

# El Diseño Modular en el contexto del desarrollo de Máquinas Herramienta Reconfigurables.

**R. Pérez Rodríguez , H. Ahuett Garza \*, A. Molina Gutiérrez \*\*, C. Rodríguez González \*\*.**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Holguín. Cuba. Fax: +53 24 48 1843.

e-mail: roberto.perez@facing.uho.edu.cu, Teléfono: +53 24 48 2675.

\*Centro de Diseño e Innovación de Productos,

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Fax: +52 81 8328-4123. Teléfono: +52 81 8358-2000 ext. 5127.

e-mail: horacio.ahuett@itesm.mx

\*\*Centro de Sistemas Integrados de Manufactura,

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Fax: +52 81 8328-4123, Teléfono: +52 81 8358-1400 ext. 5352.

e-mail: {armolina, ciro.rodriguez}@itesm.mx

(Recibido 21 de Septiembre de 2004, aceptado 10 de Febrero 2005).

## Resumen.

Las tendencias actuales en los procesos de manufactura reflejan los cambios en las demandas de los clientes. En nuestros días, el mercado requiere inexorablemente de productos cada vez más personalizados, por lo que se tiende de una producción masiva hacia un tipo específico de producción, en menos tiempo y con menos costos de producción. En respuesta a esta necesidad, la nueva generación de máquinas herramienta debe de ser reconfigurable e inteligente. Las características principales de las Máquinas Reconfigurables e Inteligentes son la modularidad, convertibilidad, flexibilidad y efectividad en los costos. Este artículo presenta un enfoque para el diseño modular de máquinas herramienta, basado en el portafolio de productos del constructor de máquinas. La metodología parte de un conjunto de requerimientos funcionales definidos por el constructor de máquinas y ofrece una descripción de los posibles módulos que pueden ser desarrollados para una determinada máquina herramienta reconfigurable.

**Palabras claves: Diseño modular, máquinas herramienta, reconfigurable, inteligente.**

## 1. Introducción.

En la actualidad, los sistemas de manufactura deben de competir en un mercado cada vez más exigente y diverso. Los clientes demandan respuestas rápidas a sus necesidades y productos con ciclos de vida cada vez más cortos.

En general, existen dos normativas bien definidas en los sistemas automatizados de manufactura tradicionales. Por una parte, las líneas *transfer* son diseñadas para altos volúmenes de producción siguiendo un paradigma de una automatización fija y se caracterizan por su limitada capacidad de adaptarse a los cambios en la demanda de los productos. Por otra parte, los Sistemas Flexibles de Fabricación basados en la tecnología CNC son diseñados para producir familias de productos, un paradigma que implica elevadas inversiones y la no utilización completa del equipamiento. Ninguno de estos enfoques constituye

una solución para las necesidades del mercado actual y futuro.

En los últimos años, se han realizado considerables esfuerzos para el desarrollo e implantación de Sistemas Reconfigurables de Manufactura (SRM), para proporcionar una respuesta en términos de efectividad en los costos en este nuevo mercado [1]. En principio, los SRM son diseñados para adaptarse rápidamente a los cambios en los productos y en los volúmenes de producción. El aspecto más relevante consiste en ser capaz de actualizarse rápidamente el diseño estructural del equipamiento, en términos de *hardware* y *software* (Figura 1).

El componente básico de un SRM es la Máquina Herramienta Reconfigurable (MHR), diseñada para fabricar una familia de productos. Para evitar los altos costos que implica la utilización de un Sistema de Fabricación Flexible (FMS) tradicional, las MHR deben de incorporar el diseño modular [1, 2, 3, 4, 5]. Los módulos normalizados pueden ser utilizados como

bloques constructivos para la construcción de la máquina. Estos deben de ser complementados con módulos que son diseñados para producir un producto en específico.

