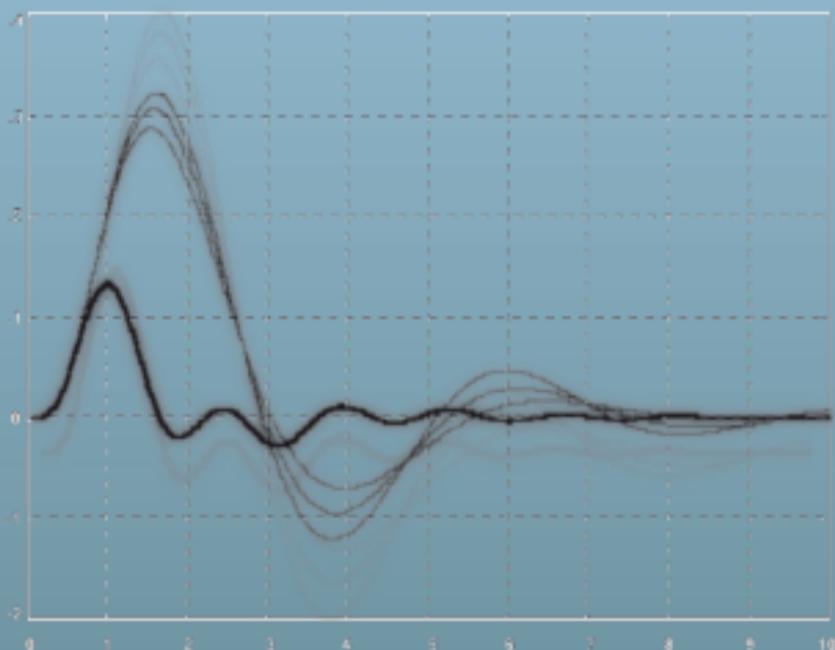


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/DICIEMBRE 2002 • VOLUMEN 12 • Nº 1 y 2



CORRECCIÓN DE ERRORES EN LA FABRICACIÓN DE PRECISIÓN

*Luis Arturo Rapso Brenes
Juan Carlos Campos Rubio*

Resumen

Como respuesta al grado de precisión dimensional y geométrica actualmente exigida a los productos, las máquinas herramienta están en permanente modificación. De esta forma, en la fabricación de componentes de precisión, las variaciones en la interfaz herramienta-pieza, tales como temperatura, desgaste del filo, radio de punta, entre otros, pueden ocasionar errores significativos en el producto final. Estas características delimitan substancialmente el grado de exactitud de las máquinas-herramienta (máquinas con errores menores producen piezas con menos errores). Este trabajo discute el problema del control de las fuentes de errores en la mecánica de precisión con herramientas de punta única y la reducción y corrección de los mismos a través de la utilización de algoritmos de control compensatorio predictivo aliados a un sistema activo basado en actuantes en estado sólido.

Palabras clave: Motores translativos, actuadores lineales, máquinas de ultra precisión, servo acondicionamiento.

Abstract

The modern mechanical products have requirements in dimensional and geometrical precision. Machine tools are in continuous modifications in order to achieve these goals. In the manufacturing of precision components, variations of the tool part interface parameters as temperature, cutting edge wear, tool radius, and could be very significant in the total errors of the product. These characteristics limiting the exactitude of the machine tool - *machines with fewer errors make less error parts*-. In this work the problematic of error sources control is discussed, it is about the precision machining using single tool and the use of compensating algorithms and active compensations systems based on solid state actuators.

Keywords: lineal motors, linear actuators, precision machines, servomechanisms, micro positioning system.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se han realizado esfuerzos para la mecanización de materiales cerámicos y vítreos a través del empleo de herramientas de diamante mono y poli - cristalino. El material es removido sobre determinadas condiciones de corte, lo cual facilita la remoción por deformación plástica, se obtienen superficies libres de fisuras y se mejora la integridad superficial y no superficial. Este proceso denominado "régimen dúctil" es alcanzado vía tasas de remoción optimizadas, donde el espesor de corte (función de la geometría de la herramienta, profundidad de corte y avance), se torna una variable de extrema importancia (Duduch, 1993). Junto a la problemática del control de las variables en la remoción de material, se suma la necesidad de corregir errores sistemáticos y de atenuar disturbios presentes en

el proceso de corte. Esto puede alcanzarse mediante la corrección del movimiento, directamente en la punta cortante a través del control en tiempo real de la posición de la herramienta, vía señal de posición obtenida vía sensor de posición, y accionando directamente un porta-herramienta antes y/o durante el proceso.

