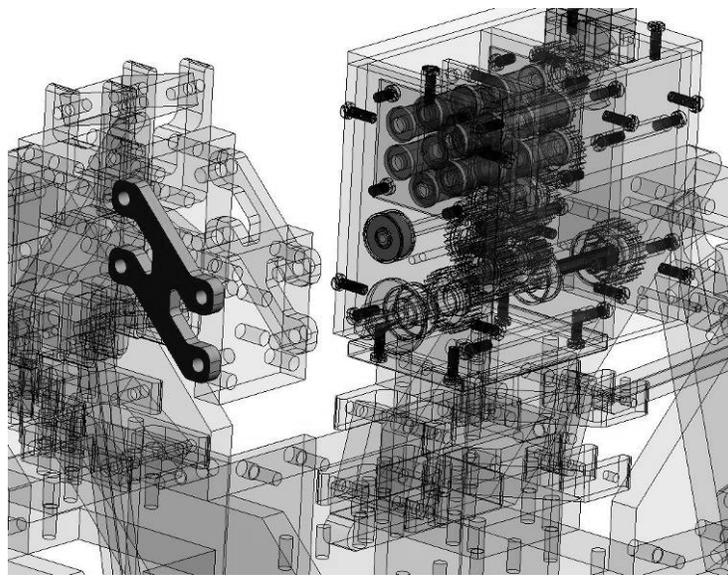
Los sistemas cumplen una función de manera independiente y específica dentro del equipo, o bien que por sus características de ensamble o manufactura, son considerados como contenedores de módulos independientes. La tabla constitutiva de diseño de la MMH, en extenso, se muestra en el Anexo 2 de este trabajo.

## LOS PRIMEROS ESBOZOS E IDEAS

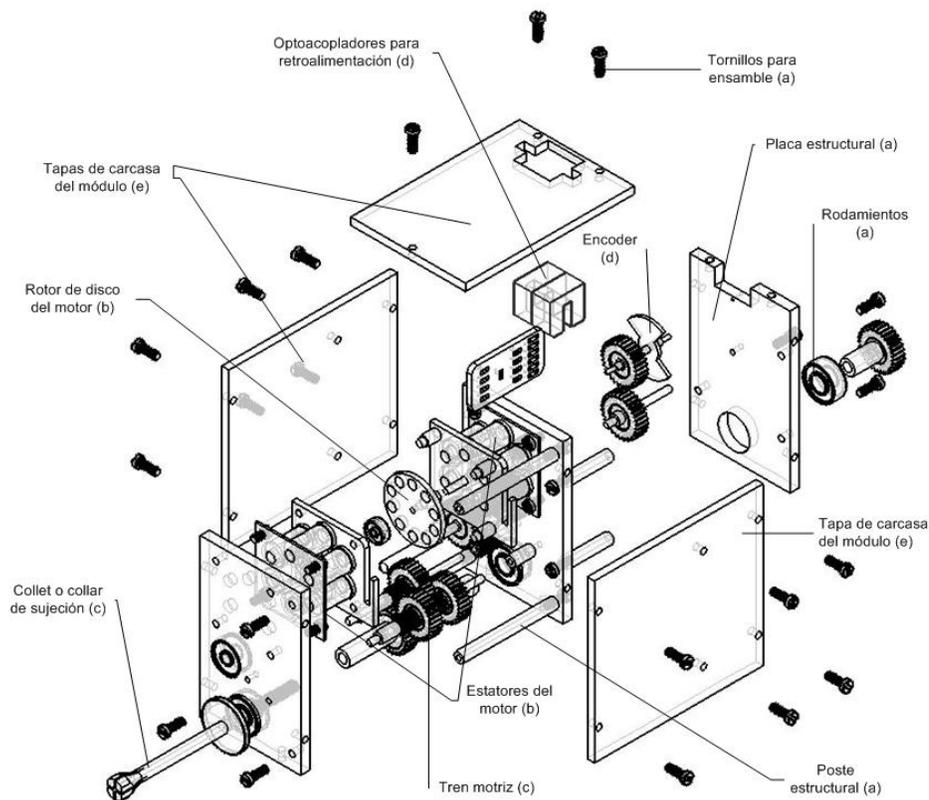
En el inicio del desarrollo de ideas se buscaron diferentes opciones para acercarse al diseño preliminar, una de ellas fue desarrollar matrices funcionales de evaluación entre diferentes propuestas de diseño, pero ello llevó a percibir la complejidad de análisis y tiempo necesario para tal esfuerzo, así que se decidió partir de la experiencia adquirida en el desarrollo previo. Aquí se muestran algunos esbozos y croquis iniciales antes de llevar dichas ideas a nivel de diseño y análisis computacional:



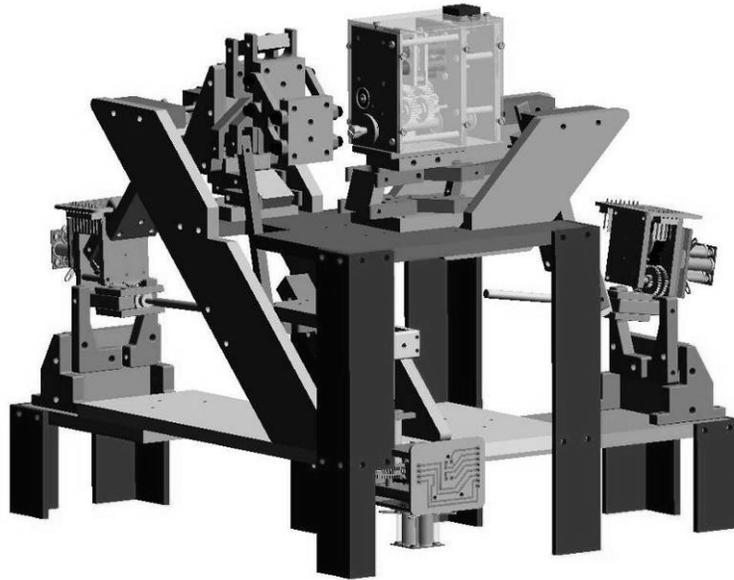




**Fig. 3.10. Análisis espacial del módulo y algunos componentes anexos.**



**Fig. 3.11. Configuración de algunos elementos. (a) Pertenecientes a la estructura, (b) pertenecientes al motor, (c) pertenecientes al tren motriz, (d) pertenecientes a la electrónica de retroalimentación, y (e) pertenecientes a la carcasa de protección del módulo.**



**Fig. 3.12. Módulo de sujeción en análisis de movimiento en la MMH.**

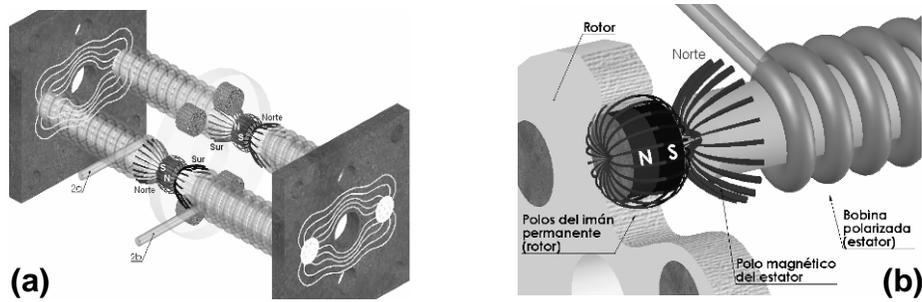
## **DISEÑO DEL ACTUADOR**

Los motores de pasos son ideales para el posicionamiento, ya que son de fácil manejo y normalmente no necesitan una constante retroalimentación (control a lazo cerrado) o monitoreo. Lo único que requieren es un número exacto de pasos para llegar a una posición exacta y repetible. El control a lazo abierto es ideal para sistemas que operan a bajas aceleraciones y cargas estáticas, pero un sistema de lazo cerrado es esencial para altas aceleraciones y cargas variables. [47, 56]

Con el fin de obtener ambas virtudes se propuso, derivado de la experiencia del GMM en el desarrollo de este tipo de motores, un motor de pasos de nueva configuración pero manteniendo una operación bimodal con el objetivo de alcanzar velocidades de corte de material aceptables en lazo cerrado, y de alta potencia en lazo abierto.

Típicamente, los motores de pasos presentan precisiones en sus ángulos de paso entre 3% y 5%; este error no es acumulativo entre paso y paso. Dicha precisión está en función de la exactitud en la manufactura de las partes mecánicas que componen los motores. El par del motor está en función de la velocidad, de la fuerza magnética, del ángulo de torque, así como otros parámetros de maquinado. [57, 58]

El motor que se decidió implementar es un motor de doble estator, configuración que mejora la respuesta ante una demanda mayor de par, esto es debido a que los espacios (*gaps*) en los circuitos magnéticos se minimizan en contraste a los que existen en los motores de estator simple.

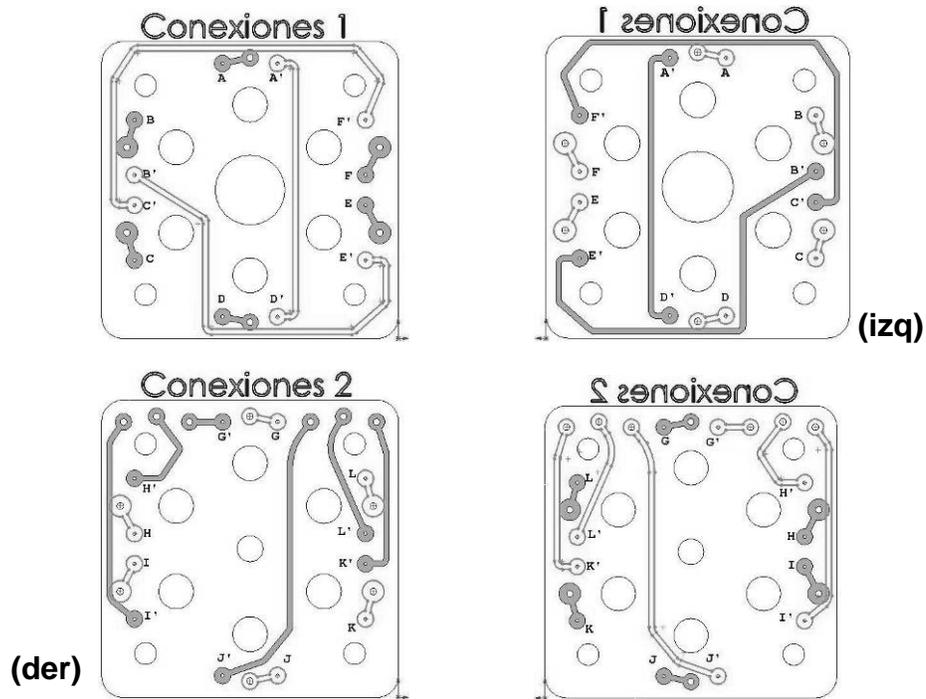


Dadas las especificaciones geométricas se analizaron algunas configuraciones y se decidió utilizar una configuración diferente a las que se habían desarrollado, con el objetivo alterno de aportar un nuevo desarrollo. El motor propuesto cuenta con tres fases, es decir con 2 estatores que alojan 6 bobinas cada uno. El rotor aloja 10 polos magnéticos, es decir, 10 imanes cilíndricos distribuidos de manera radial, podrían ser 10(X) imanes más, dependiendo del número de discos (X) en paralelo que se alojasen, pero en principio sólo se utilizó un disco simple en este rotor. Las siguientes figuras muestran la disposición de los estatores y el rotor.



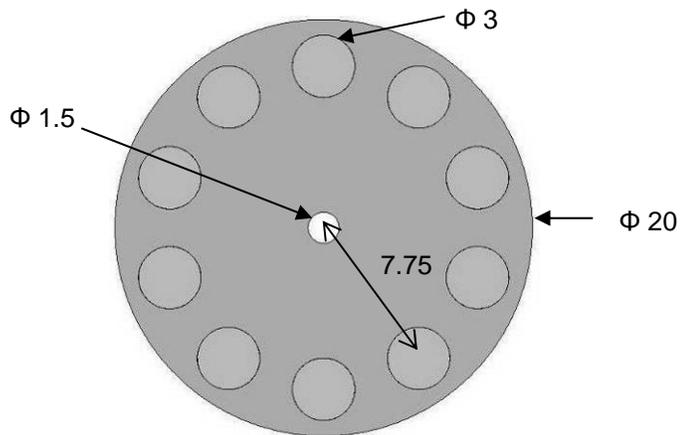
Con el objetivo de facilitar las conexiones eléctricas del motor se diseñó un circuito interno en la propia estructura del motor, ayudando a mantener simple la estética y funcionalidad, con ello se disminuye el riesgo de generar cortocircuitos entre las bobinas y facilita las conexiones finales.

<sup>7</sup> Agradezco de manera especial a Angélica Zamora Vázquez, por compartir el detalle de estos dibujos y el apoyo en la manufactura tan detallada de las bobinas del motor.