Este artículo presenta las características generales de una metodología para el desarrollo modular de máquinas herramienta reconfigurables e inteligentes, basado en el portafolio de productos del constructor de máquinas. La metodología considera un conjunto de requerimientos funcionales definidos por el constructor de máquinas y produce una descripción de los módulos que pueden ser utilizados en una máquina herramienta reconfigurable e inteligente. El alcance del artículo es ilustrar la metodología para el desarrollo modular de máquinas herramienta.

**2. Antecedentes.**

Una de las características de las Máquinas Herramienta Reconfigurables es la modularidad, tanto desde el punto de vista estructural como desde el punto de vista del controlador. La modularidad permite una rápida y efectiva integración durante el cambio y/o modificación estructural de la MHR de una primera capacidad de producción a una segunda capacidad de producción, para fabricar un volumen determinado de un producto o familia de productos.

Las características que determinan la facilidad de reconfiguración son las siguientes: modularidad, integrabilidad, convertibilidad y diagnosticabilidad. La modularidad ha sido estudiada ampliamente desde el punto de vista funcional y constructivo [6], [7]. Los estudios acerca de la modularidad en las máquinas herramientas reconfigurables son escasos, solamente dedicados a la selección modular [8].

Garro y Martin [9] plantearon un diseño modular de una máquina herramienta teniendo en cuenta el entorno productivo y los módulos de control. Katz y Chung [10] desarrollaron un nuevo tipo de máquina herramienta reconfigurable, de tipo arco, donde la ubicación del husillo está en función del ángulo de la pieza a

maquinar. Koren y Kota [3] patentaron una máquina herramienta reconfigurable donde el tipo, ubicación y número de husillos puede ser ajustado en respuesta a los cambios en los requerimientos del producto. Landers [2] analizó el impacto de los requerimientos de producción en el diseño de máquinas herramientas reconfigurables.

Para el diseño sistemático de las máquinas herramienta reconfigurables, se han desarrollado varias herramientas de diseño. Zatarain *et al.* [11] propusieron un método para analizar la rigidez dinámica de una máquina herramienta utilizando información precalculada de los componentes. Yigit y Ulsoy [12] desarrollaron una metodología para evaluar las características dinámicas de las máquinas herramientas reconfigurables. Moon y Kota [4] y [5] desarrollaron una metodología sistémica para la síntesis cinemática de máquinas herramienta a partir de la descripción matemática de las tareas de fabricación. Yigit y Ulsoy [13] analizaron el aislamiento de las vibraciones de una máquina herramienta reconfigurable y propusieron diferentes estrategias dependiendo de los requerimientos de la MHR. Moon *et al.* [4] introdujeron una metodología para evaluar los errores en las máquinas herramienta utilizando la información de los diferentes módulos.

**3. El enfoque modular en el diseño conceptual de Máquinas Herramienta.**

Las metodologías desarrolladas y orientadas al diseño modular, ofrecen una perspectiva funcional o constructiva [6], [7] y poseen insuficiencias formales en su concepción. El enfoque de modularidad funcional se deriva de un análisis funcional orientado a satisfacer las necesidades de los usuarios, a través de la simple adición o substracción de módulos. Por otra parte, el enfoque de modularidad constructiva expresa una orientación para facilitar la fabricación, el ensamble, la transportación, etc., durante el ciclo de vida del producto.

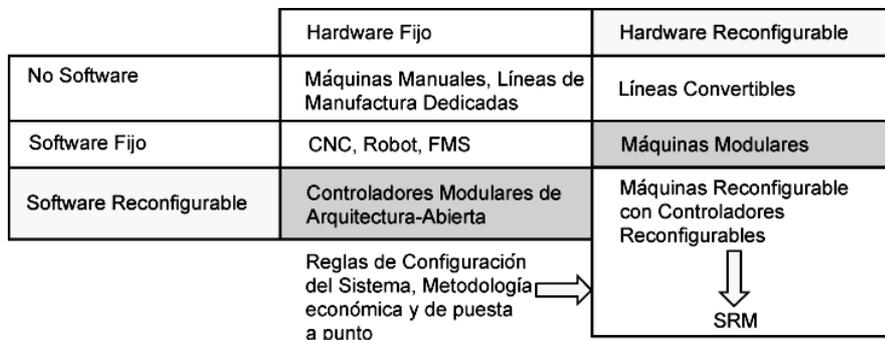


Figura 1. Tipos de Sistemas de Manufactura [3].

