

## **Estrategia de Mecanizado Aplicada a un Pequeño Torno Convencional Adaptado a CNC**

**Nelson L. Ospina, William A. Molina, Pedro L. Simanca y Jairo Á. Díaz**

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Grupo de Manejo Eficiente de la Energía - GIMEL, Universidad de Antioquia, Calle 67 No. 53-108, Oficina 20-437, Medellín-Colombia.  
(e-mail: nlondono@udea.edu.co; williamamp@gmail.com; psimanca@gmail.com; jairoad07@yahoo.es)

*Recibido nov. 7, 2013; Aceptado Dic. 30, 2013; Versión final recibida Mar. 28, 2014*

---

### **Resumen**

En este artículo se presenta la estrategia de mecanizado implementada en un sistema modular desarrollado para permitir la conversión de tornos convencionales a tornos CNC de forma sencilla y asequible para la pequeña y mediana industria local. En el desarrollo del artículo, se expone, en términos generales, las características del sistema, y se enfatiza en aspectos adicionales del sistema mecánico y de software. Igualmente, se describe detalladamente la estrategia de mecanizado implementada, la cual facilita la fabricación de piezas de revolución a partir de un perfil 2D realizado en cualquier programa de diseño asistido por computador. No se hace uso de códigos G. Finalmente, se dan los resultados obtenidos en la fabricación de algunas piezas de ajedrez (una torre y un alfil), y se comparan con los resultados obtenidos en versiones anteriores del sistema, demostrando su mejor desempeño.

*Palabras clave: torno convencional, torno CNC, mecanizado, piezas de revolución, CAD*

## **Machining Strategy Applied to a Small Conventional Lathe adapted to CNC**

### **Abstract**

This paper presents the machining strategy implemented in a modular system developed for the conversion of conventional lathes to a numerical control machine. The objective is to make the system simple to install and cheap enough to make it affordable to the local small and medium-sized Enterprise. General characteristics of the developed system are exposed. This work emphasizes in the mechanical and software systems. The machining strategy, implemented in the software, is deeply studied. This strategy makes it easy to manufacture solids of revolution, just with a previous 2D design made in any computer-aided design software. No G code is used. Finally, other chess pieces (a rook and a bishop) are manufactured, and obtained results are compared with those obtained in the previous version of the system. The better performance is verified.

*Keywords: lathe, CNC, machining, solids of revolution, CAD*

## INTRODUCCIÓN

En la Universidad de Antioquia se planteó la posibilidad de convertir un torno convencional en un torno con control numérico computarizado (CNC) mediante un proyecto desarrollado en varias etapas. En la primera, (Londoño et al., 2005), se construyó un minitorno automatizado utilizando motores paso a paso sin realimentación y se desarrolló un software que, a partir de un diseño previo realizado en algún programa asistido por computador (CAD) y una estrategia de mecanizado, comandaba la máquina para permitir la fabricación de piezas de revolución. Como segunda etapa, se propuso mejorar la velocidad y precisión de la máquina, mejorando el sistema mecánico, el sistema electrónico y el software de control. Las características del sistema electrónico y de control fueron detalladas en Londoño et al. (2010). En este artículo se expondrá, brevemente, las características generales de todo el sistema y se presentará, de manera detallada, aspectos del sistema mecánico, el software desarrollado y, principalmente, la estrategia de mecanizado adoptada.