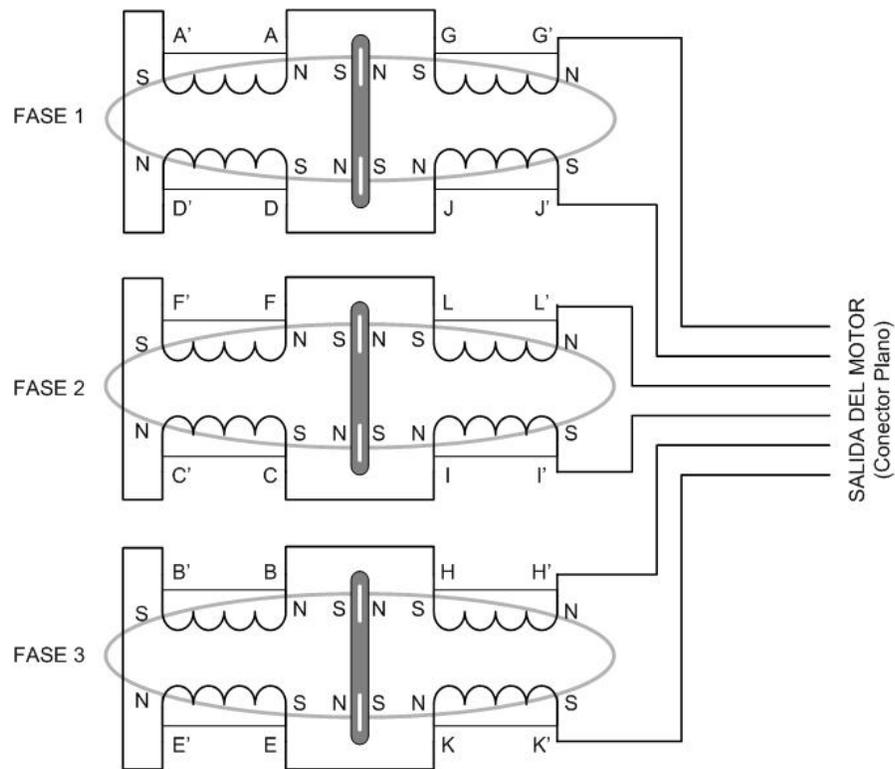
**Fig. 3.15. Pistas internas de los circuitos alojados en los estatores del motor. Las vistas (izq) y (der) corresponden a los frentes que se presentan en la Fig. 3.14.**

El esquema general del rotor se muestra a continuación:



**Fig. 3.16. Rotor del motor a pasos de tres fases. Croquis en [mm].**

El esquema general de los circuitos eléctricos y de conexiones se muestra a continuación:



**Fig. 3.17. Diagrama esquemático de conexiones eléctricas de las fases del motor.**

De la configuración del circuito eléctrico, la cual comprende seis cables de salida a la etapa de potencia y posteriormente al controlador, podemos describir que el circuito magnético se generará en función de la excitación del circuito eléctrico, tal como se muestra en la tabla 3.2, que señala la secuencia de pasos completos del motor y la manera en que se lleva a cabo la excitación de las bobinas.

El número de pasos completos del motor puede obtenerse mediante una formulación empírica que multiplica el número de fases por el número de polos en el rotor, la cual funciona bastante bien con algunas configuraciones geométricas del tipo de motores desarrollados. En nuestro caso se confirma la formulación:  $(3 \text{ fases}) \times (10 \text{ polos}) = 30 \text{ pasos}$ .

	FASE I		FASE II		FASE III	
PASO	G'	J'	L'	I'	H'	K'
P1	+	-	sp	sp	sp	sp
P2	sp	sp	+	-	sp	sp
P3	sp	sp	sp	sp	+	-
P4	-	+	sp	sp	sp	sp
P5	sp	sp	-	+	sp	sp
P6	sp	sp	sp	sp	-	+
P7	+	-	sp	sp	sp	sp
P8	sp	sp	+	-	sp	sp
P9	sp	sp	sp	sp	+	-
P10	-	+	sp	sp	sp	sp
P11	sp	sp	-	+	sp	sp
P12	sp	sp	sp	sp	-	+
P13	+	-	sp	sp	sp	sp
P14	sp	sp	+	-	sp	sp
P15	sp	sp	sp	sp	+	-
P16	-	+	sp	sp	sp	sp
P17	sp	sp	-	+	sp	sp
P18	sp	sp	sp	sp	-	+
P19	+	-	sp	sp	sp	sp
P20	sp	sp	+	-	sp	sp
P21	sp	sp	sp	sp	+	-
P22	-	+	sp	sp	sp	sp
P23	sp	sp	-	+	sp	sp
P24	sp	sp	sp	sp	-	+
P25	+	-	sp	sp	sp	sp
P26	sp	sp	+	-	sp	sp
P27	sp	sp	sp	sp	+	-
P28	-	+	sp	sp	sp	sp
P29	sp	sp	-	+	sp	sp
P30	sp	sp	sp	sp	-	+

**Tabla 3.2. Tabla de polarización en fases para giro en un sentido del motor (sp, significa sin polarización)**

Finalmente se desarrollaron las especificaciones de diseño del motor, que quedan así:

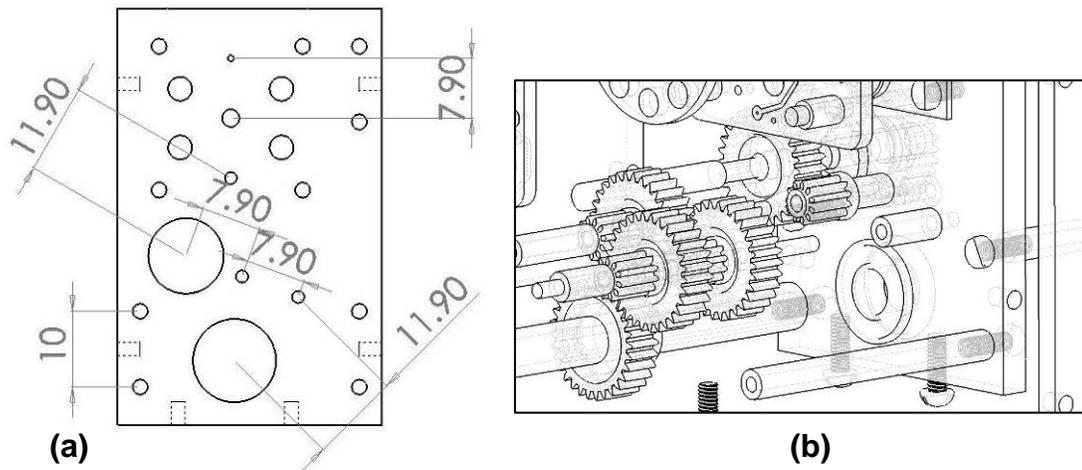
Pasos / Rev:	<b>30</b>
Avance Angular:	<b>12°/paso</b>
Número de Bobinas:	<b>12</b>
Número de Fases:	<b>3</b>
Número de vueltas de alambre por capa:	<b>~80</b>
Número de capas por bobina:	<b>7</b>
Impedancia promedio de cada bobina:	<b>19.5 Ω</b>
Impedancia promedio por fase:	<b>75 Ω</b>
Flujo magnético promedio de los imanes:	<b>1.9 kG</b>
Voltaje mínimo de alimentación:	<b>10 V</b>
Corriente máxima:	<b>0.6 A</b>

**Tabla 3.3. Tabla de especificaciones de diseño del motor.**

## DISEÑO DEL TREN MOTRIZ

El mecanismo de tren motriz se diseña para proporcionar un reductor que ocupe poco espacio. Esto se consigue colocando ruedas dentadas dobles que giran libremente alrededor de sus ejes. Un mismo eje puede usarse para albergar varias de estas ruedas dentadas dobles, por lo que el espacio desperdiciado es mínimo.

A partir de los parámetros de diseño de los engranes seleccionados para ser utilizados en el tren motriz, se determinaron las razones y la disposición geométrica para el diseño de la estructura del módulo, es decir, las distancias entre engranes, así como entre engrane y piñón.



**Fig. 3.18. (a) Vista frontal de la pared central de la estructura con algunas cotas en [mm], (b) Detalle del tren motriz diseñado.**

El cálculo del avance del Módulo debido a la relación de engranaje asociada al número de pasos del motor se obtiene de la siguiente manera:

$$A_M = P_m \cdot \left( \frac{N_e}{N_p} \right)^Z, \text{ donde:}$$

$A_M$ , Avance del Módulo

$P_m$ , Pasos del motor en una revolución

$N_e$ , Número de dientes de engrane, que es constante (engranes iguales)

$N_p$ , Número de dientes de piñón, que es constante (piñones iguales)

$Z$ , Número de veces en que la relación de engranaje es aplicada en el tren motriz

Utilizando la fórmula anterior, tenemos:

$$A_M = 30 \cdot \left( \frac{pasos}{rev_{motor}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{30}{11} \right)^3 \left( \frac{rev_{motor}}{rev_{mandril}} \right) \right] = 608.56 \left( \frac{pasos}{rev_{mandril}} \right)$$

Cálculo que se traduce aproximadamente en 20 revoluciones del motor para obtener una revolución en la salida del Módulo.

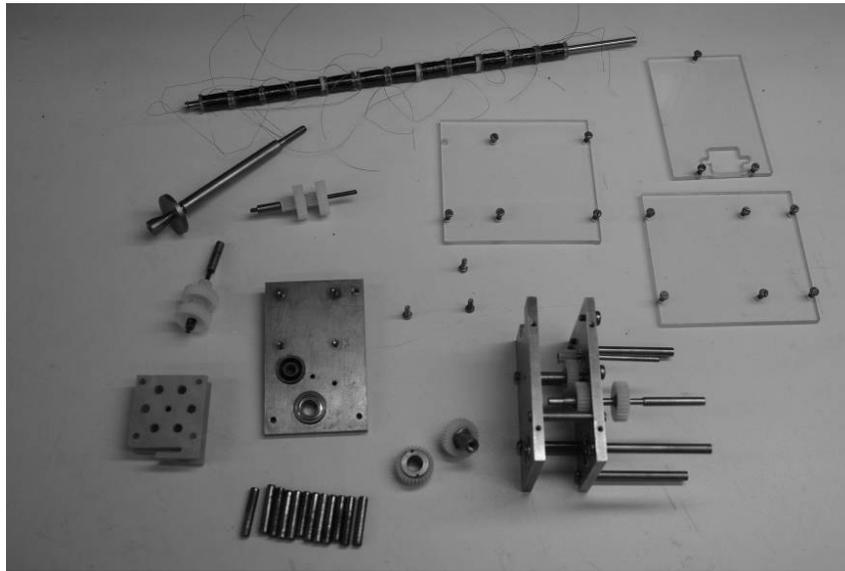
## **MANUFACTURA Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO**

### **GENERALIDADES Y ESTRUCTURA**

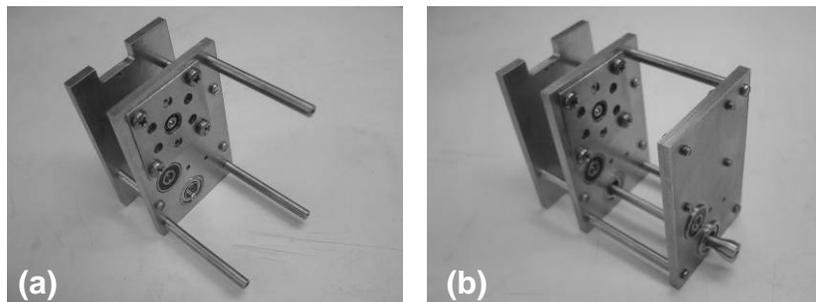
Tras contabilizar el número de piezas empleadas en el armado de toda la MMH, así como el número de piezas que son diferentes, observamos una ventaja notable que permite utilizar el mismo tipo de piezas en diferentes módulos y partes constituyentes de la micromáquina, generándose la posibilidad de aprovechar las diferentes piezas repetibles utilizadas en toda la MMH y con ello se generaron algunos bancos de manufactura que permitieron la optimización de la materia prima de fabricación.

De la tabla constitutiva de diseño del Anexo 2 podemos ver que la micromáquina requiere 665 piezas totales, las cuales pertenecen a alguno de los 112 elementos diferentes que la integran, incluyendo tornillos, rodamientos y balines.

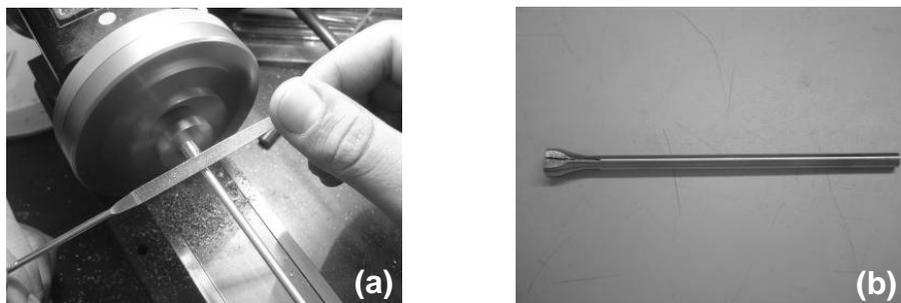
Finalmente, se generaron soluciones de detalle que no se percibieron en la fase de diseño como la simplificación de conexiones para el motor, evitando así la posibilidad de tener cortocircuitos una vez operando, algunos arreglos en las interconexiones mecánicas dentro del tren motriz, etc.



