

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL MECATRÓNICO DE ESTRUCTURA ABIERTA PARA UNA MÁQUINA-HERRAMIENTA

Antonio Cayetano Lozano García, Fco. Eugenio López Guerrero, José Ángel Castillo Castro,
Adán Ávila Cabrera, Jesús Herrera Bocanegra
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Pedro de Alba s/n, Apdo. Postal 9-"F", CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904.
Correo electrónico: aclozano@mail.uanl.mx

RESUMEN

La versatilidad de una máquina-herramienta está directamente influida por la construcción mecánica, la interacción usuario-máquina y su control. Los cuales se determinan solamente por el fabricante, haciéndolo imposible para el usuario lograr aplicaciones complejas que requieran algún tipo de funcionalidad adicional de la máquina [ARD00]. El presente trabajo presenta el diseño e implementación de un control de estructura abierta capaz de adaptarse a diferentes necesidades del usuario. La implementación tecnológica está basada en un sistema conformado por un micromódulo MEV912B32 de Motorola y una interfase de control propia basada en dispositivos de cambio de estado basados en frecuencias de operación. El desarrollo incluye la comprobación de las constantes del sistema para la implementación de un sistema de comandos que permiten la entrada de órdenes de diferentes dispositivos. Los resultados de las pruebas de posición, velocidad y desempeño indican que el control es lineal y permitieron conocer el rango de operación.

Palabras clave: Máquinas-herramienta, control de motor a pasos, estructura abierta, maquinado, microcontrolador.

ABSTRACT

The versatility of a machine-tool is directly influenced by the mechanical construction, the user-machine interaction and its control. These features are only determined by the fabricant making it impossible for the user to achieve complex applications that require some type of additional functionality from the machine. The present work presents the design and implementation of an open structure control able to adapt to different user needs. The technological implementation is based on a system conformed by a Motorola MEV912B32 Micromodule and an own control interface based on state changing devices based on operation frequencies. The development includes the verification of the system constants for the implementation of a command system that allows the entrance of commands from different devices. The position, velocity and performance test results indicate that the control is linear and allow knowing the operation range.

Keywords: Tool-machine, step motor control, open structure, machining, microcontroller.

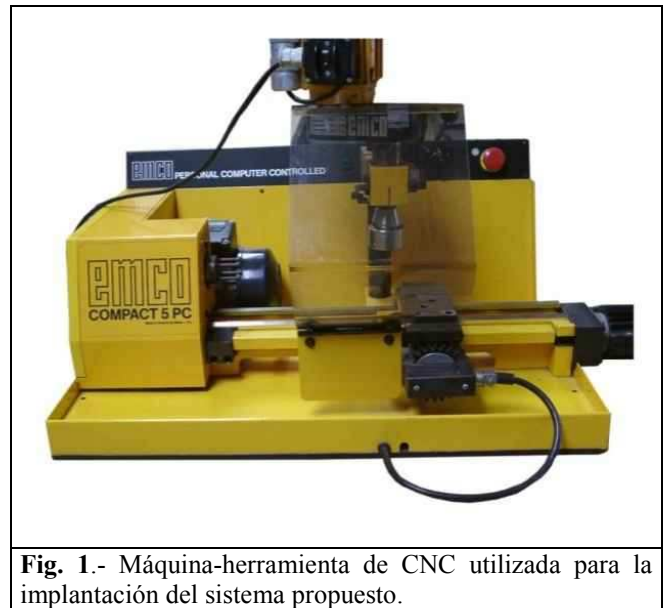


Fig. 1.- Máquina-herramienta de CNC utilizada para la implantación del sistema propuesto.

INTRODUCCIÓN

Los trenes productivos están inmersos en una competencia que toca tanto el ámbito nacional como el internacional. Adicionalmente al precio del producto, los criterios determinantes sobre los que se basa dicha competencia son la capacidad de reacción a los cambios del mercado [XUN06] y el tiempo de entrega. Producto de lo anterior, la industria busca multiplicar sus procesos y al mismo tiempo acortar la cadena de producción.

La calidad del maquinado de una máquina-herramienta está directamente influida por la construcción mecánica, la interacción y el control del motor de cada eje. Las características deseables son: buen desempeño (movimientos suaves y precisos emanados del control) y una estabilidad robusta (respuesta estable e independiente de perturbaciones) [RAM98].

Los avances tecnológicos en la electrónica hacen posible que hoy en día pueda integrarse en una sola unidad el sistema de control para los ejes de las máquinas-herramienta [PAP96].

La interacción del motor, el convertidor y los componentes de control pueden optimizarse como un todo. Tanto en los movimientos suaves y precisos como en la calidad de respuesta, el tipo de motor-convertidor juega un rol determinante [LEW99].

