
TORNO CNC DE USO DIDÁCTICO: PROTOTIPO MECATRÓNICO UCCNC01

DIDACTIC USE'S CNC WINCH:
MECHATRONIC PROTOTYPE UCCNC01

Recibido: 15 de mayo del 2010

Aprobado: 20 de julio del 2010

HOWEIMER A. PEÑA*
JUAN C. MARTÍNEZ**
JOSÉ L. RAMÍREZ***
FAIVER H. TRUJILLO****

Resumen

El torno CNC para uso didáctico es un prototipo mecatrónico concebido por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Bogotá. El proceso tecnológico contempló las siguientes actividades: análisis funcional, modelación cinemática y dinámica, diseño mecánico y fabricación del prototipo. Se desarrollaron tanto los sistemas de sensores, actuadores, control y comunicaciones, como la interfaz para los procesos de mecanización de piezas asistida por computador. El presente artículo explica la metodología que se utilizó para la elaboración del torno didáctico y comenta cómo se logró minimizar los tiempos y costos asociados al diseño y construcción del prototipo. Por último, se presenta la contribución de diversas técnicas y tecnologías de ingeniería, y el proceso de integración de los subsistemas implementados.

Palabras clave: control de posición, desarrollo mecatrónico, diseño electrónico, diseño industrial, sistema de control.

Abstract

CNC winch for didactic use is a mechatronic prototype conceived by the Engineering Faculty at "La Universidad Cooperativa de Colombia", Bogotá's Campus. The technological process included the following activities: functional analysis, cinematic and dynamic modeling, mechanical design and prototype manufacturing. The sensors, actuators, control and communications systems were also developed, as well as the interface for the processes of pieces' mechanization assisted by computer. The present article explains the methodology used for the making of the didactic winch, and comments how times' and costs' minimization associated with the design and construction of the prototype were achieved. Finally, we present the contribution of diverse skills and engineering technologies, as well as the integration process of subsystems implemented.

Keywords: position's control, mechatronic development, electronic design, industrial design, control system.

• Como citar este artículo: Martínez, J. C. et ál. (2010), "Torno CNC de uso didáctico: prototipo mecatrónico UCCNC01", en *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 6, núm. 10, pp. 8-18.

* Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones, docente Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Bogotá. Correo electrónico: howeimer@correoucc.edu.co

** Ingeniero Electrónico, docente Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Bogotá. Correo electrónico: juancarlosmartinezq@correoucc.edu.co

*** Ingeniero Mecatrónico, docente Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Bogotá. Correo electrónico: joslurar@correoucc.edu.co

**** Ingeniero Electrónico, docente Universidad Cooperativa de Colombia, seccional Bogotá. Correo electrónico: faiverht@correoucc.edu.co

Introducción

El diseño y construcción de máquinas automáticas es un proceso de desarrollo tecnológico que integra la ingeniería mecánica, electrónica y de sistemas e involucra diversas técnicas, herramientas y metodologías en cada una de las áreas mencionadas.

Una máquina, en términos generales —herramienta para torneear materiales automáticamente con una función claramente didáctica—, se ubica en la más moderna categoría dentro de la siguiente clasificación: torno de engranajes, torno revolver y torno automático CNC (Krar y Check, 2002, p. 335).

El diseño y la construcción de herramientas CNC han ocupado diversos espacios de investigación y desarrollo tecnológico. Algunos de los referentes más importantes que anteceden el progreso del presente proyecto son:

- La arquitectura de hardware/software (Cuenca, et ál., 2007, pp. 96-97) para la generación computacional de trayectorias de la herramienta en procesos de mecanizado asistido por computador presenta una aplicación para un torno mecanizado que incorpora un desarrollo basado en FPGAs de acuerdo con el algoritmo “Digitalización Virtual”.
- Se han desarrollado dispositivos reconfigurables para aplicar los algoritmos en control numérico por computadora (CNC). Estos ofrecen un rendimiento alto de ejecución de la programación CNC y la flexibilidad para el diseño del sistema. Este antecedente se centra en un nuevo algoritmo propuesto de remuestreo para el movimiento sincronizado en el roscado y una lógica reconfigurable en un torno CNC (Dong et ál., 2009, p. 2835).
- Otro elemento importante a ser automatizado es el seguimiento del desgaste de herramientas de corte en tornos CNC. Un antecedente corresponde a una solución con Redes Neuronales Artificiales (Sick, 1997, p. 3381), la cual propone un método para estimar dos parámetros para que esto ocurra. Plantea también un sistema automático en el cual los parámetros de entrada de las redes son aquellos específicos del proceso (como la velocidad o la profundidad de corte) y coeficientes característicos extraídos de las señales de medida con un sistema de sensores múltiples en el porta-herramientas.