**Fig. 3.19. Elementos del Módulo, en etapa de construcción.**



**Fig. 3.20. (a) Vista de las paredes trasera y central de la estructura, (b) La estructura con sus dos espacios principales.**



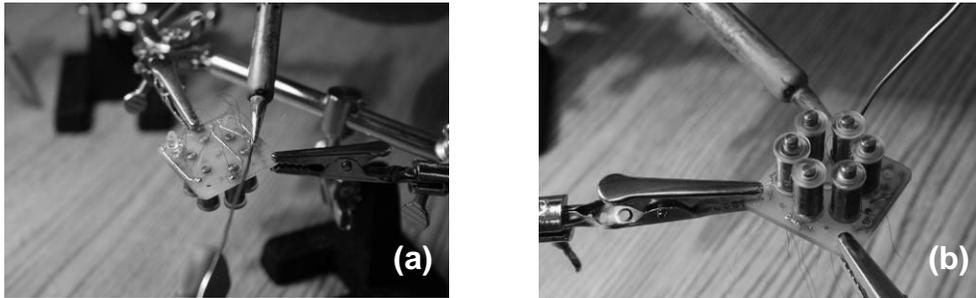
**Fig. 3.21. (a) Manufactura de detalle en el collar o mandril del módulo <sup>8</sup>, (b) Collar o mandril de proporciones complejas, razón geométrica ( $\Phi-1, 1:14$ ).**

---

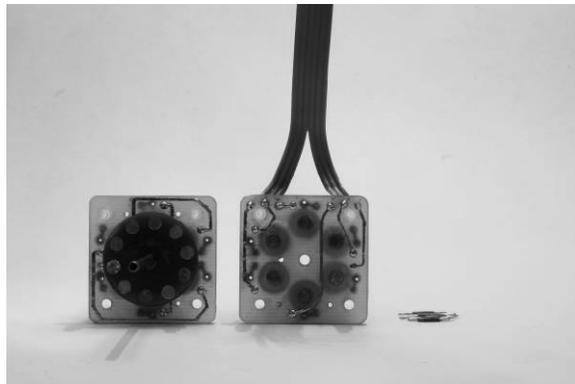
<sup>8</sup> Agradezco en especial a Mauricio Marín Aguilar, quien con su pericia en el manejo de la maquinaria de taller permitió la manufactura de piezas complicadas como ésta.

## EL ACTUADOR

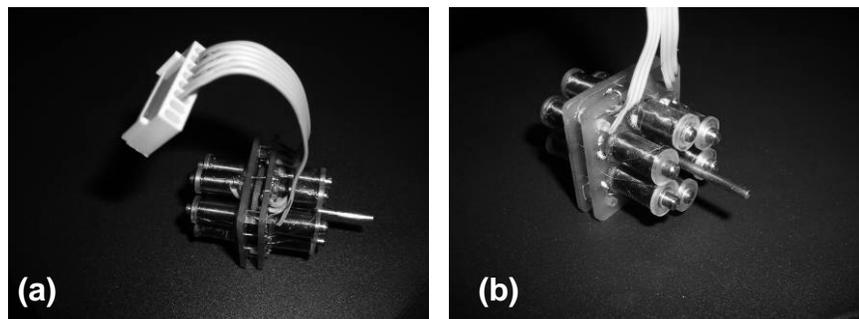
El motor constituye uno de los elementos más importantes y complejos del módulo, éste requirió de un detalle minucioso, aunque aún requerirá de evoluciones en su estructura que se han percibido al terminar su desarrollo en esta fase. Las conexiones eléctricas y la manufactura de todos los componentes requirieron de paciencia y precisión. A continuación se muestran algunas imágenes:



**Fig. 3.22. (a) y (b) Conexiones del motor en sus circuitos internos y alojamiento de las bobinas como estructura propia.**

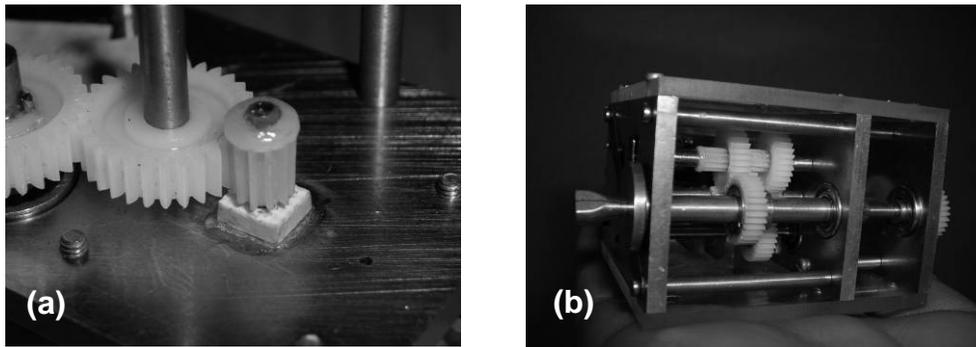


**Fig. 3.23. Vista frontal de las conexiones del motor. Véanse las figuras 3.14 y 3.15.**



**Fig. 3.24. (a) y (b) Vistas del motor listo para su montaje en el módulo.**

## EL TREN MOTRIZ



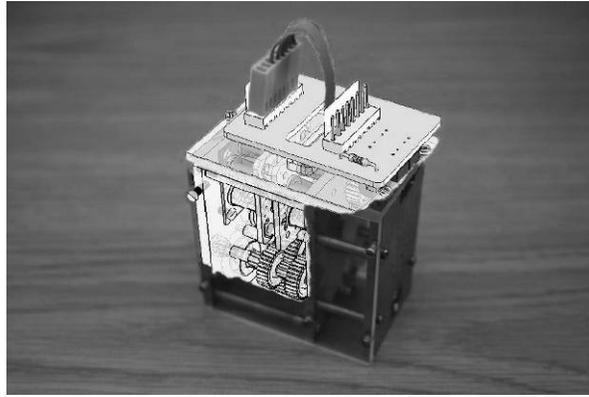
**Fig. 3.25. (a) Detalle del inicio del tren motriz, en la salida del motor, (b) Detalle del tren motriz en el módulo.**

Se puede decir que el módulo de sujeción desarrollado en esta tesis es independiente, pero a su vez complejo y que utiliza un mayor número de piezas diferentes, esto es algo que deberá evolucionar en las iteraciones siguientes de desarrollo por simplicidad en el diseño.

También se emplearon resinas y pegamentos como elementos mecánicos de sujeción de alta confiabilidad. En uniones complicadas de estructuras cilíndricas a 90° resultaron muy efectivas, así como para mantener el motor unido y darle la característica de ser desmontable del módulo a partir de su estructura interna, ya que éste se completa una vez instalado en el módulo.



**Fig. 3.26. (a) Ritek®, pegamento utilizado en la integración de engranes dobles y otras partes, (b) Loctite®, pegamento utilizado en la integración del rotor con la flecha del motor.**



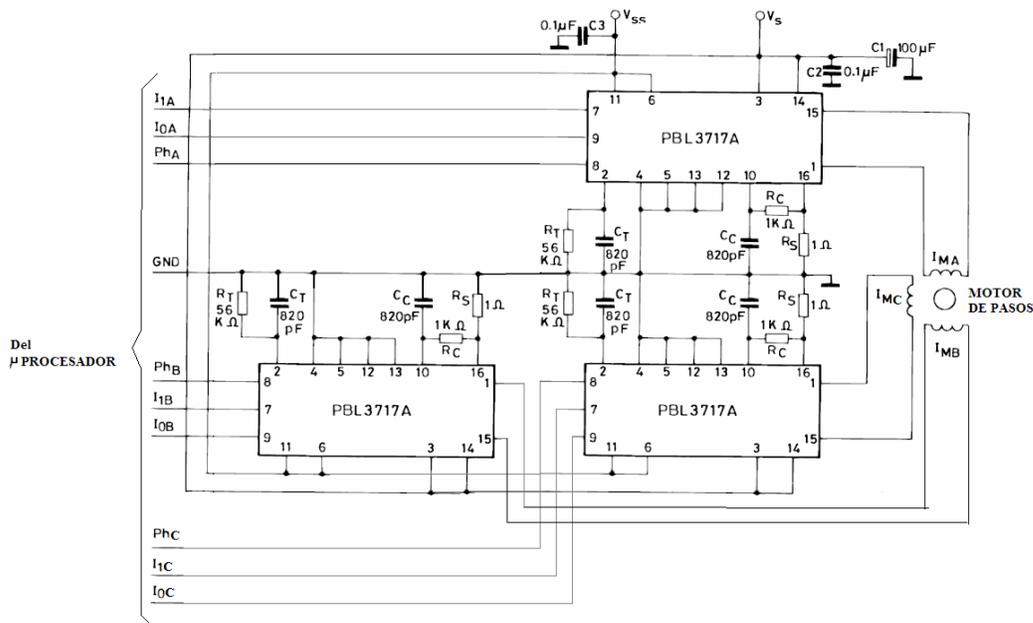
**Fig. 3.27. Transición del diseño a la construcción.**

En el Anexo 3 se puede observar una plantilla general de un plano de fabricación con sus diferentes vistas, como parte final de este apartado.

## CONTROL DEL MÓDULO

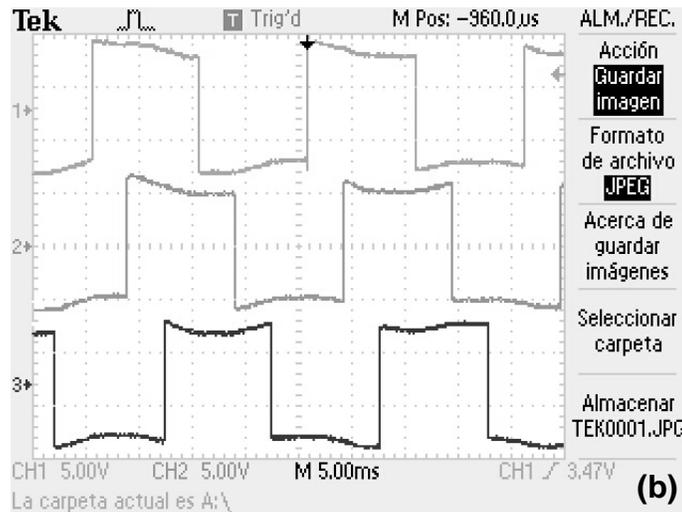
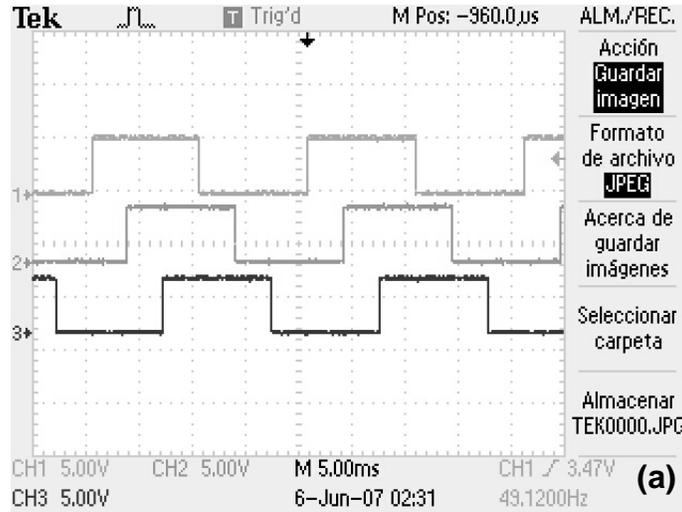
El control propuesto para este prototipo consiste en una etapa de potencia que habilita las tres fases del actuador, así como un sistema de microcontrolador a través de un PIC y una interfaz simple desarrollada en Visual Basic. Desde la computadora es posible entonces ejecutar acciones de control sobre el motor.

La etapa de potencia está basada en 3 arreglos con circuitos integrados PBL3717A, los cuales sirven como *drives* para cada fase independiente del motor de pasos. En la etapa de control a través del microcontrolador se desarrollaron varios programas con diversas secuencias para verificar la operación del módulo.