El presente proyecto desarrolla un sistema flexible de control de movimiento para expandir la funcionalidad de un torno marca EMCO modelo COMPACT 5 (figura 1) y operarlo en un espectro amplio de condiciones de operación independientemente de la plataforma tecnológica.

OBJETIVOS

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Diseñar un sistema de estructura abierta que pueda ser utilizado para enviar órdenes programadas de movimiento a los ejes de una máquina-herramienta [PAR03].
- Diseñar un sistema de control de movimiento para dichos ejes.
- Diseñar una interfase de comunicación entre el sistema de control y la máquina-herramienta.

1.-MARCO TEÓRICO

La calidad del proceso de maquinado es determinado principalmente por la interacción del motor, convertidor y control. Las siguientes características principales son por lo tanto deseables [PAP96]:

- Un movimiento extremadamente real y sin distorsión del sistema de movimiento.
- Una respuesta estable a las distorsiones, por lo que tenga la capacidad de compensar tan pronto como sea posible cualquier carga dinámica que ocurra durante el proceso de maquinado.
- La habilidad de seguir una interpolación con la menor distorsión posible.

EL CONCEPTO DE “ESTRUCTURA ABIERTA”

Una arquitectura abierta consta de cuando menos cuatro capas principales: capa de hardware, capa del sistema operativo, capa de comunicaciones internas y la capa de interfase de programación de aplicaciones [RAC98]. Ver figura 2

El control numérico propuesto tiene una arquitectura abierta modularizada con unidades funcionales, las cuales son programas de aplicación que realizan tareas específicas requeridas por el usuario o el proceso.

Con la introducción del concepto de unidades funcionales a través de la interfase de programación de aplicaciones se cumplen con los requerimientos de portabilidad, modularidad y escalabilidad.

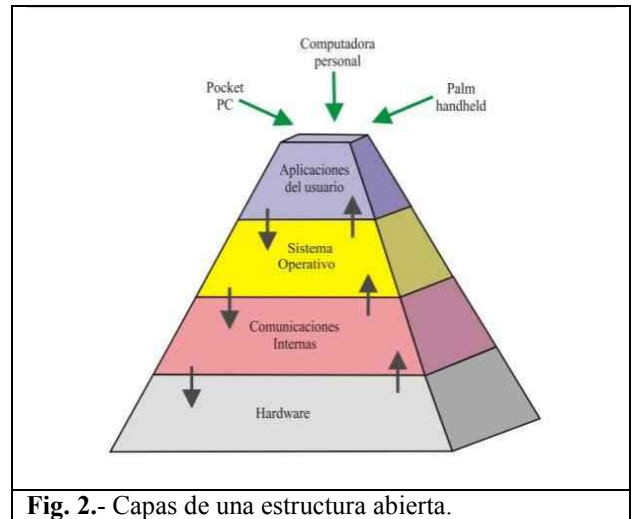


Fig. 2.- Capas de una estructura abierta.

El proyecto consta de las diferentes capas de la figura 2, lo que permite una versatilidad que incluye la posibilidad de integrar diferentes orígenes de comandos, permitiendo al usuario multiplicar procesos y disminuir el tiempo de programación.

La capa de programación de aplicaciones permite:

- La entrada de comandos con una computadora personal convencional, portátil, Palm o Pocket-PC, controladores lógicos programables o control de robots.
- Adaptar rutinas de ciclos de usuario propios.
- Posibilidad de programación CNC y DNC [XUN06].

La capa de comunicaciones internas permite la integración de sensores externos y dispositivos con mayor memoria para almacenar código de maquinado.

El sistema operativo permite funcionar de manera manual y automática, además de ser un control dinámico y automático para el proceso de maquinado, lo cual es deseable en experimentos de maquinabilidad.

La tarjeta de interfase del control tiene capacidades para conectar los ejes en cascada, así como poder funcionar con encoders o sin ellos [SHI03]. En la figura 3 se muestra el concepto en el cual se basó la construcción del flujo de información entre los procesos de las capas.

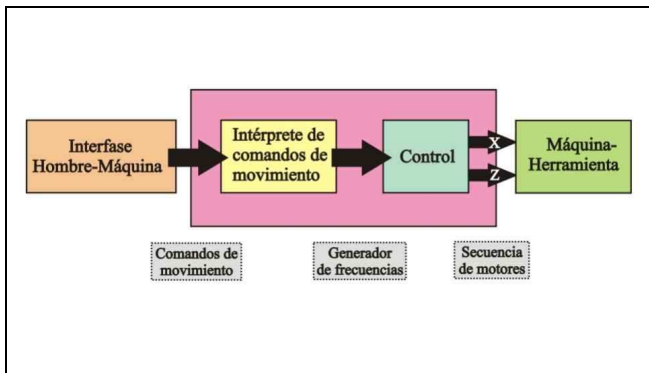


Fig. 3.- Flujo de información entre los procesos que conforman la estructura abierta.