- Un paquete de software abierto para el mecanizado de CNC ha sido desarrollado (Liu et al., 2009, p. 225) para un movimiento de 3 y 5 ejes. La experiencia permitió demostrar que los controladores construidos pueden ser utilizados para controlar el movimiento de las herramientas CNC con un buen rendimiento de procesamiento.
- En un sistema convencional de CNC, las comunicaciones entre el controlador de movimiento y el conductor servo analógico suelen ser de manera unidireccional, es decir, desde el controlador hacia el conductor. En el desarrollo propuesto por Dong (2006), tomado como antecedente (Dong et al., 2009, pp. 303), el sistema tradicional CNC ha sido rediseñado de acuerdo con la tecnología de componentes. Tras el análisis de la arquitectura de un CNC tradicional y las características de un bus de campo, el modelo de componentes ha sido aplicado para el controlador de movimiento y el conductor.
- Se planteó una particular e interesante metodología de construcción de controladores CNC (Moreaux y Decotignie, 1991, pp. 924-927), rompiendo con el esquema de los tres componentes definidos convencionalmente: un controlador lógico programable (PLC), un director de CNC (ECNT), y una entidad compuesta que contiene los controladores de ejes de CNC (la entidad ejes). La comparación de la arquitectura propuesta con una arquitectura PLC tradicional nos llevó a concluir que la CNC no es más que un PLC evolucionado.

Cada una de las experiencias anteriormente mencionadas explica un proceso de diseño, construcción o implementación de un componente del torno CNC y proporciona guías para la toma de decisiones respecto a qué tecnología incorporar en el proceso de diseño.

Metodología

La metodología utilizada en el desarrollo del proyecto corresponde a la propuesta hecha por el Grupo de Investigación en Automatización Industrial de la Universidad Cooperativa de Colombia (GIAI UCC) para desarrollos mecatrónicos. Usa como referentes la electrónica control digital, los sensores y la tec-

nología de la información, elementos propuestos por Godfrey Onwubolu (2005, pp. 3-5). Además, el grupo considera como componente crítico la ergonomía y seguridad industrial del sistema.

Tales elementos se integran siguiendo las fases de diseño descritas por Bolton (2006, pp. 502-503): la necesidad de un estudio de requerimientos, diseño y construcción de un torno CNC de uso didáctico; el análisis del problema, la identificación de limitaciones del medio y el estudio funcional de la máquina requerida; la preparación de una especificación, respecto al nivel de automatización del torno; la propuesta de soluciones posibles, la selección de una adecuada, la producción de un diseño detallado y la elaboración de dibujos de trabajo. La metodología aplicada es la que se observa en la figura 1.

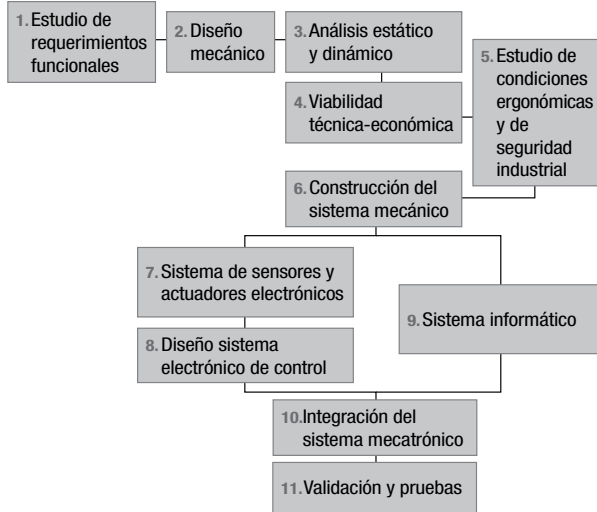


Figura 1. Metodología de diseño mecatrónico

Fuente: GIAI UCC

La anterior metodología se desarrolló así:

Estudio de requerimientos

El proceso de torneado compromete tres movimientos básicos: 1) movimiento rotativo que se ejerce sobre el material a ser torneado. Debido al carácter didáctico de la herramienta a construir, el rango de operación oscila entre los 200 y 4000 RPM, garantizando además un torque suficiente para el giro con carga; 2) un movimiento de profundidad, mediante el cual la herramienta de corte o buril penetra el material a deformar, manejando altos niveles de precisión; 3) un movimiento de avance paralelo al

material de trabajo. En la figura 2 se muestran los movimientos requeridos para el sistema dinámico.

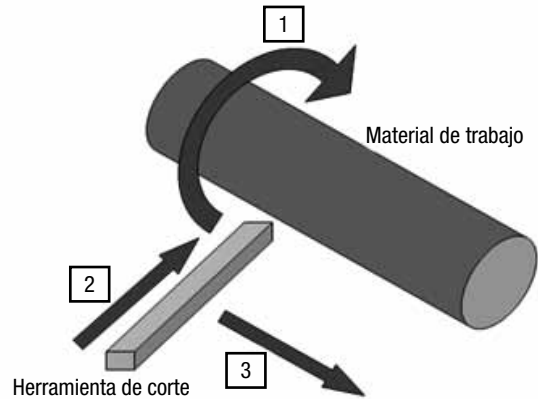


Figura 2. Movimientos en el proceso de torneado

Fuente: GIAI UCC

Diseño mecánico

La etapa de diseño mecánico contempla el desarrollo de bocetos, diseños y modelos que cumplan con los requisitos funcionales definidos hasta el momento en el estudio de requerimientos.