**Fig. 3.28. Diagrama esquemático de la etapa de potencia del módulo.**

En las siguientes figuras se muestran las señales desfasadas a  $60^\circ$  que deben existir en las fases del motor para su correcto funcionamiento, en los diferentes puntos de interés para la toma de lecturas:



**Fig. 3.29. (a) Señales desfasadas a la salida del microcontrolador, (b) Señales desfasadas a la salida de la etapa de potencia (entrada al motor).**

En las siguientes figuras se muestra la interfaz gráfica desplegada en la computadora así como el sistema de control y los circuitos que lo conforman:

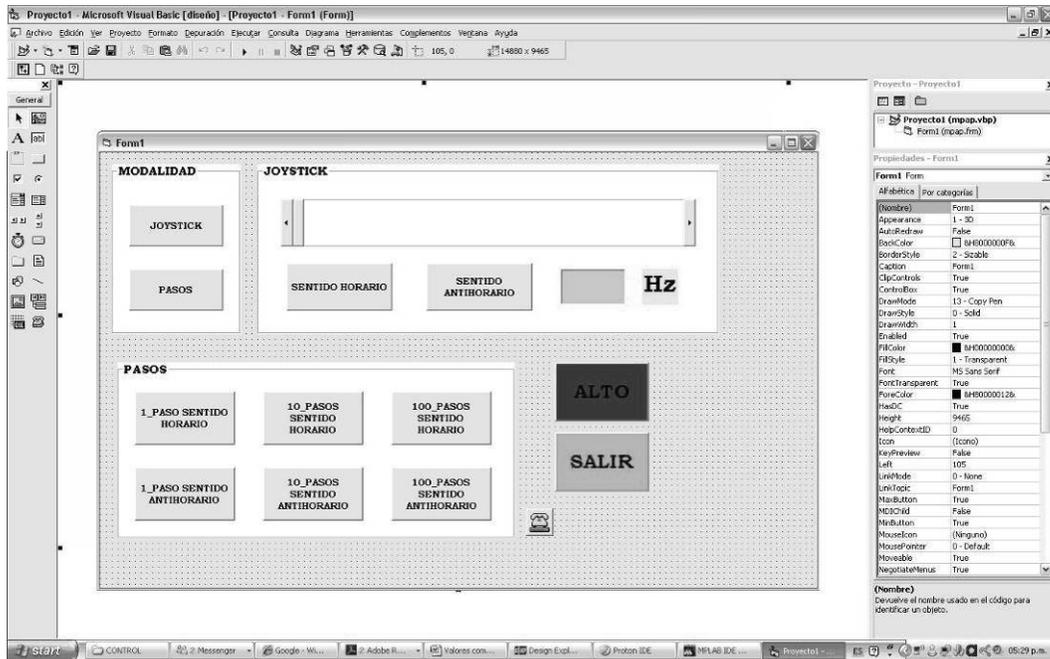


Fig. 3.30. Interfaz gráfica de control.

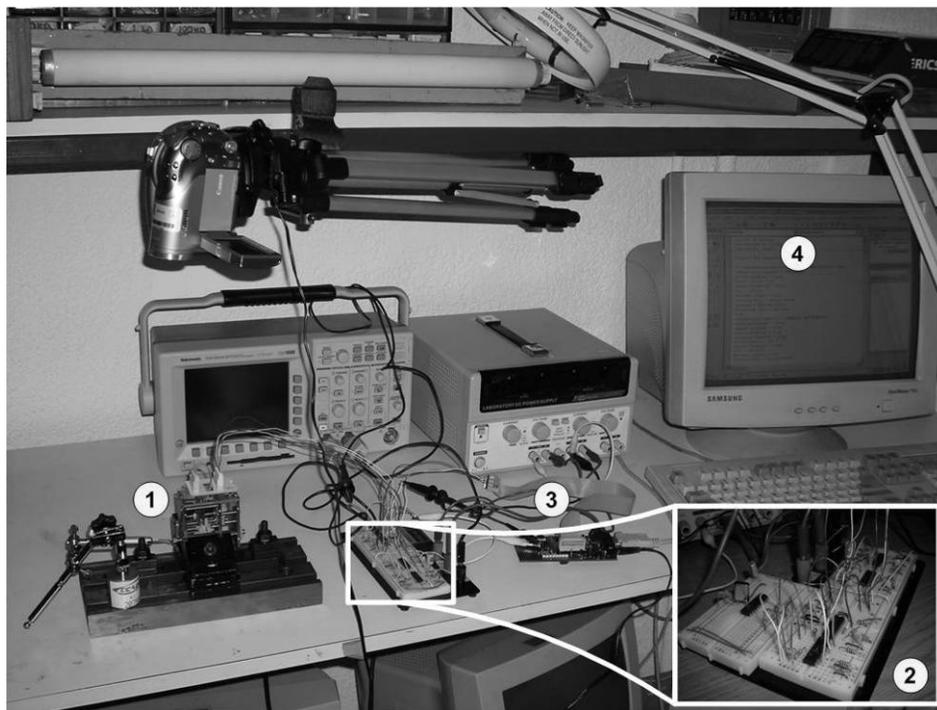


Fig. 3.31. Sistema de control. 1) Módulo, 2) Etapa de potencia, 3) Microcontrolador e 4) Interfaz con la computadora.

## APLICACIÓN DEL DISEÑO MODULAR AL CASO DE ESTUDIO

Del contenido del capítulo 2, hasta este punto se puede percibir la aplicación de diversas ideas de las corrientes de diseño en el desarrollo del caso de estudio. Específicamente en la aplicación del diseño modular, en este apartado, se desarrolla el cálculo de la modularidad relativa del módulo de sujeción. Este cálculo nos da una idea la susceptibilidad del propio módulo de sujeción de ser modularizado.

Acotamos este ejercicio debido a la exhaustividad necesaria de realizarlo para toda la MMH. Sin embargo se sugiere desarrollar la matriz completa para todos los módulos de la micromáquina y con ello el cálculo de la modularidad relativa de la misma con lo que es posible hacer comparaciones agudas y evaluaciones de las diferentes opciones de diseño de las MMH's o bien de los diferentes diseños de módulos para la misma.

Paso 1: Del árbol de componentes desarrollado para la MMH (Anexo 1), se tiene que hasta este momento la MMH cuenta con 665 elementos, de los cuáles sólo 112 son diferentes, lo que confiere una relación aproximada de 1:6 en la utilización de elementos iguales en sus diferentes módulos. Se prestará atención en los subensambles del módulo de sujeción, tratándolos como módulos en sí.

Paso 2: Se desarrollaron gráficas de proceso de los componentes para el módulo de sujeción de la MMH; en la figura 3.32 se muestra un detalle parcial del tipo de gráficas.

Paso 3: Utilizando el árbol de componentes y las gráficas de procesos se desarrollaron dos matrices de evaluación de modularidades, en el Anexo 4 se muestra un detalle parcial de estas gráficas. El contenido de estas matrices es la evaluación de las relaciones en cuanto a similitud y dependencia entre componentes y procesos. Los valores se otorgaron de acuerdo al siguiente criterio:

Similitud	Dependencia
1. No similar	1. No dependiente
2. Poco similar	3. Dependiente
3. Similar	5. Altamente dependiente
4. Muy similar	
5. Extremadamente similar	

**Tabla 3.4. Tabla de valores para la Similitud y la Dependencia [Ref. 44]**

Paso 4: *Cálculo de la Modularidad Relativa del módulo de sujeción.* Aquí se han tratado los subensambles del módulo de sujeción como módulos en sí.

Se considera un número de módulos (subensambles para este efecto) de 4: Estructura (E), Actuador (A), Transmisión (T) y Feedback (F); y se consideran sólo 3 procesos de manufactura básicos: torneado (tor), fresado (fre) y taladrado (tal). Así:

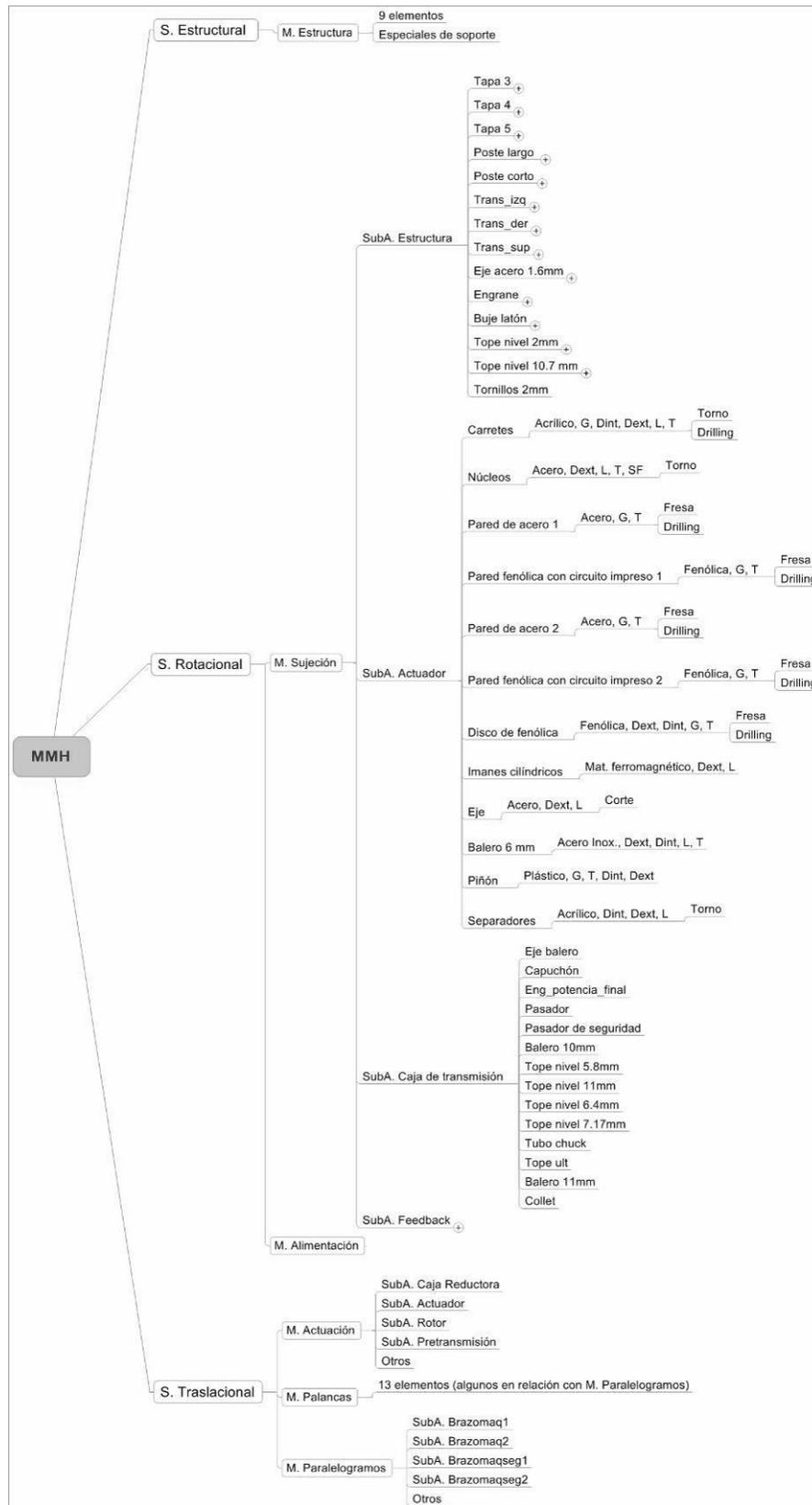


Fig. 3.32. Detalle de una gráfica de proceso para el Módulo de Sujeción

De la ecuación (3) se tiene:

$$S_{in} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{j=i}^s \sum_{k=1}^T \sqrt{S_{ik} * S_{jk}}$$

$$S_{in} = S_{torno} + S_{fresa} + S_{taladro} = 11\sqrt{5 \cdot 5} + 8\sqrt{5 \cdot 5} + (12\sqrt{5 \cdot 5} + \sqrt{3 \cdot 3} + \sqrt{5 \cdot 3}) = 55 + 40 + 66.873 = 161.873$$

De la ecuación (4) se tiene:

$$S_{out} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{n=m+1}^M \sum_{j=r}^s \sum_{k=1}^T \sqrt{S_{ik} * S_{jk}}$$

$$S_{out} = (S_{E-A})^{tor, fre, tal} + (S_{A-T})^{tor, fre, tal} + (S_{T-F})^{tor, fre, tal} + (S_{F-E})^{tor, fre, tal}$$

$$S_{E-A} = \sqrt{5 \cdot 5} + 4\sqrt{5 \cdot 5} + (2\sqrt{5 \cdot 5} + \sqrt{3 \cdot 3}) = 5 + 20 + 13 = 38$$

$$S_{A-T} = 4\sqrt{5 \cdot 5} + 0 + (2\sqrt{5 \cdot 3} + \sqrt{5 \cdot 5}) = 20 + 0 + 12.746 = 32.746$$

$$S_{T-F} = 2\sqrt{5 \cdot 5} + 0 + (3\sqrt{5 \cdot 5}) = 10 + 0 + 15 = 25$$

$$S_{F-E} = 4\sqrt{5 \cdot 5} + 2\sqrt{5 \cdot 3} = 20 + 7.746 = 27.746$$

Entonces:

$$S_{out} = 38 + 32.746 + 25 + 27.746 = 123.492$$

De la ecuación (5) se tiene:

$$D_{in} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{j=i+1}^s \sum_{k=1}^T (\sqrt{D_{ik} * D_{jk}} + D_{ij})$$

$$D_{in} = D_E^{tor, fre, tal} + D_A^{tor, fre, tal} + D_T^{tor, fre, tal} + D_F^{tor, fre, tal}$$

$$D_E = 65 + 6(\sqrt{5 \cdot 5} + 5) + 5(\sqrt{5 \cdot 5} + 1) + (\sqrt{3 \cdot 3} + 5) = 65 + 60 + 30 + 8 = 163$$

$$D_A = 74 + (\sqrt{5 \cdot 5} + 5) + 6(\sqrt{5 \cdot 5} + 3) + 2(\sqrt{5 \cdot 5} + 1) = 74 + 10 + 48 + 12 = 144$$

$$D_T = 93 + 3(\sqrt{5 \cdot 5} + 5) + 3(\sqrt{5 \cdot 5} + 3) + (\sqrt{5 \cdot 5} + 1) + (\sqrt{5 \cdot 3} + 5) = 93 + 30 + 24 + 6 + 8.873 = 161.873$$

$$D_F = 8(5) + 2(10) + 3 + 2(6) + 34 = 40 + 20 + 3 + 12 + 34 = 109$$

Luego:

$$D_{in} = 163 + 144 + 161.873 + 109 = 577.873$$

De la ecuación (6) y sintetizando se tiene:

$$D_{out} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=r}^{s-1} \sum_{n=m+1}^M \sum_{j=r}^s \sum_{k=1}^T (\sqrt{D_{ik} * D_{jk}} + D_{ij}) = 115.363$$