El problema de mejorar el desempeño de una máquina CNC puede ser abordado desde diferentes puntos de vista, dado que existen un gran número de variables que hacen parte de o afectan los procesos de mecanizado. Por dar una visión general, se presentan a continuación algunas referencias que dan una idea de la amplitud del tema: En (Karayel (2009); Asiltürk y Çunkas, 2011) se implementa el uso de redes neuronales para la predicción y el control de la rugosidad superficial. Satheesh Kumar et al. (2012) estudia el efecto de la velocidad de rotación y la tasa de alimentación en la rugosidad superficial de aceros al carbono en máquinas CNC. Vagnorius et al. (2010) desarrolla un método para la determinación de un tiempo óptimo de reemplazo de herramientas de corte metálicas. En (Rajemi et al., 2010; Mativenga y Rajemi, 2011) realizan la determinación de condiciones óptimas de mecanizado para minimizar el consumo de energía en máquinas herramientas y el impacto causado sobre el ambiente por su generación. Behrendt et al. (2012) desarrolla un procedimiento para el monitoreo del consumo de energía de máquinas herramientas. Helu, et al. (2012) estudia el impacto de las estrategias de mecanizado “verdes” en la calidad alcanzada de las superficies generadas. Neugebauer et al. (2011) estudia los efectos de la velocidad en el conformado de metales y los procesos de mecanizado. Safaieh et al. (2013) analiza el problema de la no interoperabilidad entre diferentes tecnologías CNC, causada por la falta de estandarización para representar la geometría de las partes y la semántica de las operaciones de mecanizado, que conllevan a la necesidad de realizar un programa único para cada máquina diferente. Por ello plantean la posibilidad de crear una herramienta que facilite la conversión de programas escritos para una máquina CNC específica, a sintaxis útil para otra máquina CNC con una estructura diferente. Morimoto et al. (2012b) continúa los trabajos sobre el torno con motores lineales presentado en Morimoto et al. (2012a), y desarrollan un programa de manufactura asistida por computador (CAM) y un programa de control numérico (NC) para permitir el mecanizado de superficies curvas 3D con ejes no axisimétricos en un torno. Zamora et al. (2004) presenta una metodología para la caracterización dinámica de máquinas herramientas y una propuesta de sistema de control para reducir vibraciones. Martínez (2004) presenta los principios fundamentales que se requieren para tener un criterio sobre las bondades e inconvenientes de los sistemas CAD/CAM. Teniendo en cuenta la importancia de la herramienta y su correcta selección, Durán et al. (2008) presenta la utilización de una técnica de optimización evolutiva para la obtención de los ángulos principales de la geometría del filo de corte de una herramienta de mecanizado. Liu et al. (2012) presenta una aproximación para el cálculo de trayectorias *spline* en sistemas NC directamente desde puntos discretos con precisión controlada.

La visión de un proceso de manufactura completamente automatizado fue concebida desde que los computadores se empezaron a utilizar en el control de equipos industriales, pero lograr este objetivo no ha sido fácil. Las dificultades de generar información de manufactura directamente desde los datos de un software CAD ha sido un reto para investigadores durante más de 25 años. La programación de procesos de manufactura controlados por computador ha permanecido siendo asistida y no completamente automatizada. (Corney et al., 2005). Desde finales de los años 80, se han publicado numerosos artículos con respecto a la generación de trayectoria de la herramienta. Dragomatz y Mann (1997) presenta una base de datos de bibliografía clasificada sobre este tema. La mayoría de los artículos listados datan del periodo entre 1989 y 1994 aproximadamente.

La generación de trayectorias de la herramienta en su totalidad es un campo multidisciplinario que involucra ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica, y de producción, tan bien como ciencias de la computación y matemáticas (Dragomatz y Mann, 1997). En los últimos años, los trabajos en este campo se han enfocado principalmente en el mecanizado de superficies complejas en máquinas CNC de 3 ejes, como los presentados en (Chen y Ye, 2002; Feng y Li, 2002; Zhang et al., 2008); y de 5 ejes, como los presentados en (Morishige et al., 1999; Tournier et al., 2006; Chen et al., 2012). En (Wang et al., 2005; Toh, 2005) se enfocan en la optimización de la trayectoria de la herramienta en procesos de maquinado a alta velocidad. Ramli et al. (2009) propone el uso de un algoritmo genético que puede generar automáticamente la trayectoria de la herramienta en un torno CNC durante el desarrollo de líneas de transferencia flexibles o