Una de las características fundamentales que deben de poseer las máquinas reconfigurables, es su orientación modular, pero no desde el punto de vista funcional o constructivo de manera aislada, sino desde un punto de vista de modularidad reconfigurable. Por modularidad reconfigurable entendemos aquellos principios y reglas que determinan en una familia de máquinas o de productos, el modo y la forma en que se estandarizan los módulos y sus respectivas interfaces, de tal forma que permita cambiar la configuración estructural y funcional de la máquina para adaptarse a cambios significativos en las características del producto.

La metodología que se propone para el desarrollo modular reconfigurable de máquinas, posee como característica esencial, el transitar desde requerimientos funcionales con una información inicial y poco definida de la máquina, hasta características más concretas que permiten definir los módulos que garanticen una modularidad reconfigurable, cumpliendo con los nuevos requerimientos del constructor de la máquina.

La metodología establece cuatro dominios (Figura 2) que van desde la captura de los requerimientos del constructor de máquinas, hasta la definición conceptual de la modularidad reconfigurable. En la metodología expresada en la Figura 2, las capas constituyen una

formalización del conocimiento que se obtiene en un determinado paso.

**3.1. Caracterización del Dominio del usuario.**

El primer dominio permite identificar cuáles son los requerimientos del constructor de máquinas, que inciden tanto en el desarrollo de la máquina, como en su reconfigurabilidad. Por ejemplo, en la Tabla 1 se muestra un fragmento de los requerimientos que abarcaría el desarrollo de una máquina reconfigurable que posibilite el corte de láminas con láser, el corte de láminas por plasma o la inspección dimensional de productos.

Los requerimientos funcionales relacionados con la reconfigurabilidad en la etapa de especificación, se han agrupado en dos ámbitos fundamentales: el ámbito de los aspectos relacionados con la máquina y el ámbito relacionado con los procesos a implementar en la máquina. Cada uno de ellos contiene un conjunto de variables que facilita su análisis en las etapas posteriores del modelo.

Este paso permite obtener la capa de los requerimientos, que no es más que una representación de las intenciones del constructor de máquinas acerca de la reconfigurabilidad y una información básica para el segundo paso de la metodología propuesta.