Finalmente de la ecuación (2):

$$Modularidad = \frac{S_{in}}{S_{in} + S_{out}} + \frac{D_{in}}{D_{in} + D_{out}} = \frac{161.873}{161.873 + 123.492} + \frac{577.873}{577.873 + 115.363} = 0.5672 + 0.8336 = 1.4$$

Así que la Modularidad Relativa del Módulo de Sujeción es:

$$MR_{Módulo\_Sujeción} = 1.4$$

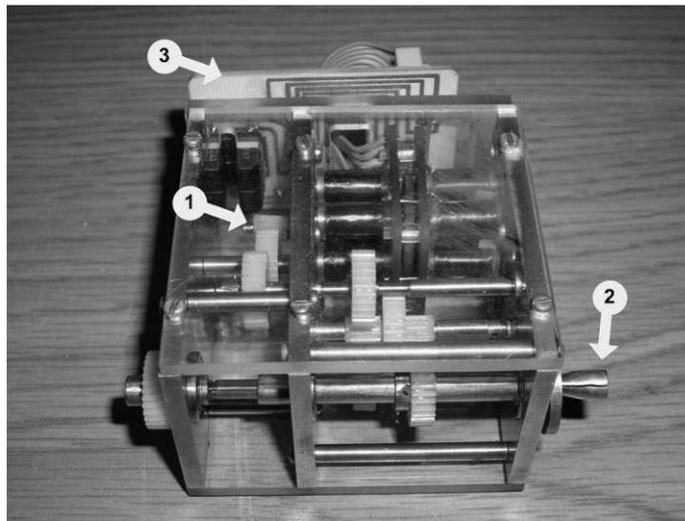
Para ser un valor entre 0 y 2 significa que el módulo tiene características modulares en sí satisfactorias pero que podría evolucionar a una modularidad mayor en el proceso de rediseño y versiones subsiguientes, así como aplicado a otros módulos de la MMH.

## PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

*En este capítulo se reportan las pruebas y el comportamiento del caso de estudio presentado en este trabajo de tesis.*

### DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo que se desarrolló como caso de estudio de este trabajo corresponde al módulo de sujeción de materia prima, parte del sistema rotacional del microcentro de maquinado de primera generación, aludido a lo largo de todo el trabajo (véase Fig. 4.1). El peso final del prototipo, sin la pieza de acoplamiento con la MMH es de **255 gr.**; sus dimensiones generales son de **40x60x65 mm.**



**Fig. 4.1. Prototipo desarrollado.**

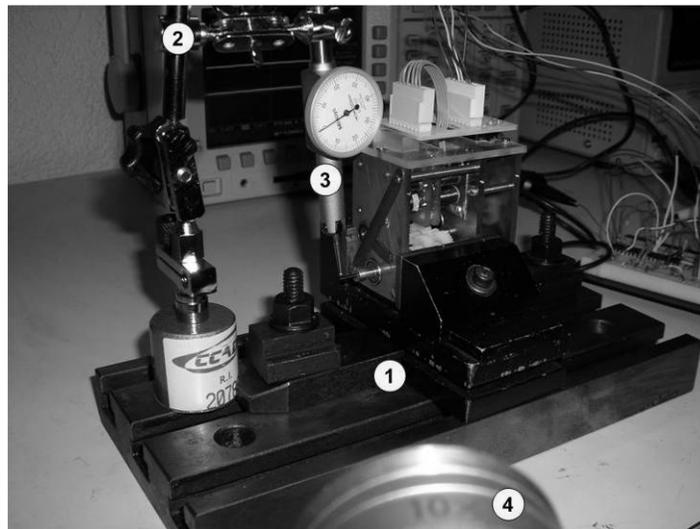
La flecha del motor está en sentido opuesto a la salida del módulo, es decir la salida del motor (1) está opuesta a la posición de salida del mandril (2), esto con el objetivo de

minimizar el espacio utilizado; y las conexiones se llevan a cabo a través de la placa de conexiones en la parte superior del motor (3). Para complementar la descripción puede observarse la figura en explosión 3.12.

## PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROTOTIPO

Se realizaron básicamente 3 tipos de pruebas, dos de medición directa y otra a través de imágenes. La primera prueba está asociada a la medición del *run-out* o alcance, tanto axial como radial. La segunda prueba está asociada a la determinación del *backlash* o juego mecánico que existe en el arreglo de la transmisión del módulo. La tercera prueba está asociada a la determinación del rango de velocidad operativa que tiene el módulo a un voltaje de alimentación determinado.

Para realizar estas pruebas, se montó un arreglo que consta de una bancada rectificada con un tornillo de sujeción (1), para sujetar firmemente el módulo. A su vez se montó una base universal de sujeción magnética (2) para sujetar un dispositivo de medición de carátula (3) que se utilizaría en diversas posiciones, por último se colocó una cámara digital fija (4) en diversas posiciones también.



**Fig. 4.2. Arreglo del sistema para pruebas.**

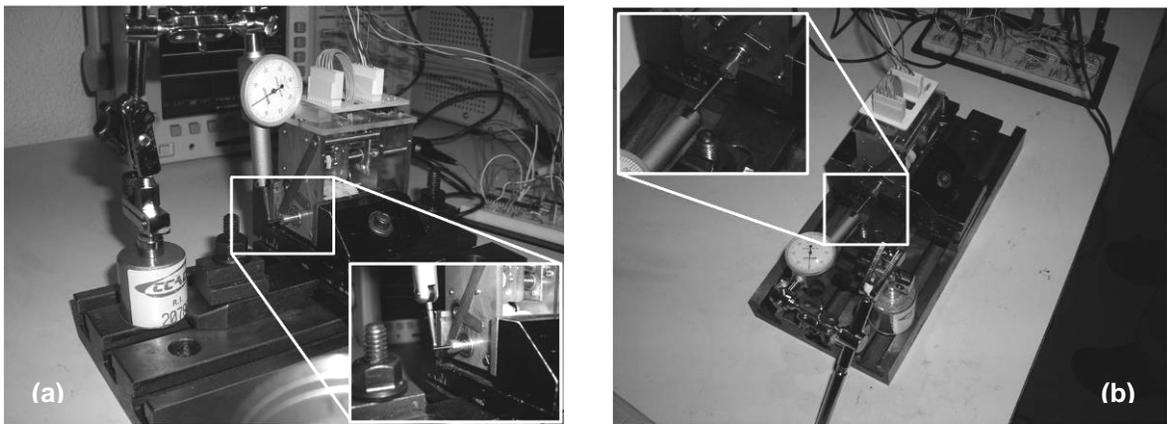
Para llevar a cabo las pruebas se desarrolló un programa de control (véase Anexo 5) que permite incrementar o disminuir la velocidad del módulo, avanzar paso a paso el motor, girar en una velocidad específica un número de pasos programado (en este caso con el cálculo que se realizó en el capítulo anterior se programaron 609 pasos del motor, para tener una revolución del mandril), y cambiar el sentido de giro.

## PRUEBA DE RUN-OUT

La definición teórica de *run-out* que podemos adoptar a nuestro caso es la siguiente: es el intervalo total de movimiento medido desde un punto fijo hasta otro en la superficie de una pieza rectificadas que gira alrededor de un eje fijo sin movimiento.

El *run-out* radial es la medida que se obtendrá a lo largo de una perpendicular al eje de rotación, lo cual nos da la dimensión del descentramiento que existe en la salida del dispositivo. El *run-out* axial es la medida que se obtendrá en paralelo al eje de rotación, lo cual nos da la dimensión del bamboleo que existe en la salida del dispositivo.

Las siguientes figuras muestran las posiciones de medición para ambos casos:



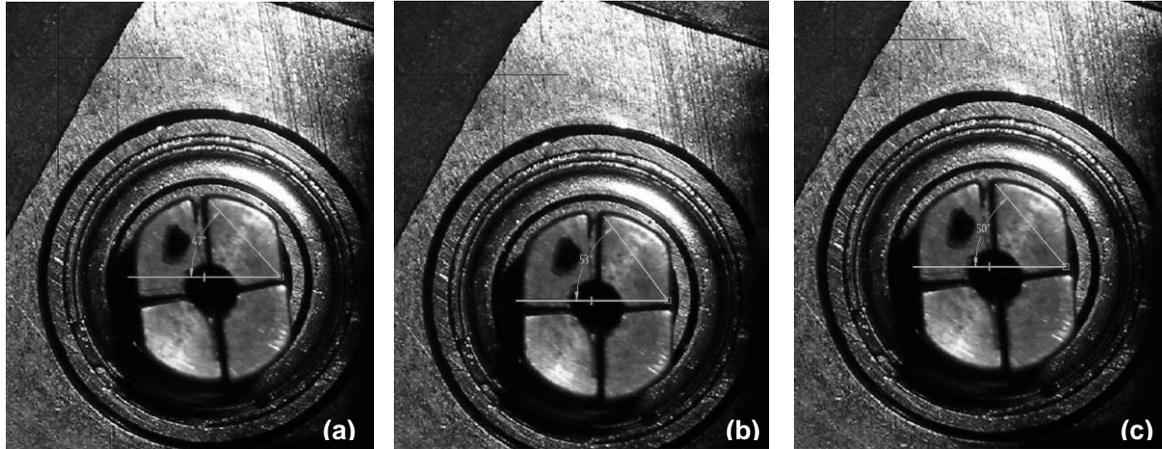
**Fig. 4.3. (a) Detalle de prueba de *run-out* radial, (b) Detalle de prueba de *run-out* axial.**

Analizando las corridas de las pruebas que se realizaron a 60 Hz, se obtuvo un promedio de las mismas, observando que se tienen variaciones pequeñas cuando se cambia el sentido de giro; finalmente los resultados arrojados por las pruebas de *run-out* son:

Prueba	Micrómetros
Run-Out Radial	335
Run-Out Axial	335

## PRUEBA DE BACKLASH

Para esta prueba se requirió hacer análisis de una secuencia de imágenes. Girando el mandril del módulo en ambos sentidos, observando la variación de la posición angular final, y luego traduciendo eso, podemos obtener el huelgo o *backlash*, distancia mínima entre los flancos de los dientes de nuestro tren motriz.



**Fig. 4.4. Prueba a 60 Hz (a) Posición inicial (47°), (b) 2 revoluciones en sentido anti-horario (53°), (c) 2 revoluciones en sentido horario (50°).**

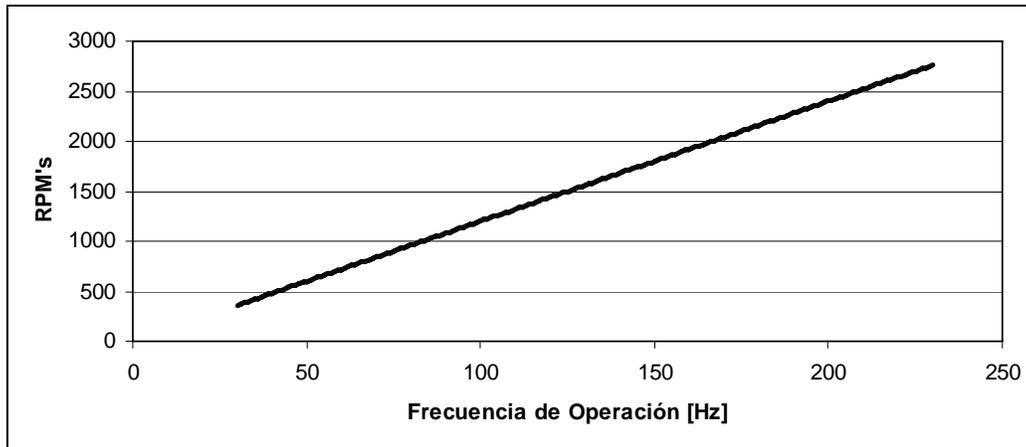
La prueba se realizó haciendo girar el mandril 1, 2 y 3 revoluciones en ambos sentidos, observándose que se tiene un huelgo promedio diferente en uno y otro sentido. Los resultados promedio de variación se muestran a continuación:

Prueba	Grados Angulares	Fraciones de Paso
Sentido Anti-Horario	5	0.417
Sentido Horario	3	0.250

Las variaciones de la medida entre prueba y prueba a diferentes revoluciones las podemos atribuir a la inexactitud de generar la revolución exacta; debido a que el cálculo teórico nos arroja un número no-entero se tomó el entero inmediato superior (609 pasos), que se traduce en un error acumulativo, así que en promedio podemos decir que estos valores representan en principio el *backlash* en uno y otro sentido del módulo de manera satisfactoria.