FTL por sus siglas en inglés. Lasemi et al. (2010) presenta un estado del arte de las recientes investigaciones desarrolladas para mejorar la eficiencia y la calidad del maquinado CNC de superficies de forma libre, enfocándose en tres aspectos principales: la generación de la trayectoria de la herramienta, la identificación de su orientación y la selección de su geometría. Schulze y Becke (2011) realizan un análisis detallado de dos estrategias de mecanizado con las cuales se pretende lograr un mejor resultado en el mecanizado de materiales compuestos, dado el reto que implican debido a la estructura anisotrópica de los mismos.

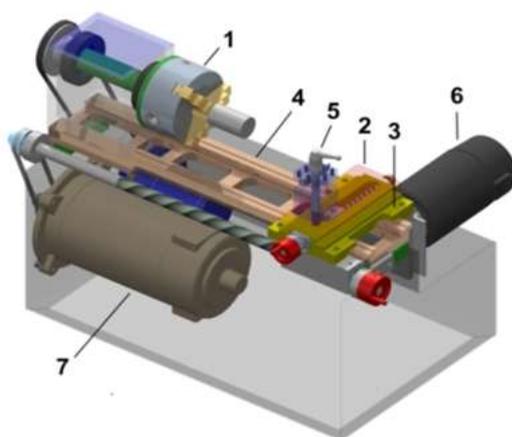
En el mercado se encuentra disponible una gran variedad de software CAM comerciales como MasterCAM, RhinoCAM, SurfCAM, SprutCAM, entre otros, que pueden generar las trayectorias de la herramienta a partir de un diseño hecho en algún software CAD. Eso sí, no suele ser común dejar que hagan todo el trabajo de forma completamente automática, dado que los programas de mecanizado que generan no suelen ser suficientemente óptimos, y suelen implicar altos tiempos de mecanizado. Por tal motivo, es muy común que los expertos analicen la pieza a fabricar, dividan el proceso en subprocesos y seleccionen para cada uno de estos la mejor herramienta y la mejor estrategia de mecanizado posible. En algunos casos, el precio de este tipo de software puede llegar a ser relativamente alto, limitando su adopción. A pesar de los diferentes enfoques y tendencias observadas en la literatura, son pocas las referencias ligadas al objetivo propuesto en el proyecto. Yiqing et al. (2007) plantea un desarrollo similar, en el cual proponen la utilización de diferentes productos de automatización para renovar viejas máquinas herramienta, reduciendo la inversión requerida y el consumo de energía.

Lo que se pretende con este trabajo no es lograr una alta precisión, ni diseñar una estrategia de mecanizado supremamente óptima, ni tampoco innovar en algoritmos de control para seguimiento de trayectorias. El objetivo es diseñar un sistema aceptablemente preciso, práctico, modular y, lo más importante, económico, que permita automatizar y renovar viejas máquinas herramienta en universidades, y en la pequeña y mediana industria, con solo la instalación de motores DC y la integración del sistema electrónico y de software propuestos.

Para la mejora del desempeño del mini torno desarrollado en (Londoño et al., 2005), se propuso: cambiar los motores paso a paso a servomotores, con la finalidad de mejorar la suavidad y la precisión del movimiento; proveer al sistema con sensórica para permitir un lazo de control cerrado o realimentado; replantear la arquitectura del sistema e implementar un control de velocidad y posición para permitir el seguimiento de trayectorias; y por último, diseñar y adoptar una nueva estrategia de mecanizado más óptima, rápida y eficiente para reducir los tiempos de mecanizado y el acabado superficial.