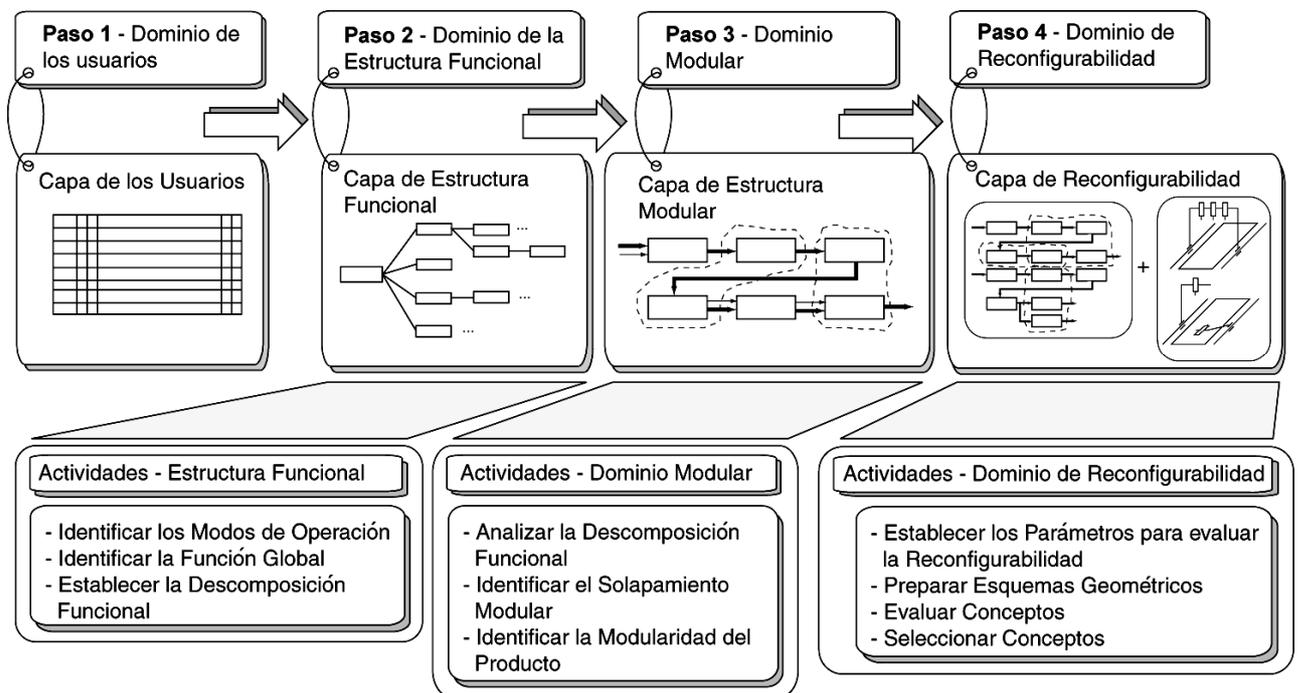


Figura 2. Metodología para el diseño modular de máquinas herramienta reconfigurables.

**Tabla 1.** Algunos de los requerimientos para desarrollar una máquina reconfigurable que posibilite el corte de láminas con láser, el corte de láminas por plasma o la inspección dimensional de productos (N: Necesario; D: Deseable; Ql: Qualitativo; Qn: Quantitativo).

Ambito		N	D		Ql	Qn
Máquina	Genérico	✓		Dimensiones Límites		✓
		✓		Tolerancias		✓
			...			
	Específico	✓		Número de componentes		✓
		✓	Cambio Rápido de Herramientas		✓	
			...			
Procesos	Láser	✓		Tipo	✓	
		✓		Sistema de enfriamiento	✓	
				...		
	Plasma	✓		Límite de la Velocidad de corte		✓
		✓		Velocidad de posicionamiento		✓
		✓		Generación de ruido		✓
				...		
		✓		Precisión Lineal		✓
	✓		Repetibilidad		✓	

**3.2. Caracterización del Dominio de la Estructura Funcional.**

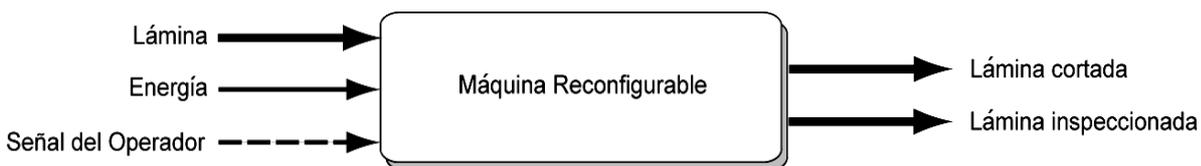
Las metodologías desarrolladas para el análisis de la estructura funcional de los productos poseen dos problemas básicos [6], [7], [14]. En primer lugar, no existe una definición metodológica clara de cómo definir las sub-funciones idóneas y/o adecuadas para un conjunto determinado de requerimientos funcionales; y en segundo lugar, no existe un método que garantice una descomposición coherente o similar de las funciones en sub-funciones.