La versatilidad que representa el desarrollo confiable de una estructura abierta modular, permite conformar un centro de maquinado que pueda ser auxiliado con diferentes interfases hombre-máquina, pero al mismo tiempo lograr el control sobre una extensa gama de máquinas-herramienta [WAN04, FER07]; esto permitirá al usuario multiplicar sus procesos y disminuir el tiempo en la cadena productiva industrial.

2.-IMPLEMENTACIÓN

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS

El torno empleado está equipado con un Motor Principal DC de 90 voltios, 700W, de alto torque, con frecuencia constante de 50 ó 60Hz, a torque constante. Su construcción está basada en el sistema MKS. La bancada es de acero y tiene una longitud de 480mm y 330mm efectivos de trabajo entre puntos. La base del carro transversal (eje X) es de acero y tiene dimensiones de 65mm de ancho por 163mm de largo. La velocidad de la mordaza es de 740rpm.

Con este torno se pueden fabricar piezas de diámetro máximo de 100mm sobre el carro transversal, la longitud máxima permitida 300mm. El funcionamiento del torno era nulo debido a una falla irreversible en las tarjetas electrónicas y la falta de disponibilidad de reemplazos.

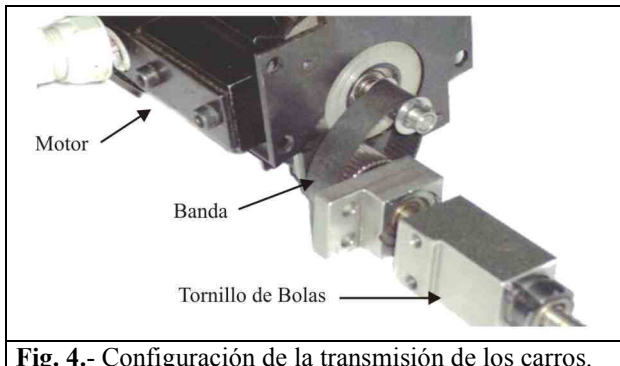


Fig. 4.- Configuración de la transmisión de los carros.

Se utiliza la transmisión por banda para la reducción de velocidad. La transmisión utilizada en el movimiento de los carros es por medio de una banda dentada. La polea menor esta conectada a un motor a pasos unipolar [MAT03], mientras que la polea mayor está conectada a la flecha del tornillo de bolas (figura 4).

En la tabla I se muestran las especificaciones técnicas de la transmisión por banda.

Tabla I.- Especificaciones técnicas de la transmisión por banda.	
Número de dientes de polea menor	16
Número de dientes de polea mayor	40
Distancia entre centros	30.98mm
Longitud de la banda	119.38mm
Ancho de la banda	12.7mm

Los tornillos de bolas utilizados en el movimiento de los dos carros son de cuerda simple y las especificaciones técnicas se muestran en la tabla II.

Tabla II.- Datos técnicos de los tornillos de bolas de los carros longitudinal y transversal.		
	Carro transversal (Eje X)	Carro longitudinal (Eje Z)
Diámetro	7.71mm	7.71mm
Hilos por centímetro	4	4
Avance	2.5mm	2.5mm
Longitud	145mm	465mm

CONSTANTE MECÁNICA DEL SISTEMA (Ks)

$$K_s = (K_M)(K_B)(K_T) \quad (1)$$

En donde:

$$K_M = 72 \text{ pulsos del GAL (constante del motor)}$$

$$K_B = 0.4 \text{ (constante de la banda)}$$

$$K_T = 2.5 \text{ mm (constante del tornillo de bolas)}$$

$$K_s = 72$$

Para determinar el rango de operación de los motores, se conectó una fuente generadora de señales a la tarjeta controladora. Se operó el motor en vacío y se midió la velocidad utilizando un tacómetro digital. En la figura 5 se

muestra el método, y en la tabla III los valores de frecuencia para el rango de velocidades de operación.