Análisis dinámico y estático

La estructura del torno se diseñó buscando que soporte de manera segura los componentes electromecánicos del torno CNC. Para garantizar esto, se optó por diseñar una estructura que pueda aguantar un máximo de 20Kpa de presión. El diseño se probará simulándolo con el método de los elementos finitos, que consiste en subdividir un objeto en fragmentos o elementos finitos que serán analizados de modo independiente. Posteriormente, el conjunto de resultados obtenidos de cada elemento será el resultado del comportamiento del objeto probado. Este tipo de estudio se aplica al análisis superficial y estructural; en el caso del torno, al tratarse de una estructura, utilizaremos la herramienta de software llamada Ansys 12 Classic, la cual nos permitirá llevar a cabo la simulación.

La estructura del torno que se observa en la figura 3 fue diseñada utilizando acero galvanizado con las siguientes características:

- Módulo de Young (E) $E = 21 * 10^9 Pa$
- Módulo de Poisson $\nu = 0,35$

Para la simulación del comportamiento estático de la estructura, se ingresaron al programa mencionado las características mecánicas del material con el que se construyó. De igual forma, se definió el tipo de elemento finito que se usaría, lo cual es de alta relevancia ya que depende del objeto a observar; por ejemplo, para analizar una superficie, se debería estudiar un elemento superficial como un cuadrado, un rectángulo o un polígono. En este caso, al tratarse de una estructura sólida, se selecciona como elemento finito un tetraedro de 10 nodos o vértices que tendrá noventa grados de libertad, permitiendo calcular así las deformaciones y esfuerzos que se presenten en la estructura. En conclusión, dividiremos el objeto en pequeños tetraedros, como se puede apreciar en la figura 3.

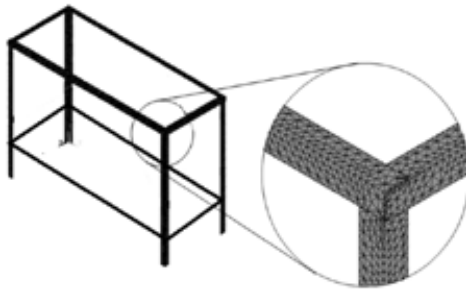


Figura 3. Detalle de enmallado de estructura

Fuente: Ansys 12 Classic

Posterior al enmallado, se procede a definir las condiciones de frontera o de carga. Los paralelos verticales de la estructura no pueden moverse en sus bases, por lo cual se define un anclaje sobre éstas. Además, sobre la parte superior se aplica una carga de 2Kpa de acuerdo con lo que se definió previamente. En la figura 4 se observan las condiciones de frontera definidas.



Figura 4. Condiciones de frontera

Fuente: Ansys 12 Classic

En las figuras 5 y 6 se pueden observar los resultados de la simulación. Después de configurar el software Ansys para que entregue los resultados de la deformación y el esfuerzo de Von-Mises, concluye que la deformación máxima será de 0,41534 mm y el esfuerzo máximo presente de 0,729E8 Pa. Ambos valores se encuentran dentro del comportamiento elástico del material, ya que el módulo de elasticidad es superior al esfuerzo máximo aplicado, por lo que se puede concluir que la estructura soportará apropiadamente la carga estática del torno CNC.

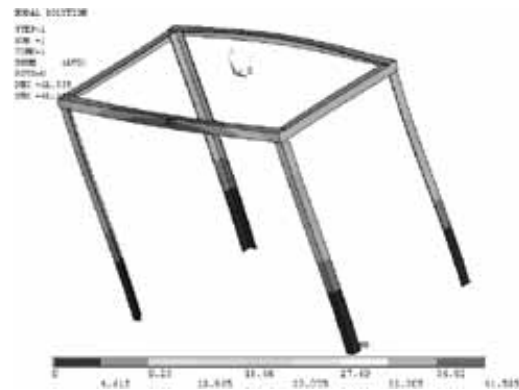


Figura 5. Resultado deformación

Fuente: Ansys 12 Classic



Figura 6. Resultado esfuerzo de Von Mises

Fuente: Ansys 12 Classic

El análisis dinámico se aplica independientemente de cada uno de los actuadores, asumiendo cada uno como el conjunto del motor y la transmisión. De esta manera, se logra caracterizar los 3 grados de libertad que posee el torno y se entregarán como resultado las funciones de transferencia en el dominio de Z de posición, velocidad y aceleración.

Para este análisis, se toman muestras de la velocidad en función del tiempo. Inicialmente se pensó en utilizar el algoritmo de interpolación de Lagrange para calcular un polinomio que siguiera el comportamiento del motor, pero se observó que no era conveniente porque el orden de éste dependía del número de muestras, y se requerían mínimo 25, lo que causaría un polinomio de orden 25 que sería muy difícil de aproximar.