En la metodología para el desarrollo modular de máquinas reconfigurables e inteligentes, el paso relativo al establecimiento de la estructura funcional de la máquina constituye una forma de resolver el problema planteado en el párrafo anterior. El dominio de la estructura funcional se basa en la utilización de una descomposición funcional de tipo jerárquica, que sistemáticamente descompone las funciones globales en sub-funciones.

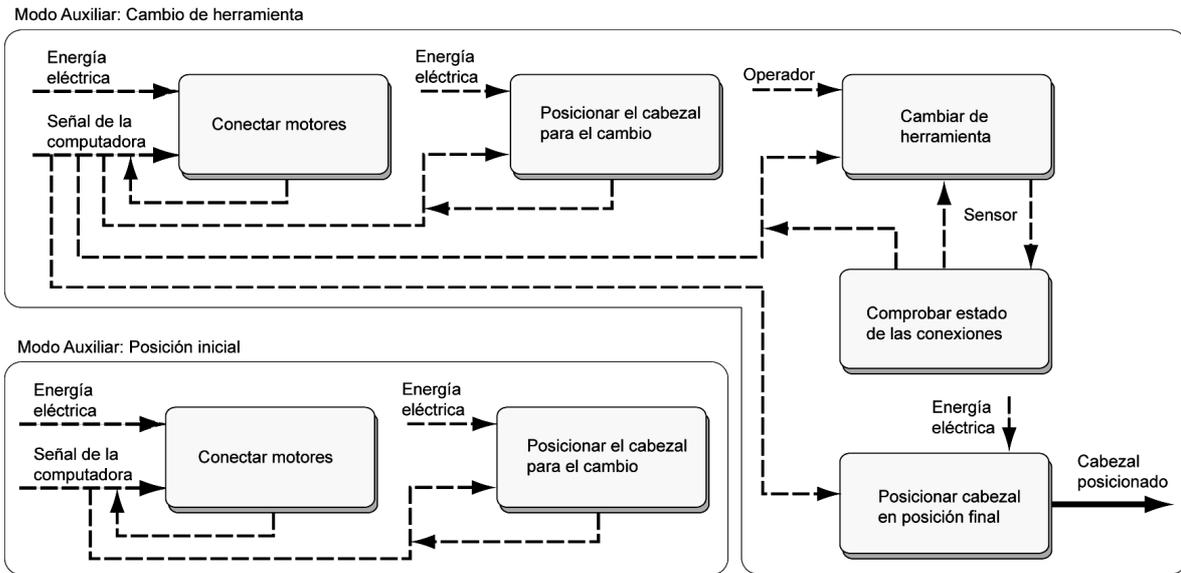
En la Figura 3 se muestra cual sería la función global, para el caso del prototipo de una máquina herramienta de corte de láminas, por láser y de medición por coordenadas.

Cada etapa de descomposición da lugar a una nueva capa de sub-funciones, permitiendo al proceso de diseño ir de la información más abstracta de las características de desempeño que ya fueron establecidas en la etapa anterior, hasta una información más relacionada con las características morfológicas de la misma. En la Figura 4 se muestra la descomposición funcional para el caso anterior, para los modos auxiliares de cambio de herramienta y posición inicial.

Una vez que todas las funciones han sido descompuestas hasta un mismo nivel, la última capa representará a las sub-funciones más relacionadas con la estructura final de la máquina. El proceso facilita la toma de decisiones acerca de la reconfigurabilidad de la máquina.



**Figura 3.** Diagrama de flujos para el caso de la máquina reconfigurable para el corte de láminas por láser, por plasma y para la medición por coordenadas.



**Figura 4.** Descomposición Funcional de la máquina para el corte de láminas por láser, por plasma y para la medición por coordenadas para los modos auxiliares de cambio de herramienta y posición inicial.