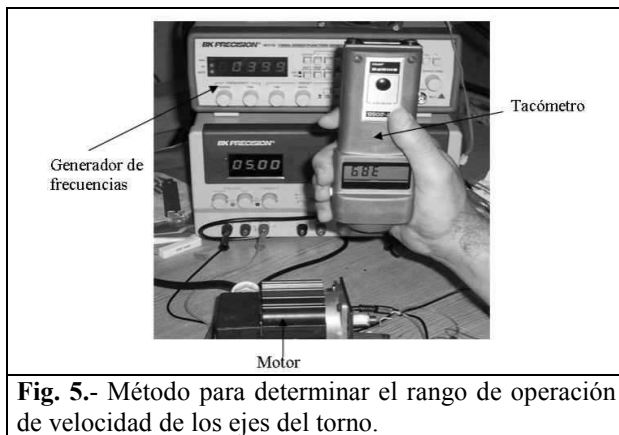


Fig. 5.- Método para determinar el rango de operación de velocidad de los ejes del torno.

Tabla III.- Valores obtenidos de las pruebas de velocidad.

F (Hz)	rpm
50	41.66
100	83.33
200	166.66
300	250
400	333.33
500	416.66

CONTROL DE LOS MOTORES DE LA MÁQUINA-HERRAMIENTA

Aquí se plantea la solución al problema original y se termina con un circuito digital que realiza la función deseada. El primer paso consiste en realizar un planteamiento estructural del circuito que proporciona la solución. El segundo paso consiste en realizar la descripción VHDL de la estructura propuesta para la solución del problema y se procede a la simulación lógica.

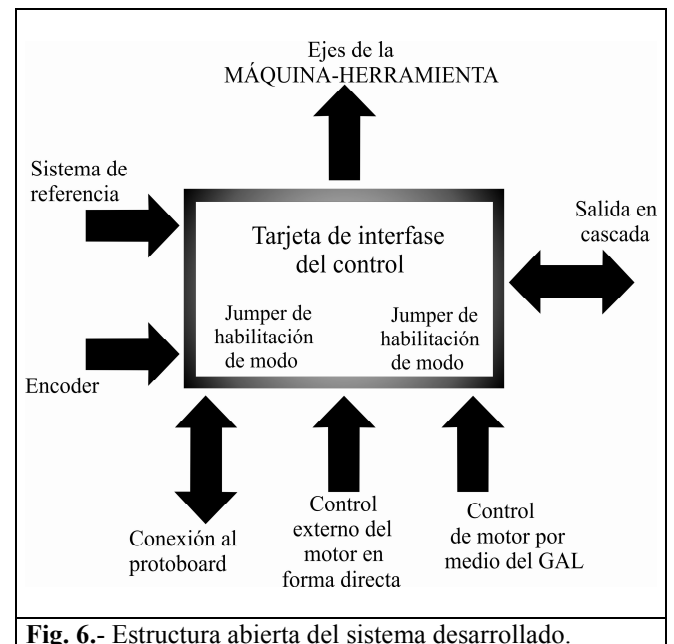


Fig. 6.- Estructura abierta del sistema desarrollado.

Para ejecutar el movimiento de los ejes del torno, se acopló a cada eje un motor a pasos unipolar. La base del sistema de control es la tarjeta que se desarrolla (figura 6).

Por cada pulso inducido el motor efectúa un desplazamiento angular de 5° para pasos completos y para medios pasos 2.5° por cada pulso.

El número requerido fue de 72 pulsos por cada revolución del motor para pasos completos y para medios pasos fue de 144 pulsos. En base al número de pulsos por revolución se controla el ángulo de giro del motor a pasos.

Tomando en cuenta estos datos y con la relación de velocidades de la transmisión se determinó que para una revolución del motor a pasos el avance de los carros es de 1mm.

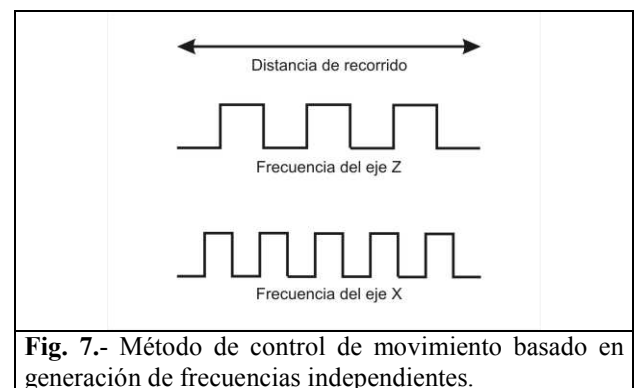


Fig. 7.- Método de control de movimiento basado en generación de frecuencias independientes.

El algoritmo de generación de frecuencias se basa en la programación del puerto T del microcontrolador HC12. Es necesario que este algoritmo tenga un comportamiento lineal.