Por lo anteriormente citado, y después de analizar el comportamiento de los actuadores, se optó por aproximar la función de transferencia de cada uno de los sistemas a una función de orden 1 que marcaría el comportamiento de la velocidad. Dicha función se integra para aproximar la de la posición y se derivará para aproximar el comportamiento de la aceleración.

Para aproximar a una función de orden 1 se aplica una transformada de Laplace a la función que más se asemeja al comportamiento de la velocidad de los actuadores, es decir un exponencial, y en el dominio de s se escribiría así:

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} = Gv(s) \quad (1)$$

k es la velocidad máxima que alcanzará el motor. τ es la constante de tiempo en la que el motor alcanza el 63,2% de la velocidad máxima aproximadamente.

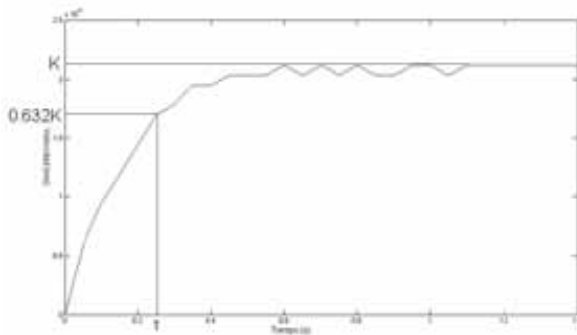


Figura 7. Explicación gráfica de la obtención de valores para la función de transferencia en el dominio de s

Fuente: Ansys 12 Classic

Teniendo la función de transferencia en el dominio de s , se procede a multiplicar por s para derivar la función y obtener la aceleración; se multiplica por $1/s$ para integrar y poder calcular la función de posición.

$$\frac{a(s)}{u(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} s = \frac{ks}{\tau s + 1} = Ga(s) \text{ aceleración} \quad (2)$$

$$\frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \frac{1}{s} = \frac{k}{\tau s^2 + s} = Gp(s) \text{ posición} \quad (3)$$

Las funciones de transferencia calculadas representan el comportamiento continuo de la velocidad, posición y aceleración. Sin embargo, teniendo en cuenta que el diseño electrónico se implementará digitalmente, se expresan las funciones de transferencia en el dominio de Z ; en otras palabras, se representan las funciones de manera discreta, para lo que se usó el método ZOH (Zero Order Hold).

Para expresar el sistema en su representación discreta, se multiplica la función de transferencia por un escalón muestreado en tiempos T que representa el periodo de muestreo; a esta función se le calcula la transformada inversa de Laplace y al resultado se le aplica la transformada Z . Este resultado será la representación discreta de las funciones de transferencia.

$$G(z) = Z \left(\zeta^{-1} \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot G(s) \right]_{t=nT} \right) \quad (4)$$

$$Gx(z) = Z \left(\zeta^{-1} \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{k}{\tau s^2 + s} \right]_{t=nT} \right) \quad (5)$$

$$Gv(z) = Z \left(\zeta^{-1} \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{k}{\tau s + 1} \right]_{t=nT} \right) \quad (6)$$

$$Ga(z) = Z \left(\zeta^{-1} \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{ks}{\tau s + 1} \right]_{t=nT} \right) \quad (7)$$

Como consideración final para la caracterización de los actuadores, se debe tener en cuenta que al discretizar el sistema se debe seleccionar una frecuencia de muestreo de tal forma que no se pierda información durante la caracterización. Dicha pérdida se debe normalmente al efecto *aliasing*, y para evitarlo se utilizará el teorema de Nyquist-Shanon.

De manera más detallada, se puede decir que la pérdida de información se debe a que no se selecciona una frecuencia de muestreo correcta, por lo que la reconstrucción de la señal no será adecuada. En la figura 8 se puede observar una función seno

descrita por la línea continua, y un muestreo señalado por los puntos. Se ve entonces que la señal reconstruida en línea discontinua no corresponde a la señal original. Para evitar esto, el teorema de Nyquist-Shanon indica que:

$$f_s = 2 * f \tag{8}$$

$$\frac{1}{T_s} = 2 \frac{1}{T} \tag{9}$$

$$T_s = \frac{T}{2} \tag{10}$$

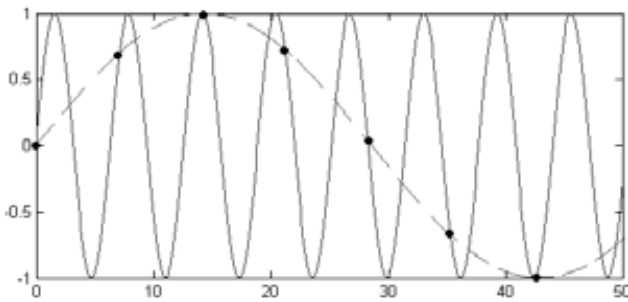


Figura 8. Ejemplo efecto aliasing

Fuente: Ansys 12 Classic

Como conclusión, el periodo de muestreo utilizado para discretizar será de 0,025 s, ya que las muestras se tomaron cada 0,05 s.