### 3.3. Caracterización del Dominio Modular.

Existen diversas formas y enfoques para modular un producto. Fixon [7] establece tres perspectivas para abordar la modularidad: sistemas, jerarquía y ciclo de vida. Stone [6] introduce métodos para determinar los módulos a partir de la estructura funcional utilizando la heurística. Estos métodos identifican a los módulos a partir del modelo funcional. Erixon [14] desarrolló el método *Modular Function Deployment* (MFD), que también se basa en la descomposición funcional, pero tiene en consideración otras variables para el estudio.

La metodología propuesta en este trabajo relaciona varios aspectos del método MFD y del método heurístico de Stone, con aspectos de reconfigurabilidad. El dominio modular se compone de tres aspectos (Figura 1). En primer lugar se analizan los diferentes modos de operación de la máquina, con sus respectivas descomposiciones funcionales, luego se identifican el solapamiento de funciones y/o módulos entre los diferentes modos de operación. Esta superposición, permite identificar como tercer aspecto, un conjunto de posibles módulos en la máquina a partir de su análisis, criterios heurísticos y reglas de modularidad.

En la Figura 5 se muestra un esquema conceptual de cómo se desarrollaría este paso para el caso de la máquina que se analiza.

Una vez que se concluya este paso, se obtiene la capa de la estructura modular, que no es más que la transformación de la información contenida en la capa de los requerimientos funcionales, en información más concreta relacionada con la modularidad del producto. Este paso es modular en el desarrollo del trabajo.

### 3.4. Caracterización del Dominio de Reconfigurabilidad.

En este paso, se recomiendan cuatro sub-etapas (Figura 1). La primera consiste en determinar para la máquina o familia de máquinas en cuestión, cuáles son los parámetros que caracterizan la reconfigurabilidad de la misma. Existen dos tipos de parámetros de reconfigurabilidad, los parámetros reconfigurables genéricos, que establecen aquellas características comunes a la familia de máquinas; y los parámetros reconfigurables específicos, propios de un entorno determinado.

La segunda sub-etapa consiste en generar esquemas geométricos preliminares, que permitan determinar configuraciones de la máquina reconfigurable a partir de la capa de estructura modular. Para la determinación de las posibles variantes de conceptos posibles se utilizan criterios heurísticos. En la Tabla 2, se puede apreciar la selección de tres conceptos básicos para el caso de la máquina reconfigurable que se analiza en este artículo.

Una vez que se han definido los diferentes conceptos de la máquina, se hace necesario la evaluación de los diferentes conceptos geométricos reconfigurables (Figura 1), partiendo del conocimiento y la información precedente. Para poder evaluar la reconfigurabilidad de los conceptos, en la metodología propuesta se utilizan dos criterios o enfoques.

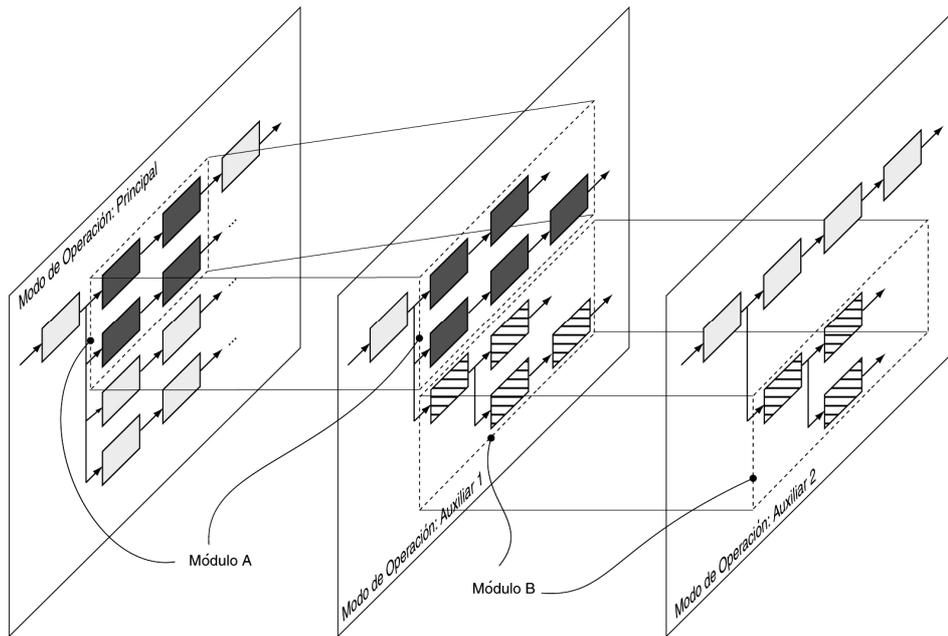
Una primera herramienta o enfoque de evaluación es la Matriz de Conceptos Reconfigurables vs Parámetros de Reconfigurabilidad. A través de esta matriz, se pueden apreciar las interacciones que existen entre los diferentes conceptos reconfigurables seleccionados y los parámetros reconfigurables establecidos en el paso