De esta forma, se hace necesario utilizar un sistema de microposicionamiento servo controlado que permita bajas amplitudes de movimiento y seguimiento de altas frecuencias de accionamiento. Uno de los componentes básicos de estos sistemas de microposicionamiento es el elemento motor, que realiza la conversión de la señal eléctrica en energía mecánica de movimiento. Este componente electromecánico es denominado *actuador* y transfiere las mejores características de rigidez y respuesta al

microposicionador. En su gran mayoría estos componentes son fabricados con tecnología en estado sólido (Campos Rubio et. al, 1996-a).

En este trabajo analizamos las diferentes fuentes de error en máquinas para mecanizado de ultra-precisión y formas de prevención y/o corrección. Igualmente proponemos la utilización de sistemas de microposicionamiento modulares que puedan ser integrados en máquinas ya existentes y formar parte de máquinas nuevas como ítem alternativo. De esta manera, será discutida la utilización de dos tipos de *actuadores* de estado sólido: piezoeléctricos y magnetostrictivos.

2. FUENTES DE ERROR

Los factores que limitan la exactitud de posicionamiento o repetibilidad de servoposicionadores en máquinas herramienta o instrumentos de precisión son llamadas de fuentes de

error. Dentro de este contexto, el sistema más utilizado en el accionamiento de posicionadores en las máquinas herramienta CNC (Central Numérico Computarizado) es aquél constituido por un servomotor rotativo acoplado a un conjunto husillo/tuerca de esferas recirculantes, a través de un elemento flexible para absorber los desalineamientos (ver Figura 1.). Este tipo de arreglo presenta algunas desventajas que limitan claramente su repetibilidad y resolución, como por ejemplo: la presencia de holguras, la adición de masas inerciales, no linealidades (histéresis, fricción), baja velocidad crítica, entre otras (Campos Rubio et. al., 1996-b).

En la primera etapa del diseño o adaptación de una máquina al mecanizado de precisión, corresponde determinar las causas de los errores y de que forma afectan el perfil de la máquina para tratar de eliminar o atenuar su efecto. A continuación discutiremos las diferentes fuentes de errores

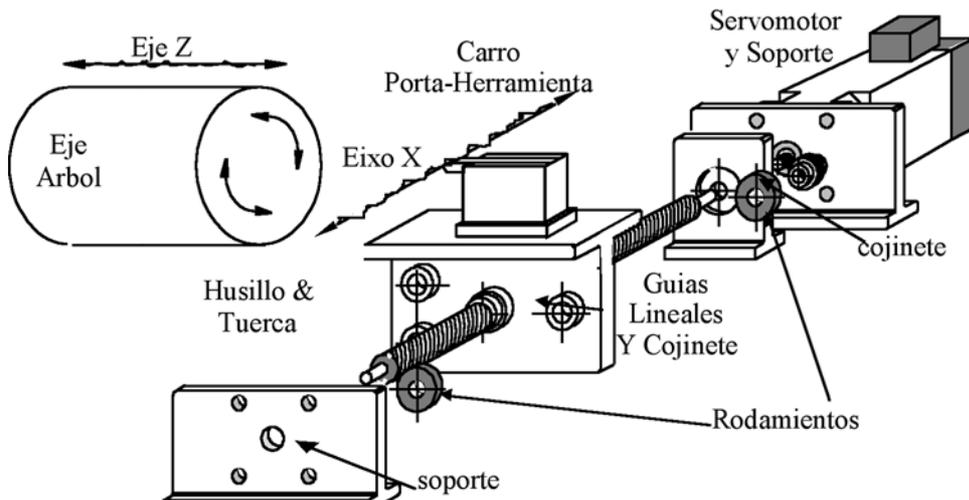


Figura 1. Errores geométricos en un torno y sus reflejos en la trayectoria.