Viabilidad técnico-económica

La viabilidad técnico-económica se hizo sobre el diseño realizado. Por medio de este análisis se evaluaron los aspectos técnicos respecto al cumplimiento de las funcionalidades de la máquina, el presupuesto y las condiciones económicas frente a las limitaciones de recursos existentes.

Estudio de condiciones ergonómicas y de seguridad industrial

Para obtener un prototipo que garantice armonía y coordinación práctica en los procesos a desarrollar respecto a la relación hombre-máquina, se hace necesario el estudio de las condiciones ergonómicas óptimas según las características de los usuarios del sistema mecatrónico.

Con la finalidad de tener parámetros establecidos para el eficaz diseño del prototipo, se aplicó una

encuesta a 200 estudiantes de ingeniería, quienes serán los usuarios del sistema, y de la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Características de los usuarios del sistema

Peso promedio	68 Kg	
Estatura	1,71 m	
Sexo	Masculino	85%
	Femenino	15%
Orientación	Diestro	87%
	Zurdo	13%

Fuente: GIAI UCC

Tomando como referencia los datos anteriores y teniendo en cuenta que la antropometría trata de las proporciones y medidas del cuerpo humano, podemos relacionar la estatura general con las proporciones aconsejadas, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Relación antropométrica

Relación	Equivalencia	Distancia (m)
Hombro-piso	0,818	1,40
Codo-piso	0,630	1,08
Muñeca-piso	0,485	0,83
Cintura-piso	0,530	0,91
Rodilla-piso	0,285	0,49
Brazos	0,441	0,75
Piernas	0,485	0,83

Fuente: GIAI UCC

De la anterior tabla se dedujo que la altura del punto más intervenido operativamente en el torno debe estar a no mayor de 1,08 metros (distancia codo-piso) del piso, con una variación de intervención de 30° dependiendo del esfuerzo. Esto quiere decir que si requerimos realizar un esfuerzo excesivo, se deben tener los brazos inclinados 30° hacia arriba; si el esfuerzo es normal, se deben mantener en línea recta y, si es mínimo, se deberían posicionar 30° hacia abajo. En la figura 9 se observa gráficamente la distribución de las zonas del alcance de los brazos.

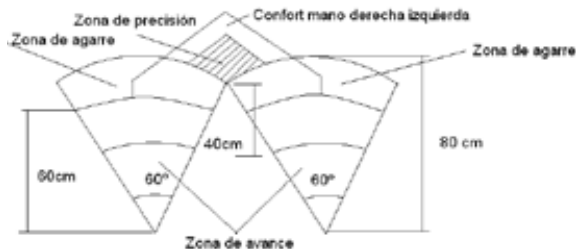


Figura 9. Distribución de las zonas de alcance de los brazos
Fuente: Alberto Cruz, 2006

Construcción del sistema mecánico

La construcción del sistema mecánico fue un proceso que respondió a las fases anteriores y materializó el diseño propuesto.

Sistema de sensores y actuadores electrónicos

Sobre el sistema mecánico construido habrían de colocarse y articularse una serie de sensores y de actuadores electrónicos que den movimiento y sirvan de entrada para la retroalimentación en el sistema electrónico de control.

Diseño del sistema electrónico de control

En el desarrollo del sistema de control se tienen como variables a controlar la velocidad y la posición. Además, se toman en cuenta factores que influyen en el modelamiento físico de la planta, como las características de fabricación de los motores, la caracterización del sistema con carga, los sensores para la realimentación del sistema, el modo de establecimiento de los valores deseados para velocidad y posición, entre otros. Es de resaltar que los controladores son digitales y fueron implementados sobre microcontroladores PIC, dando un valor agregado al proyecto y facilitando la modificación de los algoritmos y las ganancias en caso de querer obtener una respuesta diferente del sistema.

En general, se puede mencionar la realización de tres controladores para cada uno de los motores del sistema.

- *Control del motor principal:* se requiere un control de velocidad que es el que determina qué tan revo-

lucionado está el material a ser torneado. Un compensador en adelanto de fase puede proporcionar una respuesta transitoria adecuada reduciendo los tiempos de levantamiento y asentamiento con un incremento del amortiguamiento, mejorando la respuesta a perturbaciones (Kuo, 1996, p. 736).

El compensador se implementó digitalmente en un microcontrolador 16f877A, obteniendo primero las ecuaciones en diferencias de un compensador análogo y aplicando métodos recursivos para lograr el resultado deseado en el control del sistema.

La señal de control es aplicada a la planta mediante la variación de voltaje dc, lo cual se hace usando modulación por ancho (PWM). Se recomienda este tipo de acción para motores pequeños, como en este caso, y que además sean de imán permanente (Maloney, 1997, pp. 671-672).