número cuatro (Tabla 2). A partir de esta matriz, se aprecia que el primer concepto para la máquina reconfigurable para láminas es el más adecuado, considerando las variables que se exponen, al tener una relación más fuerte.

Índices de Reconfigurabilidad. Este enfoque es complementario al anterior y permite comparar numéricamente aspectos o variables que evalúan la reconfigurabilidad de máquinas. Entre ellos se puede mencionar: tiempo necesario para reconfigurar, número

de componentes, etc. En este artículo solo se analiza la primera herramienta.

Una vez que se disponga de los resultados de estas herramientas, se selecciona el concepto más adecuado y que posea relaciones e índices de reconfigurabilidad más fuertes. Para el caso de la máquina analizada, se determinó que el concepto más adecuado es el primer concepto de la Tabla 2.

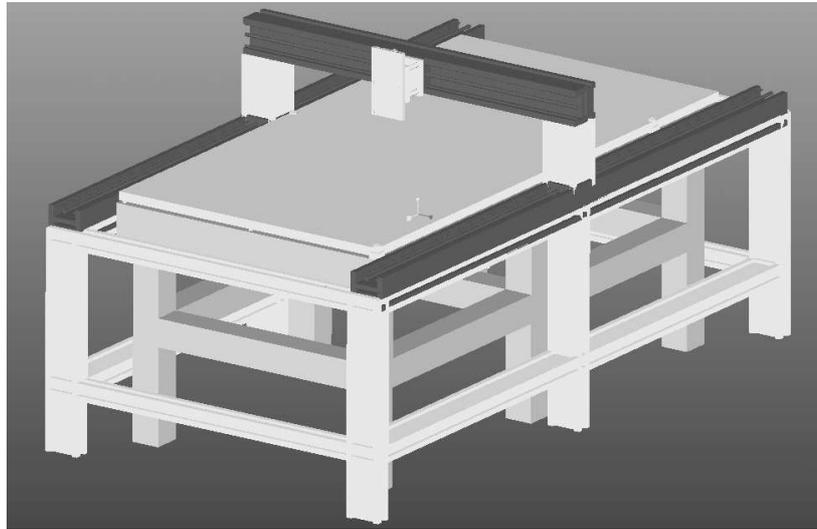


**Figura 5.** Descomposición conceptual del concepto de máquina reconfigurable para los modos de operación principal, auxiliar 1 y auxiliar 2.

**Tabla 2.** Matriz de Parámetros de Reconfiguración vs Conceptos Reconfigurables, para el desarrollo de una máquina reconfigurable que posibilite el corte de láminas con láser, el corte de láminas por plasma o la inspección dimensional de productos.

			Concepto n	
Rigidez	●	◐	...	○
Grados de libertad	○	◐	...	●
...	...	...	...	...
Número de componentes	●	◐	...	○

● = Relación fuerte    ◐ = Relación media    ○ = Relación débil



**Figura 6.** Diseño conceptual del prototipo de máquina herramienta reconfigurable.

#### 4. Conclusiones.

Este artículo ha presentado una metodología para el desarrollo modular de máquinas herramientas reconfigurables. La metodología proporciona una ayuda para la identificación y evaluación de los módulos reconfigurables de una determinada máquina reconfigurable, a partir del conocimiento de los requerimientos funcionales del constructor de máquinas.