2.1 Errores Geométricos

Los errores en la geometría de la máquina ocurren en varios ejes de movimiento. Están constituidos por tres componentes de translación y tres de rotación. Los peores tipos de error geométrico son los errores angulares, enunciados por Ernest Abbe a través de su principio, el cual exige que el trazo a medir debe constituir el prolongamiento rectilíneo de la escala que sirve como dispositivo de medición (Slocum, 1992). Errores angulares o de Abbe deben ser en su gran mayoría evitados por los diseñadores.

Otro tipo de error geométrico es la deflexión estática ocasionada por el peso de la propia máquina o de sus componentes. Con un análisis y modelado cuidadoso de la estructura, juntas y guías, los errores estáticos pueden ser atenuados o corregidos. En la Figura 2. se puede observar la

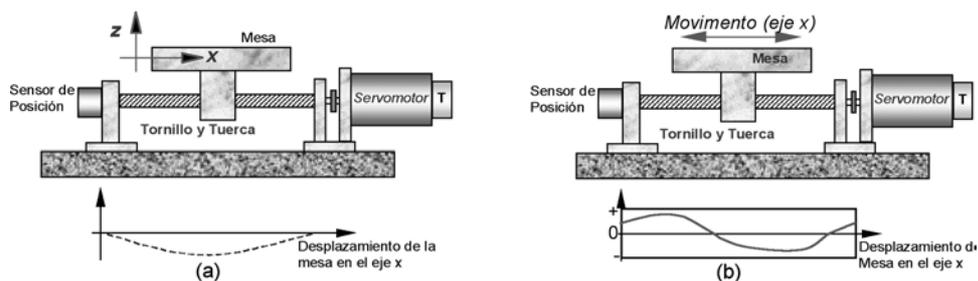


Figura 2. Corrección de errores en posicionadores.

influencia de las deflexiones en un posicionador de máquina-herramienta.

2.2 Errores Dinámicos

Los errores dinámicos en las máquinas se deben, inicialmente, a resonancias estructurales excitadas por la acción cortante que causan vibración en la herramienta, denominadas de *chatter*, y pueden degradar dramáticamente el acabado superficial de una pieza. El sistema de control de la máquina puede ser instruido para evitar la operación en esas velocidades de corte, que pueden forzar la

excitación de la frecuencia natural de la máquina. Los errores dinámicos pueden ser fácilmente caracterizables a través de ensayos y, en general, si se fabrica una máquina rígida, con buen amortiguamiento y leve, permitirá que se realicen operaciones de alta velocidad con mayor facilidad.

2.3 Errores Térmicos

Las expansiones térmicas en las máquinas herramientas son raramente uniformes, por lo tanto los valores medidos no podrían ser compensados con el uso de factores lineales. La causa de estas deformaciones térmicas puede ser atribuida, básicamente, al calor generado por los motores, guías lineales y rotativas, además del propio proceso de corte. Los cambios en la temperatura ambiente generalmente afectan a la máquina de forma más uniforme; sin embargo, deben ser igualmente considerados.

Algunas tentativas para el control térmico: a) Mantener estable la temperatura ambiente. b) Seleccionar los componentes con geometría que minimicen las distorsiones térmicas. c) Evitar gradientes de temperatura entre partes de la estructura. d) Efectuar calentamiento previo de la máquina a través de *cutting air* por un período extenso. e) Realizar enfriamiento del cojinete del cabezal. f) Mantener los motores aislados de la estructura. g) Nebulizar la zona de trabajo, etc.

En suma, la estructura y el ambiente de la máquina están diseñados para auxiliar en la minimización de las deformaciones angulares.

Por otro lado, un análisis de elementos finitos del desempeño térmico de la máquina podría ayudar a la verificación de su desempeño en un caso extremo referente a la disminución de su precisión especificada. La Figura 3 nos muestra un ejemplo del control ambiental mecanizado de ultra-precisión.