## PRUEBA DE VELOCIDAD

Se determinó el siguiente rango de operación:  $30 \text{ Hz} \leq f \leq 230 \text{ Hz}$ . Para determinar una tabla de equivalencias en RPM's de este rango de operación se debe tener en cuenta que el periodo es de seis pasos, así que se requieren 5 periodos para una revolución del motor. Si se toma eso en cuenta, se puede estimar una gráfica de equivalencias:



**Fig. 4.5. Rango de velocidades alcanzado en Lazo Abierto por el prototipo.**

El prototipo se probó con una alimentación de 18 [V], consumiendo 0.6 [A]. De esta manera alcanzó una velocidad máxima de 230 [Hz] (2,760 RPM's), más allá de este valor el motor se detiene o comienza a oscilar, generando distorsiones en la operación del mismo.

Dependiendo de los materiales y las herramientas, para operaciones de corte, se requieren velocidades del orden de las 200 a las 20,000 RPM's<sup>9</sup>; y en micromaquinados convencionales el orden es alrededor de los 200,000 RPM's<sup>10</sup> [28], datos que deberán ayudarnos a ajustar los parámetros de diseño a futuro ya que con este prototipo el rango de velocidades limita las operaciones que podrían realizarse en el microcentro de maquinado.

---

<sup>9</sup> Estos valores dependen de las propiedades físicas de los materiales tanto de las herramientas como de la materia prima y de características geométricas. Diversas tablas de operación para corte de materiales reportan estas velocidades óptimas. (Ej. T&O®, Travers®, Tablas de velocidades, catálogo de herramientas)

<sup>10</sup> <http://micromanufacturing.com/archive/index.php/t-34.html>



## CONCLUSIONES

*En este apartado se sintetizan los resultados y las conclusiones; y se esboza el trabajo a futuro que se recomienda en beneficio del desarrollo tecnológico inmerso en el tema de esta tesis.*

**A** lo largo del desarrollo de este trabajo se detallaron algunos puntos; en principio, se esbozaron los antecedentes y el estado de la técnica de la micromecánica, su contexto nacional e internacional, también se reprodujo en el epígrafe un apartado inspirador de Galileo Galilei en su visión del micromundo y su funcionamiento.

Con base en el marco tecnológico y la experiencia del GMM en el desarrollo de microequipo, se aplicó el diseño modular, técnica que genera ventajas y competencias diversas dentro del ámbito de la micromecánica de bajo costo.

Se desarrolló un caso de estudio de un módulo de sujeción, como parte del sistema rotacional de un microcentro de maquinado de bajo costo. Este prototipo tiene una operación funcional pero limitada, en un rango determinado, para realizar microoperaciones de torno y fresa. Al evaluar los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas, podemos decir que el prototipo da una serie de atribuciones valiosas en el camino de la evolución de las MMH's.

El comportamiento del módulo depende en gran medida de la precisión en la manufactura, y a pesar de que se fabricó con detalle, la demanda de precisión superó algunas capacidades con las que fue manufacturado, por ello encontramos errores de descentramiento y variación axial (*run-out*) considerablemente grandes (335  $\mu\text{m}$ ) cuando las diferencias comunes en micromecánica en un sistema de este tipo están al menos en el orden de las decenas de micrómetros. Tal situación implica diversas consideraciones importantes que dan la pauta para el rediseño de prototipos futuros hacia las siguientes generaciones de microequipo.

Respecto a las metas planteadas podemos concluir que se cumplieron satisfactoriamente:

1. Se diseñó y construyó un prototipo de módulo de sujeción y rotación de una MMH de primera generación y se realizaron pruebas de funcionalidad del mismo.
2. Se evaluó la modularidad relativa de dicho módulo como ejercicio del desarrollo teórico del diseño modular (MR=1.4)
3. A continuación se generan recomendaciones para futuros desarrollos de MMH's considerando el desarrollo de este trabajo:

## RECOMENDACIONES

Dados los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda generar propuestas evolutivas aplicando el diseño modular con una profundidad tal que, no se estanque el tiempo de desarrollo en el diseño preliminar, pero que sea suficiente para eliminar los retrabajos y se llegue con ello a diseños más integrados, funcionales y con el grado de modularidad suficiente en su camino hacia la generación de productos comerciales.

Las recomendaciones puntuales que se recabaron a lo largo de este trabajo son:

- Continuar utilizando con detalle herramientas computacionales (CAD/CAM) en la generación de diversas propuestas para su comparación y elección.
- Al generar parámetros de diseño de un actuador (motor a pasos), será necesario establecer algún análisis previo más detallado para tener mejores características de operación y funcionamiento del mismo, tanto en sus rangos de velocidad como en características de alimentación, consumo de energía y calentamiento. Se recomienda integrar los circuitos de conexión eléctrica en la estructura interna del motor, esto facilitará el manejo de éste como un elemento desmontable de los módulos a los que se integra.
- La evaluación de la modularidad del módulo de sujeción nos da una idea de la aplicación en cascada del diseño modular, es decir, la susceptibilidad de un módulo en sí de ser modularizado. El valor estimado en el cálculo fue 1.4, lo que nos dice que el módulo de sujeción en sí ya tiene un valor alto de modularización. Considerando el módulo como entidad se sugiere desarrollar la matriz completa para todos los módulos de la micromáquina y con ello el cálculo de la modularidad relativa de la misma con lo que es posible hacer comparaciones agudas y evaluaciones de las diferentes opciones de diseño de las MMH's o bien de los diferentes diseños de módulos para la misma.
- Se recomienda eliminar funciones innecesarias que generen versiones del diseño más complejas, a pesar de que se esté integrando como un producto final. Se pueden generar configuraciones complicadas que no necesariamente satisfarán las funciones primordiales.
- Se recomienda rediseñar el módulo tomando en cuenta la manufactura de los componentes y elementos; y contrastándolo con las capacidades propias de infraestructura para tener un punto de partida efectivo. Tómense en cuenta también los siguientes módulos que interactuarán en el microcentro de maquinado.
- Se recomienda generar requerimientos técnicos de manera anticipada, tanto de operación y funcionalidad, así como analizar las restricciones que se presentan por el sistema al que pertenecen los módulos, esto ayudará a definir mejor los alcances del diseño.

- Es recomendable, además de ir detallando el diseño, trabajar en paralelo sobre la construcción de los prototipos (*quick approach*), esto es una práctica que arrojará variables que probablemente no se habían tomado en cuenta en el diseño y permitirá la evaluación temprana de la funcionalidad de algunos componentes.
- Una vez que se desarrollen prototipos posteriores bajo el contexto modular, se sugiere realizar el ejercicio de medición de la modularidad como una herramienta temprana en la evolución del rediseño de los módulos.

## **TRABAJO A FUTURO**

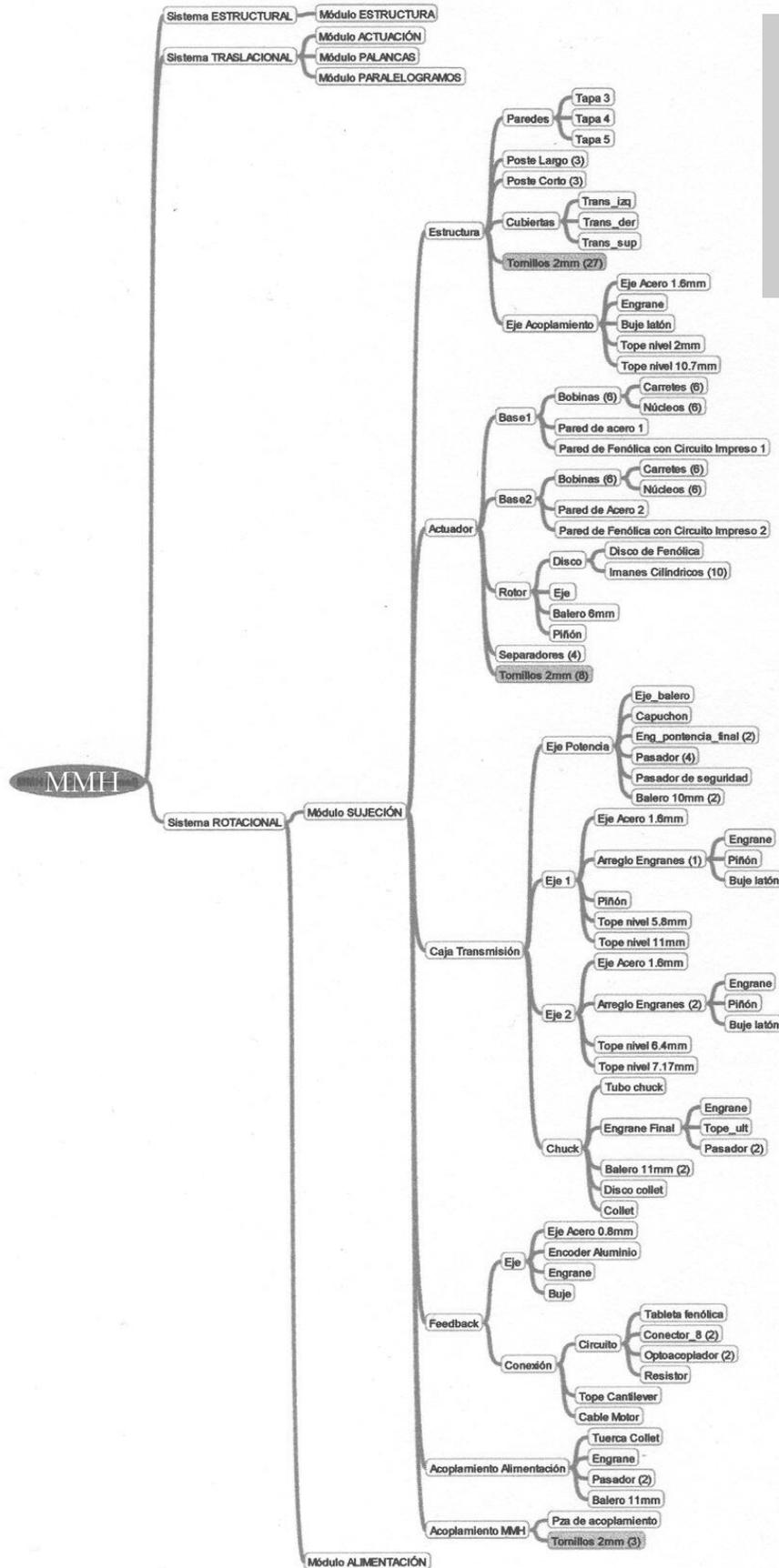
Después de analizar los resultados de las pruebas y observar el grado de complejidad del prototipo, así como su dependencia en las capacidades de manufactura, se deduce la necesidad de trabajar en futuras evoluciones no sólo de este módulo sino de diversas configuraciones para modularizar el microcentro de maquinado y sus subsiguientes generaciones.

Una característica como la automatización de los módulos en función de su integración como producto final, es por el momento sólo una posibilidad que permite el módulo de sujeción desarrollado, el cual contiene los elementos necesarios para integrar un control a lazo cerrado y una interconexión mecánica para la alimentación de materia prima. Debido a esto es recomendable integrar estas funciones en versiones siguientes tomando en cuenta la experiencia de este trabajo. En la continuidad de estas investigaciones será necesario implementar técnicas de manufactura que permitan acortar los tiempos de desarrollo.

Se ha planteado que en la siguiente generación de microequipo exista la posibilidad de utilizar diversos módulos de la primera generación; deberán evaluarse las ventajas y desventajas que ello implica para tener un marco óptimo en el ejercicio de desarrollo de productos comerciales confiables en la búsqueda de un mercado rentable.