A la hora de caracterizar el motor se observa que la respuesta en velocidad se puede aproximar a la de un sistema de primer orden, lo cual obedece a que la inductancia de la armadura es cercana a cero (Chi-Tsong, 2006, p. 671).

A partir de la respuesta del motor (figura 11) se puede deducir la función de transferencia en los dominios de S y Z (con retenedor de orden cero). Dichas funciones se muestran en las ecuaciones 11 y 12 respectivamente.

$$W(s) = \frac{6,7587}{s + 0,3571} \quad (11)$$

$$W(z) = \frac{0,21591}{z - 0,9886} \quad (12)$$

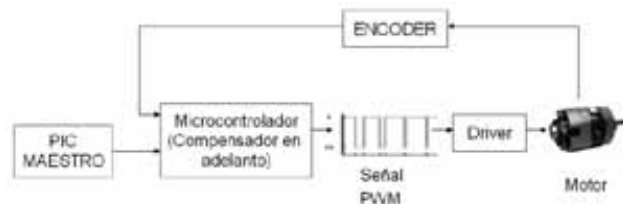


Figura 10. Diagrama de bloques, control motor principal
Fuente: GIAI UCC

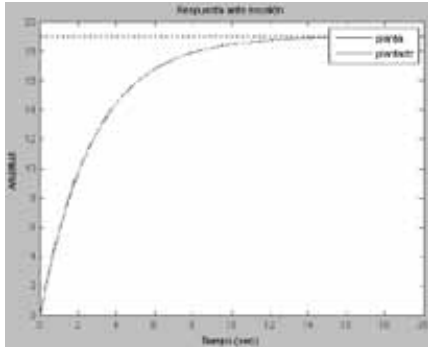


Figura 11. Representación de la caracterización en Matlab

Fuente: los autores

- *Control del motor de avance:* en general, para la caracterización de todos los motores se empleó un proceso similar: aplicar una función escalón unitario al sistema en lazo abierto y realizar la adquisición de los datos de velocidad haciendo uso de un *encoder* y un sistema de conteo de pulsos en un intervalo; luego, estos se envían al PC donde son graficados mediante una aplicación en Labview para su posterior medición y análisis. Después de caracterizado el motor, se obtiene una función de transferencia en los dominios de S y Z , como se muestra en las ecuaciones 13 y 14 para el caso del motor de avance.

$$G(s) = \frac{3,707}{s^2 + 1,39s + 3,707} \quad (13)$$

$$G(z) = \frac{0,0018695(z + 0,9853)}{z^2 - 1,953z + 0,9565} \quad (14)$$

La respuesta al impulso de estas ecuaciones para la planta en los dominios de S y Z se muestra en la figura 12.

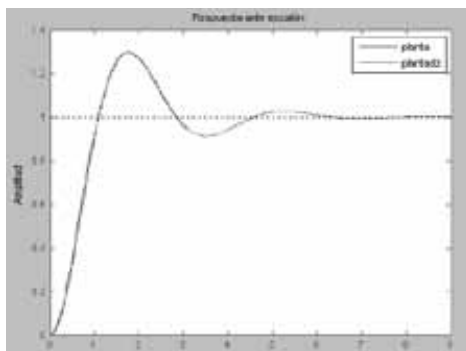


Figura 12. Simulación de la curva característica del motor

Fuente: los autores

Para este motor se usó un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) digital, que compensa las perturbaciones mecánicas que puedan presentarse y los tiempos muertos, y mejora la estabilidad del sistema. En este caso, se utiliza un puente H para controlar el sentido de giro y para proporcionar la corriente que necesita el motor para su funcionamiento. Se presenta el diagrama de bloques en la figura 13.

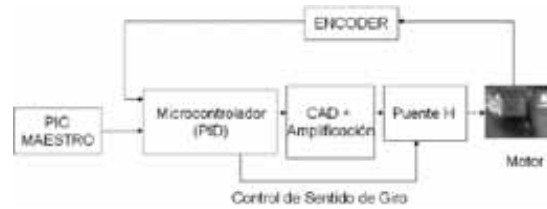


Figura 13. Diagrama de bloques, control motor de avance

Fuente: los autores

- *Control del motor de profundidad:* sobre esta planta se implementó una acción de control de tipo on-off, debido a que el motor es lento para el requerimiento del sistema y su respuesta transitoria es más veloz que la del encoder (que de todas formas tiene una buena resolución). Lo anterior quiere decir que antes de que el sensor entregue un pulso, el motor ya se encuentra en su respuesta de estado estable, por tanto puede girar o detenerse en los tiempos adecuados antes de sobrepasar una ranura del encoder. El control se realizó sobre un microcontrolador PIC 16f877A. El diagrama de bloques se muestra en la figura 14.