Se encontraron las frecuencias de trabajo conforme al método que se muestra en la figura 7. El rango de operación encontrado fue de 50Hz a 500Hz para ambos ejes.

DIAGRAMA DEL PROGRAMA DE CONTROL

En la figura 8 se muestra el diagrama del algoritmo de control utilizado para generar las frecuencias de trabajo en el puerto T del microcontrolador HC12.

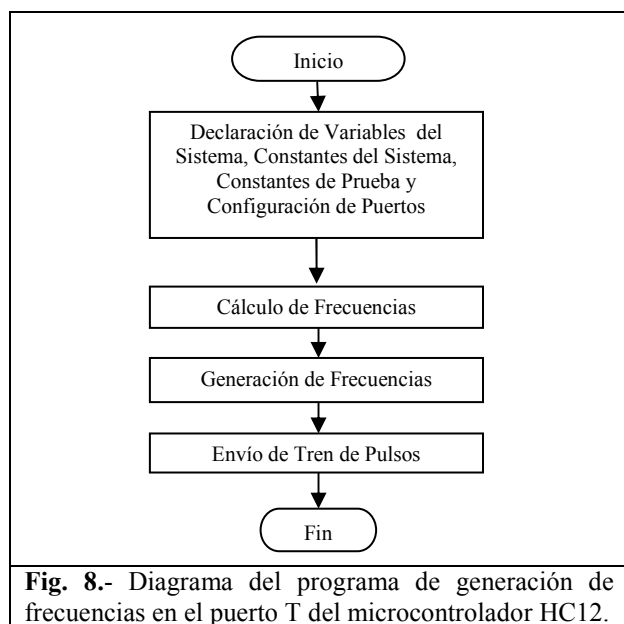


Fig. 8.- Diagrama del programa de generación de frecuencias en el puerto T del microcontrolador HC12.

3.- EXPERIMENTACIÓN

Para probar la respuesta del sistema, fue necesario comprobar que el algoritmo tuviese un comportamiento lineal con respecto a la velocidad programada de cada eje (figura 9). Para lograrlo, se midió la velocidad colocando un medidor de carátula sobre el eje; se envió un comando de movimiento programado y se filmó el desplazamiento de la aguja del reloj (figura 10). La tabla IV muestra el diseño del experimento utilizado.

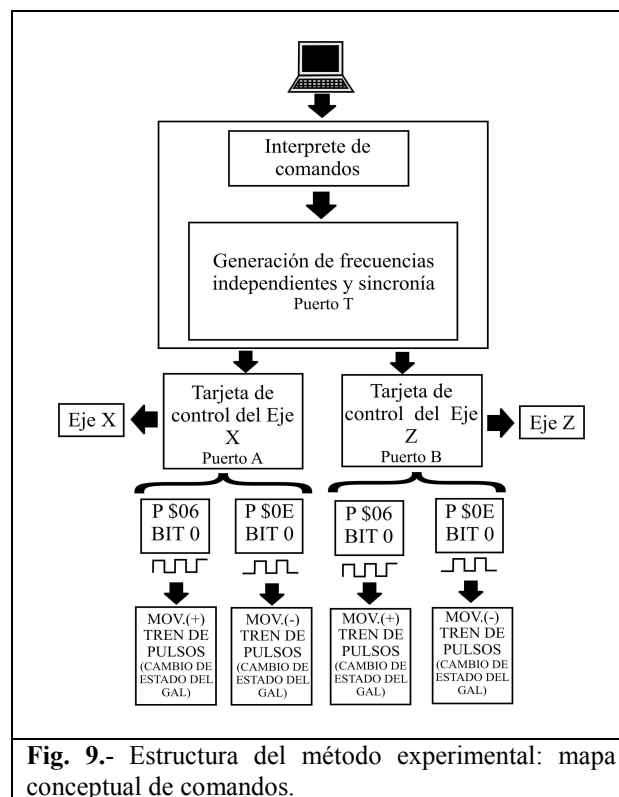


Fig. 9.- Estructura del método experimental: mapa conceptual de comandos.

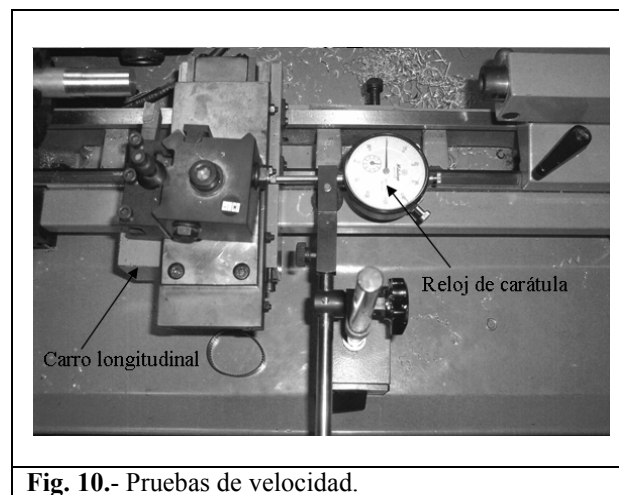


Fig. 10.- Pruebas de velocidad.