2.4 Efectos de la Pieza de Trabajo

Los centros de mecanizado tradicionales con frecuencia son afectados por la pieza mecanizada, debido a que el peso propio distorsiona la estructura de la máquina y cambia las características dinámicas de ésta. Mientras que en los centros de mecanizado de alta precisión, la pieza es colocada enfrente de la máquina y fijada en un local antes que el mecanizado concluya. Los ensayos en la máquina pueden ser realizados antes de iniciar el mecanizado, con el propósito de poder compensar la deformación ocurrida por el peso de la pieza durante el mecanizado.

un sin número de no linealidades y eventos fruto del movimiento relativo herramienta-pieza que se refleja en el desempeño del posicionador.

Es común admitir que sin maquinaria de precisión no es posible producir productos de calidad, de la misma forma que hay quienes afirman que el aumento de la precisión de una máquina implica indudablemente un aumento exponencial del costo. Entretanto, muchos autores han desarrollado estudios sobre la compensación de errores, en su mayoría han almacenado los valores de desvío obtenidos mediante ensayos geométricos y han realizado la acción compensatoria durante las operaciones de mecanizado subsecuentes, manual o automáticamente. Este tipo de técnica efectúa solamente la corrección de los errores sistemáticos (repetitivos); sin embargo, cuando se ingresa en el campo del mecanizado de precisión y ultra-precisión, algunos errores, principalmente clasificados como aleatorios y no importantes debido a su envergadura, deben ser considerados.

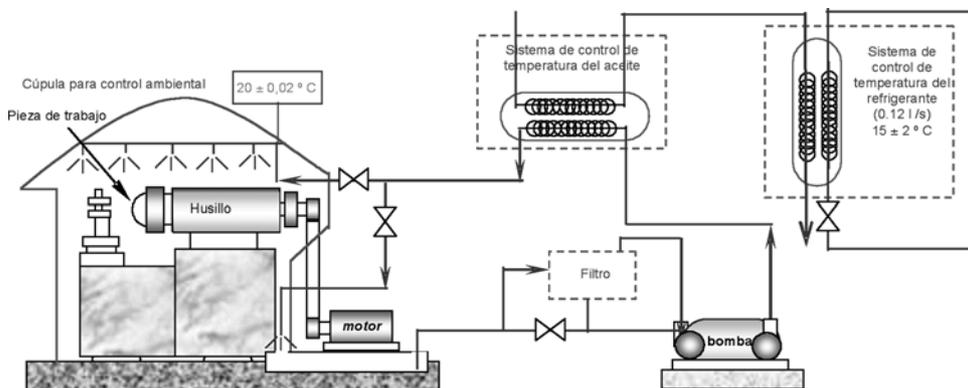


Figura 3. Control ambiental de una máquina de ultraprecisión por medio del baño de aceite (oil shower) (Bryan et al., 1971 Apud Nakazawa, 1994).

3. CORRECCIÓN DE ERRORES

Como se observa en la Figura 1, la geometría de la trayectoria relativa entre herramienta y pieza será reflejada en la calidad geométrica final de la pieza mecanizada (Dow, 1991). La existencia de elementos mecánicos moviéndose dentro de un ambiente real lleva necesariamente a distinguir

Slocum (1992) alerta sobre el hecho de que al caracterizar un error como aleatorio, en realidad, no se tiene certeza del fenómeno que ocasiona este desvío. Por eso, cuando se observan desvíos no previstos en el mapeamiento de errores, serán caracterizados como una variación esporádica de la máquina.

El aumento de la capacidad de procesamiento de los microprocesadores ha permitido a los diseñadores del área idealizar complejos sistemas de control compensatorio predictivo. Este método se basa, básicamente, en tres aspectos: medición de errores *in-process*, procesamiento de señales *on-line* y modelado estocástico.

La medición *in-process* comprende tanto los componentes repetitivos como los no repetitivos de los desvíos, y favorece el estudio de las variaciones durante el proceso de corte. La Figura 4 presenta un ejemplo de aplicación de este tipo de técnica compensatoria (Duduch, 1993).