### SELECCIÓN DE MOTORES DC

En primer lugar, se hicieron pruebas de mecanizado para medir la potencia requerida por los motores DC para un proceso normal de mecanizado. Se realizaron pruebas con aluminio, bronce y acero 1020, siendo con este último en el que se presentó la máxima exigencia de potencia. Tomando este valor, y aplicando un sobredimensionamiento del 50%, se obtuvieron las potencias de los motores. Fueron seleccionados dos motores marca Baldor que funcionan a un régimen de 1725 RPM, trabajan con un voltaje de 90V y tienen una potencia de ¼ HP y 1/8 HP para el carro longitudinal y transversal respectivamente. En la Fig. 1 se puede observar el mini torno desarrollado y sus partes.



Numero	Nombre
1	Mandril - Husillo
2	Carro Transversal
3	Carro Longitudinal
4	Bancada Prismática
5	Torre - Porta Herramienta
6	Motor DC eje Transversal
7	Motor DC eje Longitudinal

Fig. 1: Mini Torno desarrollado. (Londoño et al., 2010)

## SENSÓRICA

Se implementaron sensores de corriente para conocer la potencia consumida por la máquina y sensores finales de carreras para proteger el sistema contra choques y para permitir una posible referencia absoluta. Para el sensado de velocidad y posición, se instaló en cada uno de los motores DC un encoder óptico incremental de 400 perforaciones. La resolución se incrementó en 4X por medio de un sensado infrarrojo con señales de cuadratura, alcanzando un total de 1600 pulsos por revolución. Teniendo en cuenta que por cada revolución del motor la bancada avanza 1.5 mm, el sistema tendrá una resolución de control y una precisión teórica de:

$$P = \frac{1,5 \text{ mm}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ rev}}{1600 \text{ pulsos}} = 0,0009375 \text{ mm} \cong 0,001 \text{ mm} = 1\mu\text{m} \quad (1)$$

## NUEVA ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En la Fig. 2 se presenta el esquema general del sistema desarrollado y se ilustran los diferentes elementos que lo conforman. El PC comanda todo el sistema, interpreta el perfil que se desea mecanizar, discretiza la trayectoria deseada y envía la información necesaria a los módulos de control (MCUs) mediante un bus con interfaz RS-485. Los módulos MCU 1 y MCU 2, microcontroladores PIC-SERVO SC de propósito específico suministrado por la empresa JEFFREY KERR, LLC (Kerr, 2010), reciben las posiciones objetivo, interpolan y controlan los motores, generando los movimientos necesarios en cada eje del torno. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas del mini torno, obtenidas luego de realizar todas las mejoras anteriormente mencionadas.

Tabla 1: Especificaciones del Mini torno desarrollado.

Característica	Valor
Máximo recorrido en el eje X	240 mm
Máximo recorrido en el eje Z	75 mm
Rango de Velocidades del Eje	100 a 6000 RPM
Máxima Velocidad de avance en el eje X	2,7 m/min
Máxima Velocidad de avance en el eje Z	2,7 m/min
Mínima cantidad de movimiento en el Eje X	0,001 mm
Mínima cantidad de movimiento en el Eje Z	0,001 mm
Precisión del sistema (Teórico)	0,001 mm
Máximo diámetro de la pieza de trabajo	130 mm
Diámetro de Volteo	160 mm
Volteo	160 mm
Contrapunto	No
Distancia entre centros	160 mm
Potencia de la maquina	1017,5 W
Potencia del eje del Husillo	1 HP
Peso de la maquina	45 Kg
Dimensiones de la maquina	570x460x430 mm
Tamaño máximo de la herramienta	6,35x6,35x50 mm
Especificaciones Eléctricas	120V/60 Hz

A diferencia del CNC convencional, el desarrollado no cuenta con un PLC, sino con un sistema de control centralizado en un PC que comanda los microcontroladores, uno por cada motor, los cuales se encargan de coordinar los movimientos de los motores, sensar su velocidad, y determinar y controlar su posición. La principal ventaja de la implementación de un microcontrolador en lugar de un PLC es la reducción del costo total del sistema.