Tabla IV.- Experimentación para encontrar los valores de frecuencia generada por el algoritmo.			
Exp. Núm.	Valor programado (Shex)	Frec. de oscilación para el eje X (Hz)	Frec. De oscilación para el eje Z (Hz)
1	10	69.4	46.3
2	15	104.2	69.4
3	20	138.9	92.6
4	25	174.8	116
5	30	208.3	139
6	35	245	163
7	40	277.8	185
8	45	312	208
9	50	357	233
10	55	384	257
11	60	416.5	277
12	65	454.5	301
13	70	500	333
14	75	520	357
15	80	555	373
16	85	624	400
17	90	625	416
18	95	675	454

4.-RESULTADOS

Pruebas de Velocidad
Pruebas Mecánicas

Sea $m11(a)$ la pendiente de la figura 11(a) y $m12(a)$ la pendiente de la figura 12(a). La relación

$$\frac{m11a}{m12a} \cong \text{constante mecánica del eje X}$$

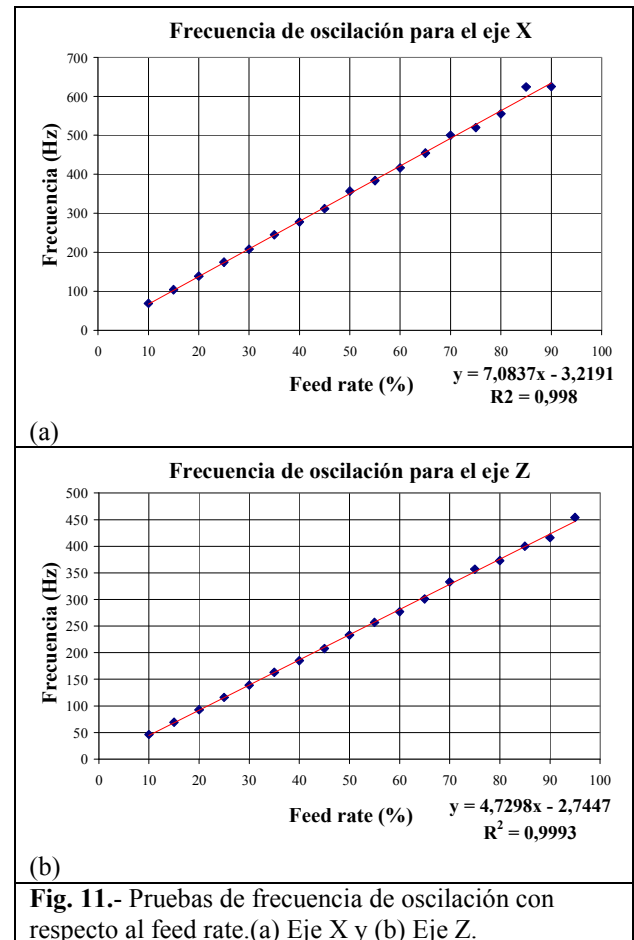
$$7.0837/0.0986 = \mathbf{71.8427992 \text{ ciclos/mm}}$$

Así como

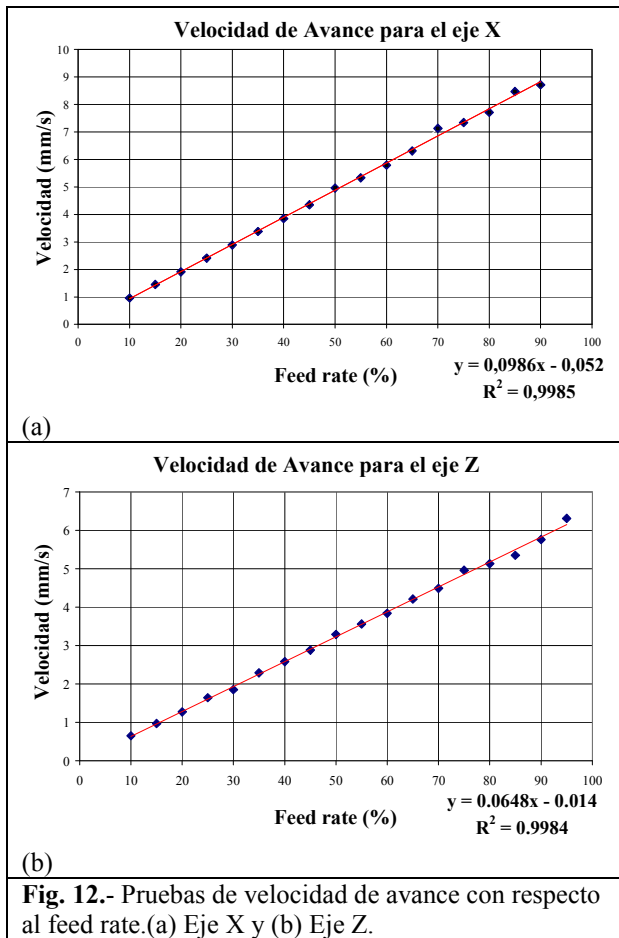
$$\frac{m11b}{m12b} \cong \text{constante mecánica del eje Z}$$