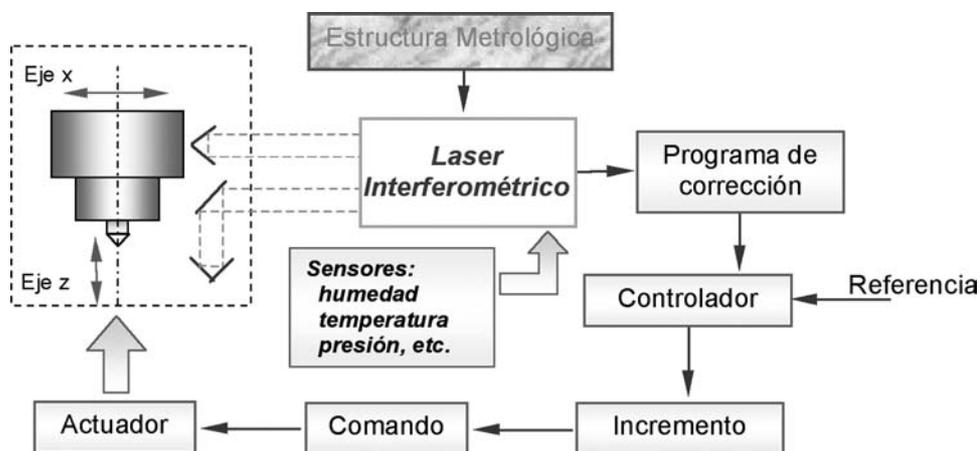


Figura 4. Corrección de errores no repetitivos utilizando una estructura metroológica (Duduch, 1993).

Por otro lado, el procesamiento de señales *on-line* permite determinar directamente el valor de corrección y encontrar una relación entre el resultado de la medición y el error equivalente, lo que permite a la vez estimar valores de compensación futuros. Los modelos estocásticos no solo poseen la característica de describir la dinámica variable del proceso, sino también permiten prever variaciones.

La realización de modelos estocásticos implica necesariamente la utilización de algoritmos auto-regresivos y de parámetros variables. Las aplicaciones prácticas de estos modelos exigen

su implantación en tiempo real, y debido a la complejidad de los algoritmos el desempeño resulta disminuido.

Las redes neuronales han sido ampliamente utilizadas en el diseño de controladores de sistemas no lineales con dinámicas complejas y parámetros variables. Se trata de un método de razonamiento basado en el aprendizaje, capaz de incorporar al sistema de control toda experiencia relacionada con el comportamiento de un posicionador en condiciones de operación (remoción de viruta), a través del conocimiento de un conjunto de vectores que representan dicho comportamiento.

Cuando se entrena adecuadamente, la red neuronal es capaz de emular el comportamiento del sistema con la ventaja de permitir el autoaprendizaje y en un tiempo de procesamiento reducido. Después de que el modelo determina una prevención, se sucede una acción compensatoria que tiene como requisito básico la exactitud y la rapidez (Nakazawa, 1994).

4. SISTEMA MICROPOSICIONADOR

La mayoría de los tornos de precisión comerciales no poseen características suficientes de

exactitud y repetibilidad necesarias para el mecanizado de materiales frágiles. De esta forma, se torna imprescindible la concepción de un sistema alternativo para el posicionamiento y la corrección de errores en el posicionamiento del porta-herramienta, es decir, de la punta de la herramienta de diamante que efectivamente entra en contacto con la pieza y realiza la retirada de material, alcanzando las características deseadas de forma y acabado, tanto superficial como sub-superficial. Varios equipos han sido desarrollados con esta finalidad. En la Figura 5. se muestra el prototipo de un tipo de porta-herramienta modular que utiliza un sistema de guías de resorte.

5.1 Actuadores piezoeléctricos

Los actuadores piezoeléctricos se basan en la propiedad que ciertos materiales cristalinos poseen de inducir una carga eléctrica proporcional a la mecánica aplicada. Como substancias piezoeléctricas en un *actuador* se usan materiales cerámicos sinterizados a partir de bario (Ba), plomo (Pb), titanio (Ti) y zirconio (Zr).