## SOFTWARE DESARROLLADO

Se desarrolló una aplicación en Visual Basic .NET para procesar los datos desde un archivo CAD en formato DXF y generar, de manera automática, la estrategia y las trayectorias de la herramienta comandando correctamente el movimiento de los motores. Además, permite configurar los diferentes parámetros de mecanizado, operar la maquina en modo manual o automático y estar informado acerca del estado de los procesos que se llevan a cabo. En la Fig. 3 se puede apreciar la interfaz de usuario que se desarrolló para la interacción con la máquina.

El operario crea el perfil 2D de la pieza en un programa CAD, exporta el diseño en un archivo con formato DXF y lo importa al software desarrollado. Luego, el usuario debe configurar los parámetros de mecanizado, dar la orden de iniciar el proceso y el sistema trabajará en modo completamente autónomo hasta que la pieza es terminada. El software, como otros que existen en el mercado, no hace uso de códigos G.

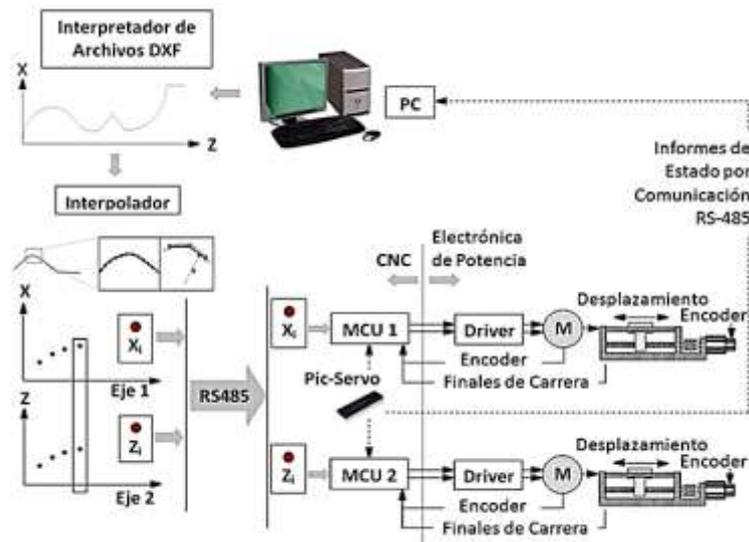


Fig. 2: Esquema general del sistema CNC implementado. (Londoño et al., 2010)

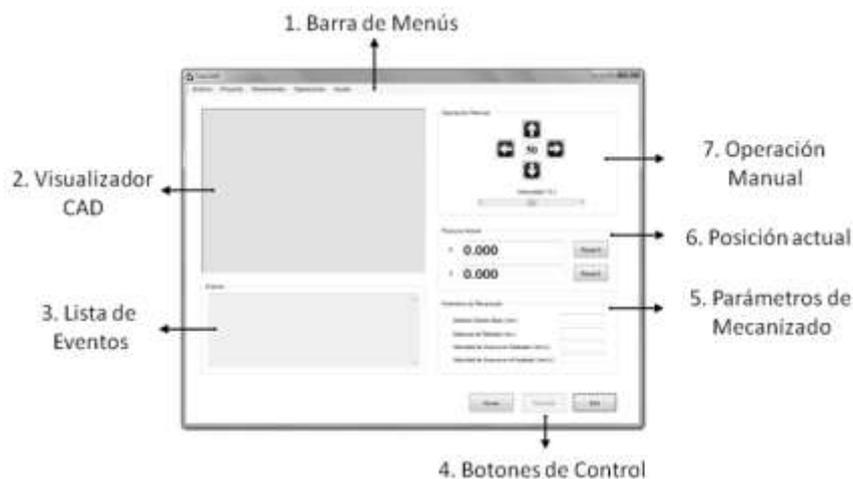


Fig. 3: Interfaz de usuario. (Londoño et al., 2010)

El sistema, en esta etapa del proyecto, permite únicamente utilizar arcos y líneas en las trayectorias. Algo suficiente para la fabricación de piezas básicas como arboles de transmisión, flechas entre otras. Además, permite realizar de manera automática otras operaciones comunes en el proceso de torneado como refrentado, cilindrado, ranurado, tronzado y regreso a cero.