$$4.7298/0.0648 = \mathbf{72.9907407 \text{ ciclos/mm}}$$

Lo cual demuestra que todos los componentes del sistema observan un comportamiento lineal y que la relación de transformación del algoritmo contra la velocidad de avance es numéricamente bastante aproximada a la constante mecánica del sistema.

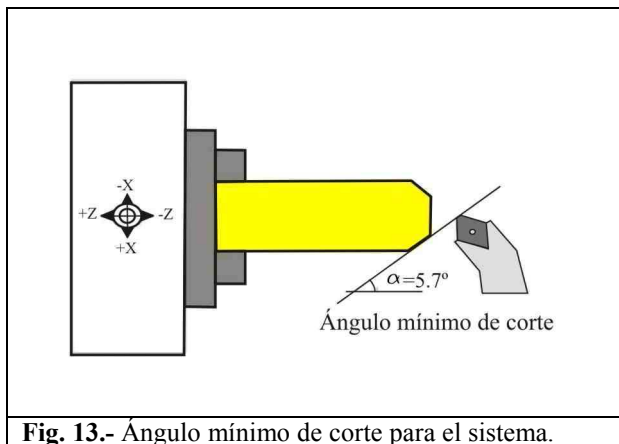


Para la medición de la velocidad en mm/s se tomaron cinco muestras de posición-tiempo para cada frecuencia de oscilación, y se calculó el promedio de ellas.



La relación de frecuencias (50-500Hz) de operación de los motores determina la pendiente mínima del ángulo de corte. Ver figura 13.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\text{Frec min (50 Hz)}}{\text{Frec max (500 Hz)}} = 5.7^\circ$$



5.-CONCLUSIONES

Con el control de la velocidad por medio de la frecuencia es posible tener un control preciso de los movimientos de los carros longitudinal y transversal.

Por medio del microcontrolador HC12 se puede controlar la velocidad de avance de los carros mediante las frecuencias inducidas.

La respuesta óptima a las distorsiones se logra también mediante la interacción del motor y el convertidor.

La habilidad de seguir una interpolación con la menor distorsión posible es proporcionada por la combinación convertidor/control numérico. En el lado del convertidor la acción correctiva y las características de sincronización pueden ser ejecutadas por el control central de movimiento, mientras que el control posterior asegura que la interpolación es alcanzada.

6.-PROPUESTA DE MEJORA

Este reporte abarca un gran porcentaje de los avances del proyecto; sin embargo, los objetivos aquí presentados fueron adaptados a las condiciones de tiempo marcadas para el desarrollo del proyecto; la operación de la máquina funciona adecuadamente bajo condiciones de laboratorio, lo cual implica escasa robustez en su manejo y condiciones de operación que no deslindan al usuario de cálculos. Los siguientes puntos son una lista de las propuestas de continuación para que el sistema sea operable de manera convencional.

- Desarrollar un algoritmo para la interpolación de trayectorias circulares.
- Desarrollar un sistema de control para 3 ejes [SAR00, SHI03].
- Desarrollar el sistema de referencia para cada uno de los ejes.
- Desarrollar una interfase Hombre-Máquina basada en una PC para enviar comandos al CNC.

7.-AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo se han presentado los resultados preliminares de una propuesta de proyecto UANL-PAICyT 2007. Fue realizado en el marco de la línea de generación a la aplicación del conocimiento "Máquinas Inteligentes" en las instalaciones de los departamentos de Mecatrónica y Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, con el apoyo financiero de la UANL.

Los autores agradecen especialmente a la empresa CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DE MONTERREY S.A.

DE C.V. por la impresión de las tarjetas de control del sistema.