En estas aplicaciones los elementos cerámicos se utilizan de manera inversa, es decir, se provoca un cambio geométrico del contorno externo del material debido a la aplicación de una tensión eléctrica. La deformación del elemento

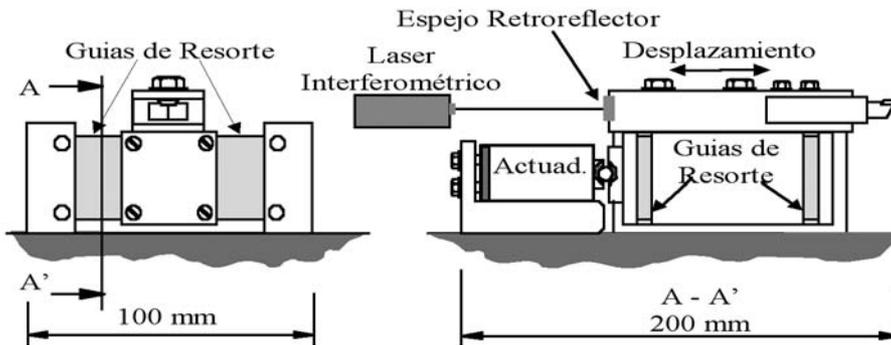


Figura 5. Porta-herramienta activo para el microposicionamiento.

5. ACTUADORES DE ESTADO SÓLIDO

Como fue señalado anteriormente, la utilización de un elemento motor apropiado para su uso en el posicionamiento de la mecánica de precisión es de extrema importancia. Diversos tipos de actuadores lineales podrían ser caracterizados en este trabajo; por ejemplo, hidráulicos, neumáticos, etc. Sin embargo, las soluciones mencionadas aportarían poco o casi nada al problema de posicionamiento submicrométrico de elevada rapidez y repetibilidad. A continuación presentamos dos tipos importantes de *actuadores* de estado sólido que se basan en los principios piezoeléctricos y magnetoestrictivo.

(expansión piezoeléctrica) es muy utilizada en el movimiento y posicionamiento de sistemas mecánicos. Esta deformación se consigue por la aplicación de los efectos longitudinales o transversales.

Una de las configuraciones más utilizadas es la que consiste en varios discos cerámicos con un espesor que varía de 0.3 a 1 mm (ver Figura 6). Cada disco se encuentra situado entre placas planas conductoras (electrodos). Varios conjuntos están unidos entre sí por un tipo de cemento *epoxi aislante*, el arreglo completo es sellado herméticamente en una cápsula de acero. De esta forma, este tipo de configuración alcanza rigidez

y alta resistencia mecánica más las características dinámicas propias de los dispositivos piezoeléctricos.

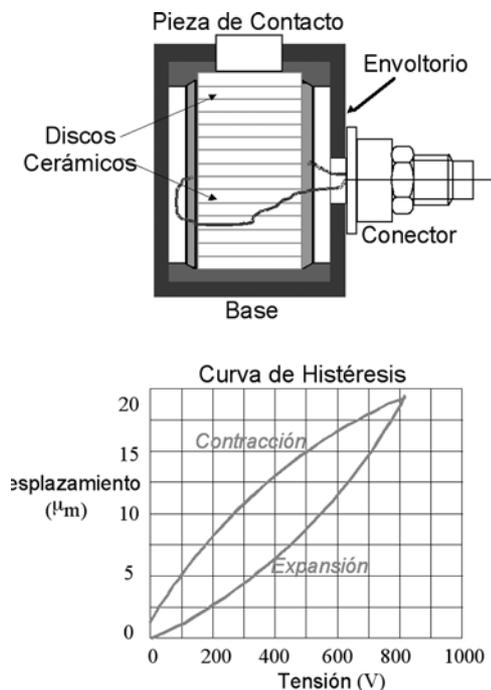


Figura 6. Configuración Básica de un Actuador Piezoeléctrico y Curva Característica (Pysik Instrumente, 1995).

Como características ventajosas de un actuador piezoeléctrico se puede afirmar lo siguiente:

- Permite resoluciones nanométricas de posicionamiento por medio del control de la tensión aplicada y la utilización de sensores de posición adecuados.
- No posee holguras ni partes móviles, su expansión se consigue exclusivamente por la deformación sólida del material cristalino (Tavares, 1995).
- Alta eficiencia en la conversión de energía eléctrica en movimiento.
- Capacidad de soportar altas cargas (hasta 30 000 N)
- Amplio ancho de banda, su velocidad de expansión es limitada sólo por la velocidad del sonido en el material cristalino (Phisik Instrumente, 1995).