## ESTRATEGIA DE MECANIZADO

Como se explicó anteriormente, uno de los puntos clave en el desarrollo de esta segunda etapa del proyecto consistió en la implementación de un software de control que permitiera, desde un diseño 2D previamente elaborado en algún programa CAD, fabricar piezas de revolución sin mayor intervención del usuario.

El software integra una estrategia de mecanizado más eficiente que la implementada en su versión anterior presentada en Londoño et al. (2005). Con esta nueva estrategia, se busca disminuir los tiempos de mecanizado y los requerimientos de computo del sistema, garantizando una solución lo más económica posible y accesible a la pequeña y mediana industria. Es una solución elaborada con recursos tecnológicos de fácil consecución en el mercado local, siguiendo los ejemplos presentados por Yiqing et al. (2007). Los pasos generales y el algoritmo para llevar a cabo los procesos de mecanizado se detallan en lo que sigue.

**Diseño del perfil:** El perfil de la pieza a maquinar deberá ser creado en cualquier programa CAD que permita exportar los diseños a archivos DXF. El punto a favor de este formato, y la razón de su adopción, es que es soportado por la mayoría de programas CAD del mercado, y sus especificaciones técnicas están estandarizadas y publicadas de manera abierta para los desarrolladores. En el programa CAD solo se debe dibujar medio perfil, dado que la pieza es simétrica, y deberá ser dibujado en el primer cuadrante con todas sus coordenadas (x,y) positivas.

**Importación de archivo DXF:** El archivo DXF generado deberá ser importado en la aplicación desarrollada. El programa extraerá toda la información del perfil, los diferentes segmentos que lo conforman (solo se permiten Líneas y arcos), sus parámetros, y los organizará en vectores. El sistema dibujará el perfil y las líneas de mecanizado en el área de "Visualizador CAD" e informará de todos los procesos que se realicen en el área "Lista de Eventos".

**Numeración de segmentos:** El programa automáticamente enumera, de izquierda a derecha, los segmentos que contiene el perfil. Así, por ejemplo, para el perfil del peón de Ajedrez mostrado en la Fig. 4, el sistema enumera los diferentes segmentos, donde 1, 2 y 5 corresponden a arcos, y 3, 4 y 6 a líneas rectas.

**Sobredimensionamiento del perfil:** Se aplica un sobredimensionamiento al perfil como tolerancia, para permitir la etapa de acabado una vez se finaliza el desbaste, Fig. 5.

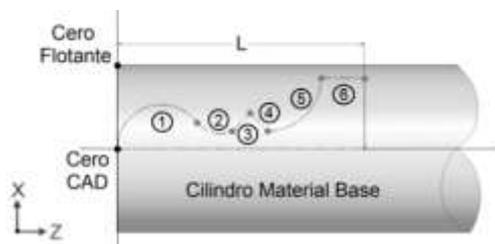


Fig. 4: Numeración de segmentos.



Fig. 5: Sobredimensionado de la pieza.

**Configuración:** Antes de iniciar el proceso de mecanizado se deberá configurar una serie de parámetros necesarios para que el sistema pueda ejecutar el trabajo de manera automática. Estos parámetros son: diámetro de la pieza; material de la pieza a mecanizar; profundidad de corte, definida como " $d$ "; velocidad de avance; aceleración (opcional); la distancia que se retirará el buril antes de regresar luego de un proceso de desbaste; y el tipo de herramienta a utilizar, escogida de una lista preconfigurada. En esta etapa del desarrollo, el operario debe seleccionar adecuadamente la herramienta para cada proceso, dado que el software aún no evita interferencias.