#### Agradecimientos.

Esta investigación es parte de las Investigaciones que desarrolla la Cátedra de Mecatrónica del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey titulada “Diseño, Fabricación e Integración de Máquinas Reconfigurables e Inteligentes”. Los autores desean expresar su agradecimiento por el soporte de la Cátedra en la preparación del artículo.

#### 5. Bibliografía.

1. Koren, Y., *et al.* *Reconfigurable Manufacturing Systems*. Annals of the CIRP. Vol. 48/2 (1999), 527–540.
2. Landers, R.G. *A New Paradigm in Machine Tools: Reconfigurable Machine Tools*. Japan–USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan, (2000).
3. Koren, Y.; Kota, S. *Reconfigurable Machine Tools*, U.S. Patent 5,943,750, (1999).
4. Moon, Y–M.; Kota, S. *A Methodology for Automated Design of Reconfigurable Machine Tools*. Proceedings, 32<sup>nd</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Belgium, (1999), 297–303.
5. Moon, Y–M.; Kota, S. *Generalized Kinematic Modeling of Reconfigurable Machine Tools*. Journal of Mechanical Design, Vol. 124, March, (2002), 47–51.
6. Stone, Robert B. *Towards a Theory of Modular Design*. Tesis Doctoral, University of Texas at Austin, United States of America, (1997).
7. Fixon, S.K. *Three Perspectives on Modularity – A Literature Review of a Product Concept for Assembled Hardware Products*. Massachusetts Institute of Technology, ESD-WP-2001-06, (2001).
8. Moon, Y–M.; Kota, S. *Design of Reconfigurable Machine Tools*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, May, (2002), 480–483.
9. Garro, O.; Martin, P. *Towards New Architectures of Machine Tools*. International Journal of Production Research, Vol. 31, No. 10, (1993), 2403–2414.
10. Katz, R.; Chung, H. *Design of an Experimental Reconfigurable Machine Tool*. Japan–USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan, (2000).
11. Zatarain, M.; Lejardi, E.; and Egana, F. *Modular Synthesis of Machine Tools*. Annals of the CIRP, Vol. 47/1, (1998), 333–336.
12. Yigit, A.S.; Ulsoy, A.G. *Application of Nonlinear Receptance coupling to Dynamic Stiffness Evaluation for Reconfigurable Machine Tools*.

- Proceeding IME, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, No. B1, (2002), 87-101.
13. Yigit, A.S.; Ulsoy, A.G. *Design of Vibration Isolation Systems for Reconfigurable Precision Equipment*. Japan–USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan, (2000).
14. Erixon, G. *Modular Function Deployment (MFD), Support for a Good Product Structure Creation*. 2<sup>nd</sup> WDK Workshop on Product Structuring, Delf, Holland, (1996).

## **Modular Design in the development of reconfigurable Machine Tools´ context.**

### **Abstract.**

The manufacturing tendencies reflect the changes on the customer demands. Nowadays, the market is constantly requiring more customized products, moving from mass production to “one-of-a-kind production” in less time with lower production costs. In response to this need, the next generation of machine tools should be reconfigurable and intelligent. Reconfigurability allows for the reduction of machine design lead time, machine set-up and ramp-up time. The principal characteristics of the Reconfigurable and Intelligent Machines are modularity, convertibility, flexibility and cost-effectiveness. This paper presents an approach for the design of machine tools modules, based on the product portfolio of the machine tool builder. The methodology takes as input a set of functional requirements and produces a description of the modules that can be used to produce customized Machine Tools.

**Keywords: Modular Design, Machine Tools, Reconfigurable, Intelligent.**