Es necesario citar que los actuadores piezoeléctricos no son adecuados para soportar cargas fuera de centro ni esfuerzos de tracción. Muchos vienen equipados con resortes internos de precarga. Además, debe evitarse la aplicación de tensiones muy altas, si se llegara a aplicar una tensión reversa, por ejemplo, la que provoca una compresión superior al 20% del valor de la nominal, el elemento piezoeléctrico se despolarizaría irreversiblemente. Asimismo, la aplicación de esfuerzos muy altos crea canales de conducción eléctrica en la cerámica, lo cual provoca cortocircuitos en ésta, disminuye su resistencia y perjudica su expansión. Por otro parte, estos dispositivos son extremadamente sensibles a la variación de temperatura, por ejemplo en 4 K el 70% de la expansión nominal se pierde. (Pysik Instrumente, 1995).

5.2 Actuadores Magnetostrictivos.

El término Magnetostricción se refiere al fenómeno físico de variación dimensional que ocurre en materiales ferromagnéticos ante la presencia de un campo magnético impuesto, efecto Guillenen, así como al cambio en la magnetización del material ferromagnético cuando es sometido a esfuerzos mecánicos, efecto Villari. Este tipo de material es muy usado en los sensores debido a sus características de resolución y estabilidad, lo que hace posible alcanzar resoluciones inferiores al 1 µm (Machine Design, 1995). A pesar de que en el presente estudio el interés es la calificación de este tipo de material como parte de los actuadores, las características de los sensores proporcionan un buen parámetro de los resultados obtenidos con este tipo de actuadores.

Los *actuadores* magnetostrictivos se fabrican, básicamente, a partir de materiales de una

aleación ferrosa (Schafer y Janocha, 1995), como por ejemplo, la empresa Edge Tech., fabrica terfenol-D, un material comercial, con térbio, disprosio y hierro ($Tb_{0.3} Dy_{0.7} Fe_{1.35}$).

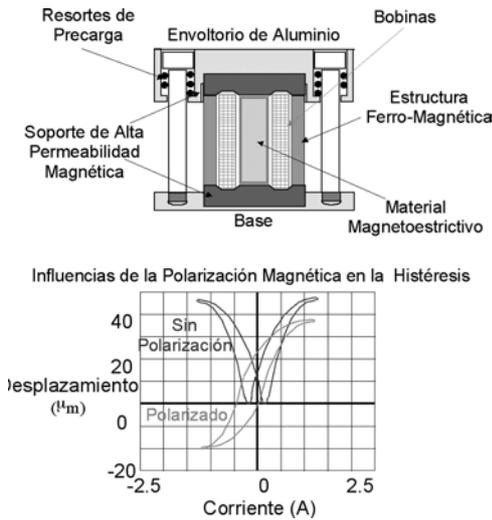


Figura 7. Configuración básica de un actuador magnetostrictivo y curvacaracterística (Edge Technologie, 1994).

Como se puede observar en la Figura 7, la presencia de la precarga actúa de forma tal que aumenta la capacidad de carga del material, y en campos magnéticos menores tiende a producir una respuesta más lineal. Además, por medio del montaje de imanes permanentes o por la inclusión de un componente DC en la corriente de la bobina, se provoca un desplazamiento del punto de operación, generando un semi-ciclo positivo de expansión y un semi-ciclo negativo de contracción del material. Entre las características más destacables de este tipo de actuador citamos las siguientes:

- Alta repetibilidad de expansión.
- Capacidad de fuerzas de alta magnitud.
- Amplio ancho de Banda.
- Alta tolerancia a variaciones ambientales, etc.