*Eugenio Marín Aguilar*

# 1



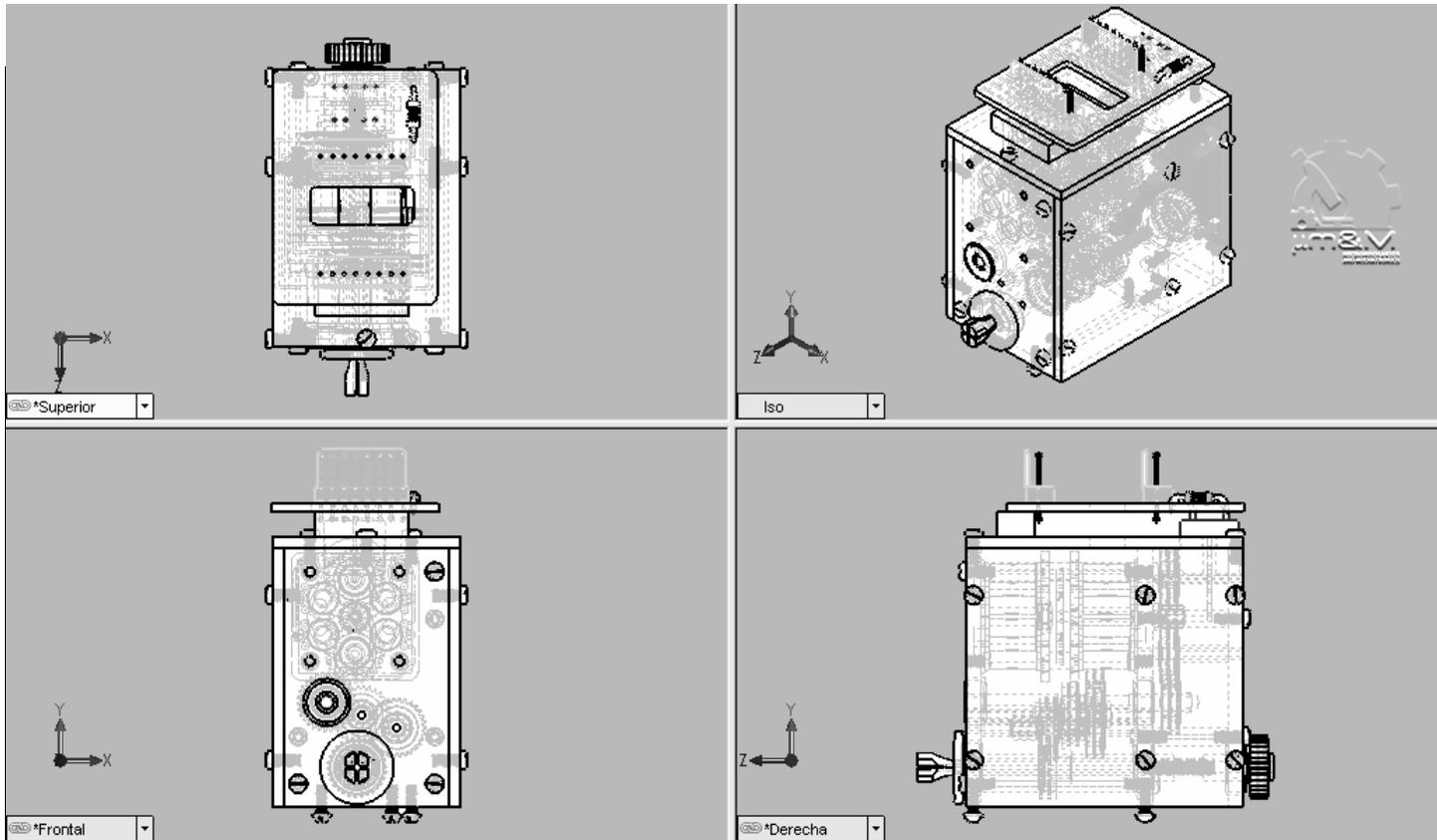
## Árbol de Componentes

En este anexo se muestra el árbol de componentes de la MMH, cuya rama desarrollada corresponde al módulo de sujeción.

TABLA CONSTITUTIVA DE DISEÑO DEL SEGUNDO PROTOTIPO DE MMH						
UMM-CCADET						
Sistemas	Módulos	Constitución	No. de piezas	Elementos Diferentes	Cantidad	
TRASLACIONAL	Actuación	Módulo de Actuación	3	112	665	
	Caja Reductora	Tapa1		1	Tapa1	3
		Tapa2		1	Tapa2	3
		Conectores de 6 pines		2	Conectores de 6 pines	6
		Engranajes con piñón		3	Engranajes con piñón	9
		Engrane de Acoplamiento		1	Engrane de Acoplamiento	3
		Veleta_encoder		1	Veleta_encoder	3
		Flecha_veleta		1	Flecha_veleta	3
		Engrane de Encoder		1	Engrane de Encoder	3
		Fenólica		1	Fenólica	6
		Acrílico		1	Acrílico	3
	Tren Motriz	Postes		3	Postes	9
		Circuito		1	Circuito	3
		Sep_1		1	Sep_1	3
		Sep_2		2	Sep_2	6
		Sep_3		1	Sep_3	3
		Ejes de acero (1/16)		2	Ejes de acero (1/16)	9
		Base fija		1	Base fija	3
		Base móvil		1	Base móvil	3
		Base_feno		1	Base_feno	3
		Base_acero		1	Base_acero	3
	Elementos de Ajuste	Eje_soporte		1	Eje_soporte	3
		Sop_acrilico		4	Sop_acrilico	12
		Anillo		8	Anillo	24
		Zapata		4	Zapata	12
		Carrete_bobina		4	Carrete_bobina	12
		Núcleo_estator		4	Núcleo_estator	12
		Fenólica de acoplamiento		1	Sop_rotor	3
		Sop_rotor		1	Imanes	3
		Imanes		1	Engrane_común (piñón)	3
		Engrane_común (piñón)		1	Flecha_rotor (0.8 mm)	4
	Actuador	Flecha_rotor (0.8 mm)		1	Sinfin con engrane	3
		Sinfin con engrane		1	Soporte de cilindro	3
		Soporte de cilindro		1	Soporte lateral	6
		Soporte lateral		2	Triángulos Laterales	4
		Refuerzos			Refuerzos	2
		Soporte de motores			Soporte de motores	2
		Cardán-U		1	Cardán-U	3
		Cardán-Tapa		1	Cardán-Tapa	3
		Ten1		1	Ten1	3
		Ten2		1	Ten2	3
	Palancas	Oten1		1	Oten1	7
		Oten2		1	Oten2	7
		Barra		1	Barra	3
		Eje		1	Eje	3
		Balines		4	Balines	12
		Trabeinf (mod. paralelogramos)		1	Trabeinf (mod. paralelogramos)	3
		Trabesup (ch)		1	Trabesup (ch)	1
		Trabesup (med)		1	Trabesup (med)	1
		Trabesup (gde)		1	Trabesup (gde)	1
		Barramaqfija			Barramaqfija	2
	Elem. de relación con el Mód. de Paralelogramos	Oten1		1	Oten1	4
		Oten2		1	Oten2	4
		Ángulos cortos		1	Ángulos cortos	4
		Base_sup		1	Base_sup	1
		Base_inf (2 extensiones)		1	Base_inf (2 extensiones)	1
		Diagonales largas		2	Diagonales largas	2
		Diagonales cortas		2	Diagonales cortas	2
		Tomillos de 1/8		1	Tomillos de 1/8	213
		Tomillos de 2mm		1	Tomillos de 2mm	66
		Bloquecillo		1	Bloquecillo	6
	Paralelogramos	Tapa 3		1	Tapa 3	1
		Tapa 4		1	Tapa 4	1
		Tapa 5		1	Tapa 5	1
		Poste largo		1	Poste largo	3
		Poste corto		1	Poste corto	3
		Trans_jcq		1	Trans_jcq	1
		Trans_der		1	Trans_der	1
		Trans_sup		1	Trans_sup	1
		Engrane		1	Engrane	6
		Buje latón		1	Buje latón	3
	Módulos de Paralelogramos	Tope nivel 2mm		1	Tope nivel 2mm	1
		Tope nivel 10.7 mm		1	Tope nivel 10.7 mm	1
		Carretes		1	Carretes	12
		Núcleos		1	Núcleos	12
		Pared de acero 1		1	Pared de acero 1	1
		Pared de fenólica con circuito im		1	Pared de fenólica con circuito im	1
		Pared de acero 2		1	Pared de acero 2	1
		Pared de fenólica con circuito im		1	Pared de fenólica con circuito im	1
		Disco de fenólica		1	Disco de fenólica	1
		Imanes cilíndricos		1	Imanes cilíndricos	10
	Estructura	Eje		1	Eje	1
		Balero 6 mm		1	Balero 6 mm	1
		Piñón		2	Piñón	4
		Diagonales cortas		2	Diagonales cortas	4
		Tomillos de 1/8		175	Tomillos de 1/8	4
		Tomillos de 2mm		66	Tomillos de 2mm	1
		Bloquecillo		6	Bloquecillo	2
		Eng_potencia_final		2	Eng_potencia_final	2
		Pasador		2	Pasador	6
		Pasador de seguridad		2	Pasador de seguridad	1
	Especiales de soporte	Balero 10mm		2	Balero 10mm	2
		Tapa 3		1	Tope nivel 5.8mm	1
		Tapa 4		1	Tope nivel 11mm	1
		Tapa 5		1	Tope nivel 6.4mm	1
		Poste largo		3	Tope nivel 7.17mm	1
		Poste corto		3	Tubo chuck	1
		Trans_jcq		1	Tope ult	1
		Trans_der		1	Balero 11mm	3
		Trans_sup		1	Collet	1
Eje acero 1.6mm			3	Encoder aluminio	1	
Sujeción	Engrane		6	Buje	1	
	Buje latón		3	Tableta fenólica	1	
	Tope nivel 2mm		1	Conector_8	2	
	Tope nivel 10.7 mm		1	Optoacoplador	2	
	Tomillos 2 mm		38	Resistor	1	
	Carretes		12	Tope cantilever	1	
	Núcleos		12	Cable motor	1	
	Pared de acero 1		1	Tuerca collet	1	
	Pared de fenólica con circuito impreso 1		1	Pza de acoplamiento	1	
	Pared de acero 2		1			
Actuador	Pared de fenólica con circuito impreso 2		1			
	Disco de fenólica		1			
	Imanes cilíndricos		10			
	Eje		1			
	Balero 6 mm		1			
	Balero 10mm		4			
	Separadores		4			
	Eje_balero		1			
	Capuchón		1			
	Eng_potencia_final		2			
Caja de transmisión	Pasador		6			
	Pasador de seguridad		1			
	Balero 10mm		2			
	Tope nivel 5.8mm		1			
	Tope nivel 11mm		1			
	Tope nivel 6.4mm		1			
	Tope nivel 7.17mm		1			
	Tubo chuck		1			
	Tope ult		1			
	Balero 11mm		3			
Feedback	Collet		1			
	Eje acero 0.8mm		1			
	Encoder aluminio		1			
	Buje		1			
	Tableta fenólica		1			
	Conector_8		2			
	Optoacoplador		2			
	Resistor		1			
	Tope cantilever		1			
	Cable motor		1			
Alimentación	Tuerca collet		1			
	Pza de acoplamiento		1			
	Pendiente		0			



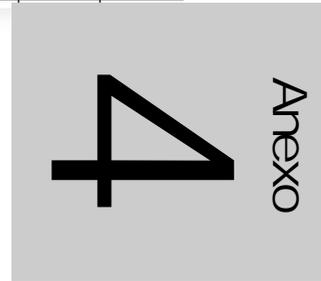
Tabla Constitutiva de Diseño  
 En este anexo se muestra la tabla constitutiva de componentes de la MMH, en extenso.



## Plano General de Fabricación

En este anexo se muestra un plano general de fabricación con las diferentes vistas del módulo de sujeción.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	<b>Matriz de Evaluación de Modularidad (componentes)</b>																					
2	<b>SubEnsamble Estructura</b>																		<b>Sub</b>			
3		Tapa 3	Tapa 4	Tapa 5	Poste largo	Poste corto	Trans_izq	Trans_der	Trans_sup	Eje acero	Engrane	Buje latón	Tope niv	Tope niv	Tornillos	Carretes	Núcleos	Pared de a	Pared de fe	Pared de ac		
4		0/0																				
5		5/5	0/0																			
6		5/5	5/5	0/0																		
7		1/5	1/5	1/1	0/0																	
8		1/1	1/5	1/5	1/1	0/0																
9		2/3	2/3	2/3	1/1	1/1	0/0															
10		2/3	2/3	2/3	1/1	1/1	5/1	0/0														
11		2/3	2/3	2/3	1/1	1/1	3/1	0/0														
12		1/3	1/3	1/3	1/1	1/1	1/1	1/1	0/0													
13		1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/3	0/0											
14		1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/5	2/5	0/0										
15		1/3	1/3	1/3	5/1	5/1	1/1	1/1	1/1	1/5	1/3	4/5	0/0									
16		1/3	1/3	1/3	5/1	5/1	1/1	1/1	1/1	1/5	1/3	4/5	5/5	0/0								
17		1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/1	1/1	1/1	1/1	0/0								
18		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
19		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/5	0/0				
20		0/3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/3	1/5	3/5	0/0			
21		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/5	3/3	0/0		
22		0/0	0/3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/3	1/1	2/0	2/3	3/3	0/0	0/0
23		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/3	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/3	1/3	2/0	4/0	2/3		
24		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/3	1/1	1/1	1/1		
25		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	3/5	1/1	1/3	1/1		
26		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	2/1	1/1	1/3	1/3		
27		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	1/5	1/1	
28		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1		
29		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	1/1	1/1	1/5	1/1		
30		2/3	2/3	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
31		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
32		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	4/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
33		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	0/0	2/0	2/0	0/0	0/0	2/0	2/0
34		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/1	0/1	2/0	2/0	0/1	2/1	2/1	2/1
35		0/5	0/5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
36		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/5	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
37		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/5	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
38		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/5	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
39		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/5	0/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
40		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
41		2/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	2/0	2/0	2/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
42		0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