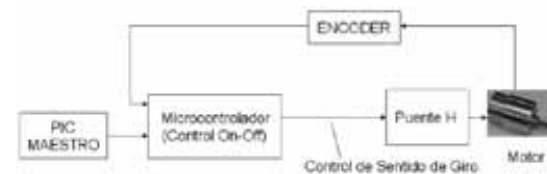


Figura 14. Diagrama de bloques, control motor de profundidad

Fuente: los autores

Sistema de información

El sistema de información que surgió como parte del procedimiento mecatrónico dio lugar al desarrollo de un software en Java que cumple tres funciones muy puntuales, descritas en la figura 15. En el software se programó el primer set de instrucciones CNC de la máquina-herramienta construida.



Figura 15. Elementos del sistema informático
 Fuente: los autores

Integración del sistema mecatrónico

Para el proceso de integración fue necesario el desarrollo de una etapa de comunicación con el PC, la cual cuenta con un microcontrolador llamado “maestro” implementado sobre un PIC 16F877A. La interfaz con el PC se realiza con un convertidor de RS-232 a TTL y se implementan líneas de comunicación en las etapas posteriores. El maestro cumple la función de recibir los comandos enviados mediante la interfaz RS-232 del PC, y distribuirlos a cada una de las etapas posteriores, supervisando y sincronizando el flujo de información desde y hacia las etapas conectadas a él. Dicha corriente es enviada desde el PC con una trama con 8 bytes de control que representan velocidades, posiciones y sentido de giro de los motores a controlar, así:

- | | | |
|----------------------|---|--|
| Motor principal | { | <ul style="list-style-type: none"> • 1 Byte velocidad |
| Motor transversal | { | <ul style="list-style-type: none"> • 1 Byte velocidad • 2 Bytes posición • 1 Byte sentido |
| Motor de profundidad | { | <ul style="list-style-type: none"> • 2 Bytes posición • 1 Byte sentido |

El maestro monitorea si hay procesos ejecutándose en las etapas de control de cada uno de los motores, y si es así retrasa el envío hasta que estos hayan finalizado y se lo informa al PC. Para comunicarse con las etapas de control, el microcontrolador maestro cuenta con tres UART implementadas por software; el módulo UART, que viene integrado en el microcontrolador (por hardware), es usado para la comunicación con el PC. Una vez distribuidos los datos en las etapas posteriores el maestro queda pendiente de la recepción de nueva información.

Validación y pruebas

La validación del sistema mecatrónico se realizó mediante la puesta en funcionamiento. Debido a que los fines de la máquina-herramienta construida son didácticos, se procedió al mecanizado de piezas en materiales como nylon, empack, madera, bronce y duraluminio. Se desarrollaron pruebas que permitieron evaluar criterios de desempeño de la máquina como la precisión y la exactitud, y se identificó información crítica en los regímenes de corte para los materiales mecanizados.

Resultados

Diseño mecánico

El primer resultado obtenido fue el diseño mecánico que contempló los aspectos definidos en la metodología hasta la construcción del sistema mecánico. En la figura 16 puede observarse el isométrico del diseño de la máquina-herramienta.

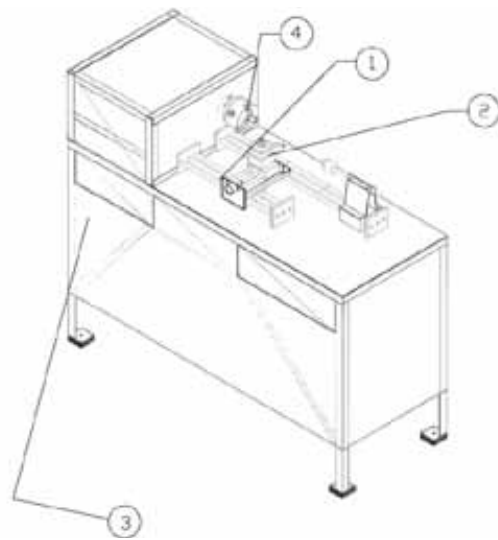


Figura 16. Conjunto general del torno didáctico
 Fuente: GIAI UCC

Diseño electrónico

La tabla 3 sintetiza los resultados obtenidos con respecto al sistema electrónico. Se describen los motores y sensores utilizados para cada uno de los movimientos, según se identificó en el estudio de requerimientos.

Tabla 3. Sistema de sensores y actuadores electrónicos

Movimiento	Motor	Sensor
Rotación	AC/DC General Electric modelo bd6222 con una potencia de 1,5hp y una velocidad máxima de 14000rpm	Encoder de 50 pulsos por revolución
Avance	DC marca Minertia modelo UGJMEE- 02XIB12 con una velocidad de 500 RPM	Encoder integrado de 900 ranuras
Profundidad	DC con caja reductora que permite una velocidad de 8 RPM	Encoder lineal que cuenta con 900 ranuras a lo largo de 16 cm, permitiendo un avance mínimo de 0,17 mm

Fuente: GIAI UCC

Sistema informático

El software desarrollado cumple con las funcionalidades expresadas en la metodología y reúne las siguientes especificaciones técnicas:

Instrucciones CNC soportadas: 10

Lenguaje de desarrollo: Java v-1.6

Tipo de comunicación: Serial

En la figura 17 se observa la interfaz implementada, que además incorpora un módulo de simulación para fortalecer la función didáctica para la cual fue concebida la máquina-herramienta.