Y de igual forma a los estudiantes de la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones Oscar Lozano, Cynthia Guardado y Perla Saldivar así como al estudiante Alberto Sánchez de la carrera de Ingeniero en Electrónica y Automatización por su colaboración en el proyecto.

8.-REFERENCIAS

[ARD00] Arda N., Atlintas Y., Mabo R. “*Open System Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control*” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No. 3, September 2000.

[FER07] Ferrolho A., Crisóstomo M. “*Intelligent Control And Integration Software for Flexible Manufacturing Cells*” IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 3, No.1, February 2007

[LEW99] Lewis F.L., Kam W., Wang L., Li X. “*Deadzone Compensation in Motion Control Systems Using Adaptive Fuzzy Logic Control*” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 6, November 1999.

[MAT03] Mateos J., González E., Máquez L., Godinez D. “*Arreglos Lógicos Genéricos (GAL'S) y Motores a Pasos Aplicados al Control de un Trazador XYZ*” SIE, 2003.

[PAP96] Papiernick W. Siemens AG Erlangen “*Architecture and Design of Modern CNC/Drive Systems*” Article of Intelligent Motion, May 1996. The NURBS Book. Springer Verlag, 1997.

[PAR03] Park E., Hyuk L., Choi C. “*Position Control of X-Y Table at Velocity Reversal Using Presliding Friction Characteristics*” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, No.1, January 2003.

[RAC98] Ramírez C., M. de Jesus. “*Desarrollo de un Control Numérico Universal de Bajo Costo Basado en Software y Sistemas Abiertos*” Tesis de Maestría, ITESM Campus Monterrey, Diciembre 1998

[RAM98] Ramachandran V. “*Evaluation of Performance Criteria of CNC Machine Tool Drive System*” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No.3, June 1998.

[SAR00] Sarma R. “*Discretizers and Interpolators for Five-Axis CNC Machines*”. Transactions of the ASME, Vol. 122, February, 2000.

[SHI03] Shiuh S., Lo P. “*Analysis and Design of Integrated Control for Multi-axis Motion Systems*” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 11, No. 3, May 2003.

[WAN04] L. Wang “*Open Architecture-Based Factory Automation Systems*” IEEE AESS Systems Magazine, February 2004.

[WOK00] Wook J., Youl Y. “*A Generalized Approach for the Acceleration and Deceleration of Industrial Robots and CNC Machine Tools*” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No.1, February 2000.

[XUN06] Xun W., Wang, L., Rong Y. “*STEP-NC and Function Blocks for Interoperable Manufacturing*” IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 3, No.3, July 2006

9.-AUTORES

Lozano Garcia Antonio Cayetano M.C.

Ingeniero Mecánico Electricista de la UANL obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Telecomunicaciones en la misma Universidad. Profesor de tiempo completo en el Departamento de Electrónica y Comunicaciones. Miembro del comité técnico de la carrera de Ingeniero en Mecatrónica. Jefe de los laboratorios de Mecatrónica de la misma institución. Encargado del diseño y fabricación de proyectos realizados por ésta institución así como la supervisión del personal que realiza su servicio social en el departamento de ingeniería en detalle. De igual forma responsable de la preparación el personal que semestre a semestre se integra al departamento antes mencionado.

López Guerrero, Francisco Eugenio, Dr.

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas en la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Doctor en Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Castillo Castro José Ángel M.C.

Egresado de la carrera de Ingeniero en Control y Computación, FIME, UANL. También obtuvo la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica en la misma institución. Es profesor de tiempo completo de la UANL e imparte los cursos de Microprocesadores, Diseño Digital y Teoría Electromagnética. Actualmente es Jefe de la Academia de Máquinas Inteligentes de la carrera Ingeniería en Mecatrónica y colabora como profesor investigador en el laboratorio de Mecatrónica de la División de Mecánica de la FIME, UANL.

Ávila Cabrera Adán M.C.

Ingeniero Mecánico de la UANL obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Producción y Calidad en la misma Universidad. Profesor de tiempo completo y Tutor en el Departamento de Ciencias Básicas. Participante en el comité curricular en la creación del Plan de Estudios de Ingeniero en Mecatrónica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Participante en la elaboración de reactivos del

examen general para el egreso de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica (CENEVAL). Participante en la elaboración de la creación de la currícula y prácticas de laboratorio de la asignatura de química general en la FIME. Perfil PROMEP por la Subsecretaría de Educación Superior.

Herrera Bocanegra Jesús M.C.

Ingeniero Mecánico Administrador de la UANL obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales en la misma Universidad. Profesor de tiempo completo en el departamento de Ingeniería de Materiales.