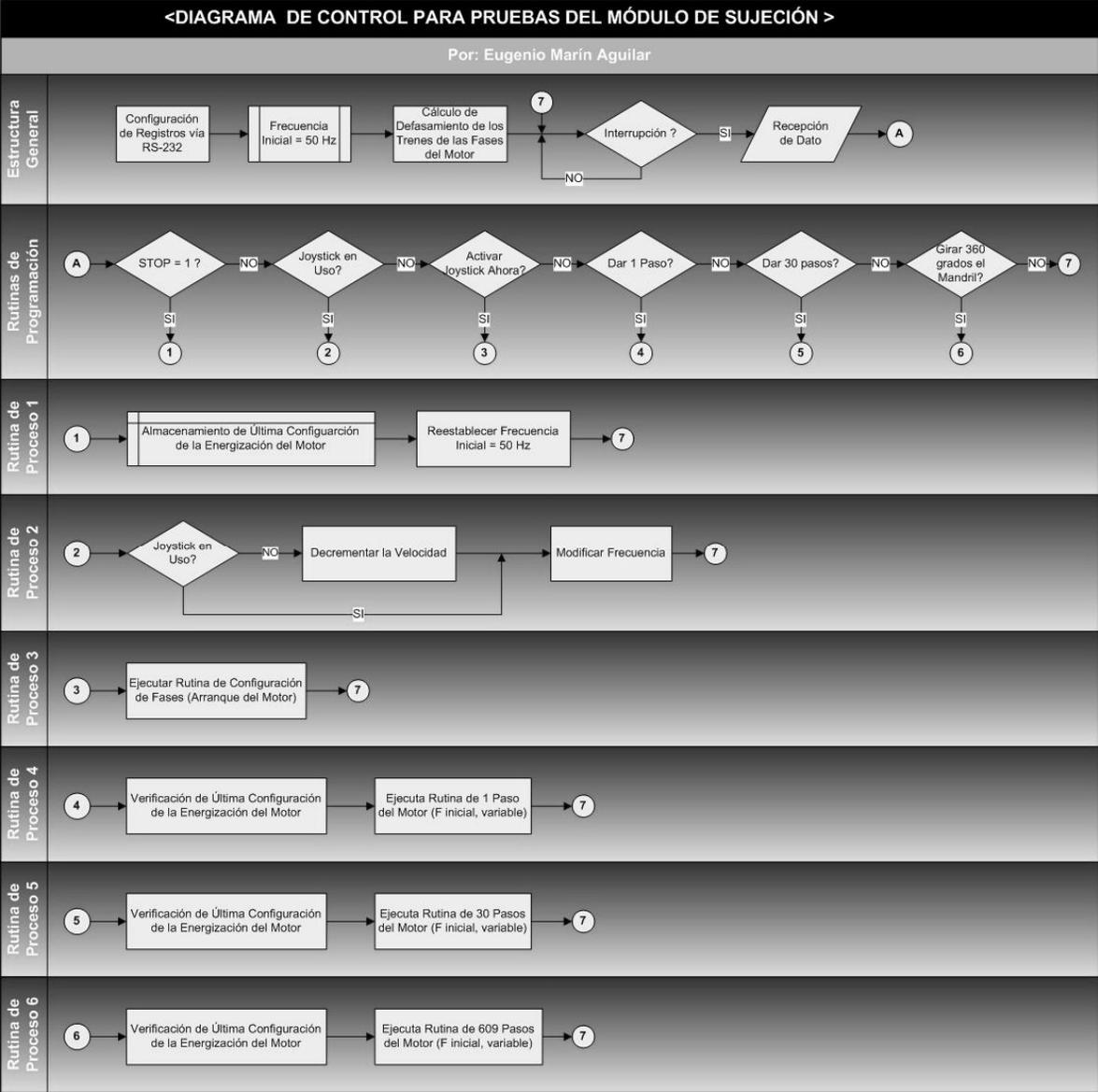


# Matriz de Evaluación de Modularidad

Se presenta un detalle del tipo de matrices desarrolladas. En este caso, el primer valor está asociado a la similitud y el segundo a la dependencia entre componentes.

# Diagrama de Control

En este anexo se muestra el diagrama de flujo asociado al control para las pruebas del módulo de sujeción.



# REFERENCIAS

*Se presentan los artículos (papers), libros (bibliografía), revistas (hemerografía) y consultas electrónicas (webografía) utilizadas en el desarrollo de esta tesis.*

## CAPÍTULO 1

- [1] **Galilei, Galileo.** (2003) “Diálogo sobre dos nuevas ciencias” en Hawking, Stephen. *A hombros de gigantes. Las grandes obras de la Física y la Astronomía*, Ed. Crítica, Barcelona, pp. 357-360.
- [2] **Kasper, Manfred.** (2004) *Lecture Notes. Microsystems Engineering*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Germany.
- [3] **Santilli, R.** (1995) *Will Microengineering affect your Business?* Computing & Control Engineering Journal, April.
- [4] **Nicoud, Jean-Daniel.** (1995) *Microengineering: when is small too small? Nanoengineering: when is large too large?* Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, pp. 1-6.
- [5] **Ishikawa Y.; Kitahara T.** (1997) *Present and Future of Micromechatronics*. International Symposium on Micromechatronics and Human Science, IEEE, pp. 13-20.
- [6] **Dario, P.; et al.** (2000) *Advances in Micromechatronics*. Scuola Superiore Sant’Anna - MiTech Lab.
- [7] **Marsh, George.** (2002) *Micromachinery rolling at last?* Materials Today, Elsevier Science July/August, pp. 44-49.
- [8] **Schünemann, M.; Hünter V.** (1999) *Mikrosystemtechnik — Wann kommt der Durchbruch?* TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 3/4, 8. Jg., Dezember, S. 67-72.
- [9] **Judy, Jack W.** (2001) *Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications*. Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing, UK, pp. 1115-1134.
- [10] **Frazier, Bruno et al.** (1995) *The Miniaturization Technologies: Past, Present and Future*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 5, October.
- [11] **Gad-el-Hak.** (2002) *The MEMS Handbook*. CRC Press, USA.
- [12] **Feynman, Richard.** (1992) *There’s Plenty of Room at the Bottom*. Journal of Microelectromechanical Systems. (Transcription of a talk given by Feynman on December 26, 1959, at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology), Vol. 1, No. 1, March.
- [13] **Gleick, James.** (1993) *GENIUS: The Life and the Science of Richard Feynman*. Vintage Books, N.Y.

- [14] **Tagüeña, Julia; del Río, Antonio.** “*Nanomundo. La importancia de lo pequeño*” en la revista universitaria *¿Cómo ves?*, pp. 11-16. Año 5, No. 50
- [15] **Prime Faraday Partnership.** (2002) *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*. Prime Faraday Technology Watch, ISBN-84402-020-7. <http://www.primetechnologywatch.org.uk>
- [16] **Kussul, E. M. et al.** (1996) *Micromechanical Engineering: a Basis for the Low-Cost Manufacturing of Mechanical Microdevices using Microequipment*. Journal of Micromechanics and Microengineering, Institute of Physics Publishing. Vol. 6, pp.410-425.
- [17] **Kussul, E. M. et al.** (2002) *Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories*. Journal of Micromechanics and Microengineering, Institute of Physics Publishing. Vol. 12, pp.1-18.
- [18] **Gaceta UNAM.** (2006) Órgano Informativo de la UNAM. 3 de abril, No. 3.
- [19] **Ruiz-Huerta, L.** (2005) *Desarrollo de Microequipo para Células de Manufactura*. Tesis de Doctorado, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [20] **Lieffering, Volker.** (2004) *Study on the Nanotechnology and Microsystems Technology Sector in Mexico*. Malsh TechnoValuation, Utrecht, The Netherlands. ISBN: 90-9018844-4
- [21] **Rai-Choudhury, P.** (2001) “*MEMS, Microsystems, Micromachines: Commercializing an Emergent Disruptive Technology*” en *MEMS and MOEMS. Technology and Applications*. SPIE Press, USA.
- [22] **Grace, Roger H.** (2003) *Commercialization Issues of MEMS/MST/Micromachines. An Updated Industry Report Card on the Barriers to Commercialization*. Roger Grace Associates.
- [23] **Ehmann, Kornel F.; De Vor, Richard E. et al.** (2005) *International Assessment Research and Development in Micromanufacturing*. World Technology Evaluation Center (WTEC) Panel Report. Sponsored by the National Science Foundation (NSF) and other agencies of the U.S. Government.
- [24] **Ehmann, Kornel F. et al.** (2005) *Micro-manufacturing Research and Development –State-of-the-art in the U.S.–*. International Forum on Desktop Factory in SUWA (DTF 2005). Worldwide Engineering and Manufacturing Trends in DTF & Micro Machines. Technological Foundation of Nagano Prefecture SUWA.
- [25] **National Technology Agency of Finland.** (2003) *Presto – Future Products. Added-value with Micro and Precision Technology 1999-2002*. TEKES, Technology Programme Report, Helsinki.
- [26] **Bundesministerium für Bildung und Forschung.** (2004) *Rahmenprogramm zur Förderung 2004-2009 Microsysteme*. BMBF Programm. Bonn, Deutschland.
- [27] **Kahaner, D.K.** (1996) *Some MicroMachine Activities in Japan*. Asian Technology Information Program (ATIP). Key Source: ATIP96.021
- [28] **Okazaki, Yuichi et al.** (2004) *Microfactory – Concepts, History and Developments*. (AIST, Tsukuba, Japan). Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, Vol. 126, pp. 837-844.
- [29] <http://www.dtf.ne.jp/>
- [30] <http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Workshop%20Report.html>
- [31] **Gaugel, T. et al.** (2002) *Minifabrik für Laserdioden und Biochips*. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (FhG-IPA), Stuttgart.
- [32] **Castañeda Casas, J.M.** (2005) *Automated Machining. Prototyping a NC desktop machine*. Final Report. Japan-Mexico Exchange Program. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).
- [33] <http://publica.fhg.de/documents/N-9909.html>

## CAPÍTULO 2

- [34] **Aguirre Esponda, Guillermo José.** (1992) *Evaluation of Technical Systems at the Design Stage*. PhD. Dissertation. Department of Engineering, University of Cambridge, United Kingdom.
- [35] **Ullman, David G.** (2003) *The Mechanical Design Process*. Ed. McGraw-Hill, 3rd Ed., New York.
- [36] **Nayler, G. H. F.** (1999) *Diccionario Moderno de Ingeniería Mecánica. –Edición Bilingüe–*. 1ª. ed., Ed. Prentice Hall, Tomos I y II, México.
- [37] **Skakoon, James G.** (2000) *Detailed Mechanical Design. A Practical Guide*. ASME Press, N.Y.
- [38] **Oropeza Monterrubio, Rafael, et. al** (2005) *TRIZ, La metodología más moderna para inventar o innovar tecnológicamente de manera sistemática*, 1ª. ed., Ed. Panorama, México.
- [39] <http://www.triz.net/lecturas/TrizJournal.html>
- [40] **Bolton, William.** (2001) *Mecatrónica. Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. 2ª. ed., Ed. Alfaomega, México.
- [41] **Bishop, Robert H. et al.** (2002) *The Mechatronics Handbook*. CRC Press, USA.
- [42] <http://www.cage.curtin.edu.au/>
- [43] **Huang, Chun-Che** (1999) *Synthesis of Modular Mechatronic Products: A Testability Perspective*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 2, pp. 119-132.
- [44] **Gershenson, J.K. et al.** (1999) *Modular Product Design: A Life-Cycle View*. Transactions of the Society for Design and Process Science, Vol. 3, No. 4, pp. 13-26.
- [45] **Ulrich, K; Tung, K.** (1991) *Fundamentals of Product Modularity*. Proceedings of the 1991 ASME Design Technical Conferences – Conference on Design Manufacture/Integration, Miami, Florida.
- [46] **Chen, W. et al.** (1994) *Modularity and the Independence of Functional Requirements in Design Complex Systems*. Proceedings of the 1994 ASME Design Technical Conferences – Conference on Concurrent Product Design, Minneapolis, Minnesota.
- [47] **Marín-Aguilar, E. et al.** (2004) *La Configuración Modular como una Aportación al Desarrollo de Micromáquinas Herramienta de Bajo Costo*. Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo. (Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, SOMIM), México, Vol. 1, No. 5, Año 3, pp. 182-187.
- [48] **Baldwin, Carliss Y.; Clark, Kim B.** (2003) *Design Rules: Volume 1, The Power of Modularity*. Harvard Business School. Preface to the Japanese Edition.
- [49] **Baldwin, Carliss Y.; Clark, Kim B.** (2002) *The Option Value of Modularity in Design. An example from Design Rules: Volume 1, The Power of Modularity*. Harvard Business School. Draft.
- [50] **Pahl, G. & Beitz, W.** (1984) *Engineering Design*. Printed in UK, Edited by Ken Wallace, The Design Council, Springer-Verlag, London.
- [51] **Huang, Chun-Che** (2000) *Overview of Modular Product Development*. Proceedings of the National Science Council, Rep. China, Vol. 24, No. 3, pp. 149-165.
- [52] **Student Leadership Council.** (2004) *Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems. Student Handbook*. National Science Foundation, College of Engineering, University of Michigan.

[53] <http://www.erc.engin.umich.edu/>

[54] **He, David W.; Kusiak Andrew.** (1997) *Design of Assembly Systems for Modular Products*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 5, pp. 647-655.

### CAPÍTULO 3

[55] **Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Marín-Aguilar, E.; et al.** (2004) *Parallelogram Micromachine for Low Cost Micromechanics*. Proceedings of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congresses and R&D Expo.

[56] **Muñoz Leines, C.A. y Santos Carrasco, C.A.** (2003) *Empleo de FPGA's para el Sistema de Control de Motores de Pasos Bimodales en Micromecánica*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Eléctrica Electrónica). Facultad de Ingeniería, UNAM.

[57] **López Meyer, Paulo.** (2005) *Diseño de un Motor de Pasos de Alta Potencia y Propuesta de Control Adaptivo*. Tesis de Maestría (Ingeniería Eléctrica). Posgrado de Ingeniería, UNAM.

[58] **Kenjo, T. & Sugawara, A.** (1994) *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. 2<sup>nd</sup>. Ed. Clarendon Press, Oxford University Press, USA.