El elevado desempeño de este tipo de *actuador* hace que sea una excelente alternativa para los microposicionadores, controles de vibraciones, fuentes sísmicas, *shakers*, entre otros. Su alta velocidad de expansión o desplazamiento del orden de 1 m/s, posicionamientos incrementales reducidos obtenidos por el control de la corriente de la bobina, sumado a una mayor densidad de energía, lo hace competitivo, económicamente, con los de tipo piezoeléctrico y motores lineales tipo *voice-coil*, especialmente en frecuencias de 150 a 2000 Hz. La mayor desventaja de estos dispositivos, así como de los de tipo *voice-coil* es la generación de calor (Campos Rubio, 1996).

6. CONCLUSIONES

Para alcanzar los requerimientos mencionados anteriormente la siguiente generación de máquinas-herramienta de ultra precisión deberá poseer mejores características de exactitud y repetibilidad; además, un desempeño dinámico adecuado que haga posible la producción de piezas de alta complejidad; características metrológicas superiores en diversos materiales y en niveles de productividad comercial; la utilización de sistemas modulares de microposicionamiento que puedan ser acoplados en máquinas ya existentes y en máquinas nuevas como un ítem de escogencia opcional, se torna cada vez mas importante, tanto desde el punto de vista económico como tecnológico.

Cuando se requiere la transformación de una señal eléctrica en un movimiento traslativo en la banda de los micrómetros, con un ancho de banda de varios Khz. y una gran capacidad de carga del orden de los Kn., tanto los *actuadores* piezoeléctricos como los magnetostrictivos, *actuadores* de estado sólido, demostraron ser una excelente alternativa en el posicionamiento de herramientas en máquinas de precisión debido a su excelente precisión en el posicionamiento y la estabilidad. Asimismo, podemos afirmar que cuando se seleccione un tipo de estas tecnologías, la opción entre un tipo de *actuador* lineal y otro, factores tales como el curso máximo permitido, dinámica de

respuesta, facilidad de control y capacidad de carga, en orden de importancia, son variables que deben ser evaluadas cuidadosamente.

Para finalizar, estos estudios preliminares apuntan hacia la utilización de algoritmos de corrección productivos como una forma de mejorar el desempeño de máquinas en el mecanizado de ultra-precisión, donde la alternativa de utilización de técnicas basadas en el conocimiento y en el autoaprendizaje aparecen como soluciones viables y de resultados prometedores en áreas similares. El entrenamiento de una red neurona durante operaciones de mecanizado, bajo condiciones reales de trabajo para aprender el comportamiento del sistema y, posteriormente, emular su funcionamiento, anticipando la corrección de los desvíos y corrigiendo errores, será el próximo paso con el fin de alcanzar mejores resultados.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Campos Rubio, J. C., et al; *Comparison of control strategies for piezoelectric and magnetostrictive micropositioning devices for ultra-precision machining*. Proceeding ASPE, Monterrey (1996).
2. Campos Rubio, J. C., et al.; *Accionamiento directo de herramientas de corte en máquinas de ultra-precisión*. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Valdivia, Chile, p.263-266 (1996).
3. Dow, T., et al; *Application of fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces*, Precision Engineering, Vol. 13, N°4, p. 243-249 (1991).
4. Duduch, J. G; *Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials*. Thesis (Ph.D.). Cranfield Institute of Technology. England (1992).
5. Tavares, R.; *Proyecto de un posicionador sub-micrométrico para litografía óptica*. Disertación de Maestría. Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis (1995).
6. Edge Technologies, Inc., *Etrema Terfenol-D magnetostrictive actuators* (catalog), Iowa (1994).
7. Physik Instrumente; *Products for micropositioning* . (catalogue) (1992).
8. Schafer, J.; Janocha, H.; *Compensation of hysteresis in solid-state actuators*, Sensors and Actuators, la 49, 1995.
9. Slocum, A; *Precision Machine Desing*. Prentice-Hall (1992).
10. *Machine Desing Magazine; Basics of desing engineering - motion control/components*, Reference Volume, Peton Publishing (1995).
11. Nakazawa, H.; *Principles of Precision Engineering*. Oxford University Press, Oxford (1994).

SOBRE LOS AUTORES

Luis Arturo Rapso Brenes

Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica.
Universidad de Costa Rica.
Email: lrapso@cariari.ucr.ac.cr

Juan Carlos Campos Rubio

Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica.
Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
Email: juan@vesper.demec.ufmg.br