Figura 17. Interfaz del software desarrollado

Fuente: GIAI UCC

Integración del sistema mecatrónico

En la figura 18 se observa una foto del sistema mecatrónico integrado.



Figura 18. Foto del prototipo construido

Fuente: GIAI UCC

Discusión

Aunque se cumplió con los objetivos propuestos en la planeación del desarrollo tecnológico, quedan varios aspectos para reflexionar y discutir.

En primera instancia, se tuvo flexibilidad del desarrollo tecnológico propuesto al no ceñirse a los procesos de normalización existentes, aplicables a la construcción de dispositivos CNC. Se planteó un esquema que para el caso concreto se ajustó a unas condiciones de funcionalidad y presupuesto predefinidas, pero que a la vez propone un nuevo esquema en el diseño de soluciones CNC respecto a la normalización existente.

El segundo elemento de discusión corresponde a la posibilidad de desarrollar soluciones de bajo costo en el área de automatización, mediante la incorporación de materiales disponibles en el mercado cercano. Éstas constituyen restricciones económicas que, sumadas a las técnicas y funciones existentes, agregan complejidad al proceso de diseño.

El tercer elemento clave de discusión es el gran espectro de alternativas de solución a problemas de automatización industrial, concretamente a las múltiples alternativas para el desarrollo de sistemas de control electrónico respecto a las técnicas que pueden ser utilizadas.

Conclusiones

Algunas de las conclusiones generadas a partir de la experiencia del diseño mecatrónico son, en primera instancia, la complementariedad de las áreas que intervienen: diseño mecánico, electrónico y de software en pro de la consecución de un objetivo común. El ejercicio permitió disminuir enormemente la complejidad del diseño mecánico en relación con referentes existentes, cargando la responsabilidad del funcionamiento adecuado al diseño electrónico.

Son importantes también la flexibilidad e integralidad de los componentes, ya que los microcontroladores actuales tienen incorporados módulos que permiten el desarrollo de este tipo de sistemas de control, además de contar con una alta precisión en los tiempos de adquisición y entrega de datos.

El diseño matemático de controladores discretos es una herramienta de gran utilidad para la implementación de sistemas de control en una amplia gama de dispositivos. En las experiencias descritas aquí, el control se hace directamente sobre el PC de escritorio ya que envía los *set points* a los microcontroladores, contando además con un desarrollo más económico en cuanto a componentes.

Quedan como mejoras y nuevos desarrollos la integración en un solo DS PIC del sistema electrónico de control, utilizando y optimizando los módulos temporizadores y PWM que están disponibles en el circuito integrado, la ampliación del set de instrucciones elaborado y el incremento de la resolución de los sensores para un mejoramiento del proceso de torneado. También se detectó la necesidad de hacer un sistema automático de caracterización de motores que entregue la función de transferencia de la planta y que agilice los procesos de diseño electrónico que resultan en el sistema mecatrónico.

Referencias

- Bolton, W. (2006), *Mecatrónica, sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y electrónica*, 3ª ed., México, Alfaomega.
- Chi-Tsong, C. (2006), *Analog and Digital Control System Desing*, Oxford, Oxford University Press.
- Cruz, A. (2006), *Ergonomía aplicada*, Bogotá, Ecoe Ediciones.
- Cuenca, S. *et ál.* (2007, 8 de agosto), "A Hardware/ Software Architecture for Tool Path Computation. An Application to Turning Lathe Machining" [conferencia], Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation, Alicante.
- Dong Y. *et ál.* (2009), "An Open CNC System Based on Component Technology", *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, vol. 6, núm. 2, pp. 302-310.
- Dong, J. *et ál.* (2009, 9-12 de agosto), "A New Reconfigurable Logic for CNC Lathe Controllers" [conferencia], International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun.
- Krar, S. F. y Check, A. F. (2002), *Tecnología de las máquinas-herramienta*, 5.ª ed, México, Alfaomega.
- Kuo, B. C. (1996), *Sistemas de control automático*, 7.ª ed., México, Prentice Hall.
- Liu, Y. *et ál.* (2009), "Open Architecture CNC Software Package and Key Tecnology" [conferencia], International Conference on Information Technology and Computer Science, Beijing.
- Maloney, T. J. (1997), *Electrónica industrial moderna*, 3.ª ed., México, Prentice Hall.
- Moreaux, M. y Decotignie, J. D. (1991, 28 de octubre-1 noviembre) "CNC and PLC: are they one and the same for Machine-Tools?" [conferencia], Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Kobe.
- Onwubolu, G. (2005), *Mechatronics Principles and Applications* Butterworth-Heinemann, Londres, Biddles, pp. 3-5.
- Sick, B. (1997), *Monitoring the Wear of Cutting Tools in Cnc-Lathes With Artificial Neural Networks*, Passau, University of Passau.