**Ubicación del punto cero:** El operario deberá establecer el cero flotante (o cero de pieza) de acuerdo a la Fig. 6.

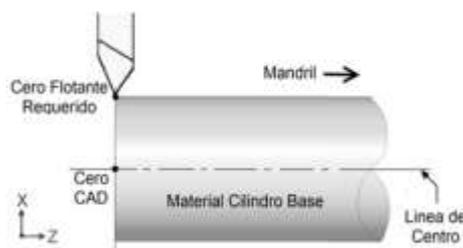


Fig. 6: Cero flotante requerido por el sistema desarrollado.

Hasta aquí se requiere la intervención del operario. Una vez se dé inicio al proceso, el programa realiza los cálculos necesarios para determinar cada uno de los movimientos que deberá hacer la máquina para acercarse al perfil deseado. La estrategia de mecanizado implementada consta de tres fases: Desbaste, Focalización y Acabado.

**Desbaste:** Consiste en remover la mayor cantidad de material sin importar el acabado, hasta acercarse lo más posible al perfil final deseado. A partir del cero flotante, el buril debe penetrar en el eje X de la máquina una distancia igual a la profundidad de corte  $d$  y maquinar en línea recta por el eje Z hacia el mandril, hasta una distancia igual a la longitud de la pieza, o, en su defecto, hasta que se intercepte con algún segmento del perfil deseado, Fig. 7. Cada vez que se llega al punto final de un barrido, el buril se retirará la distancia establecida y regresa a la coordenada  $Z = 0$ . El proceso descrito se repite hasta que el buril llegue a la línea de centro del cilindro, Fig. 8.

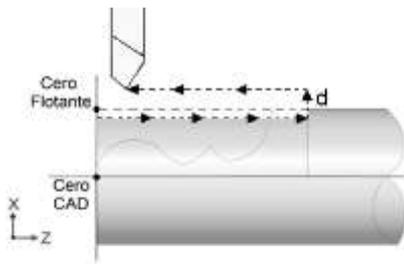


Fig. 7: Proceso de desbaste.

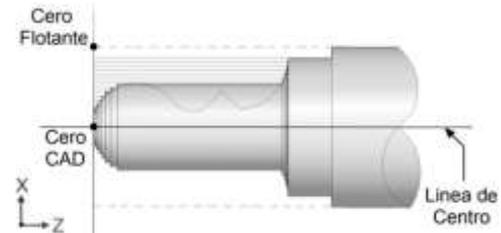


Fig. 8: Resultado luego del desbaste

*Focalización:* En esta etapa se perfila cada bache encontrado de izquierda a derecha, uno por vez. Los baches son identificados por medio del algoritmo implementado. En este orden de ideas, para el ejemplo, se mecaniza primero la zona 1 y luego la zona 2, Fig. 9.

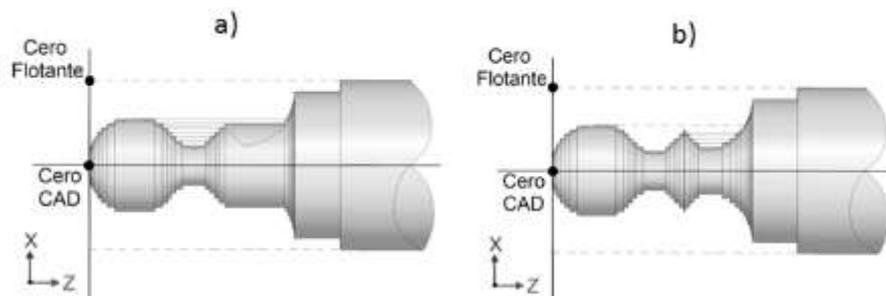


Fig. 9: Pieza luego del proceso de focalizado a) en la zona 1 y b) en la 2

*Acabado:* En este proceso habrá movimiento simultáneo de ambos motores para generar las diferentes formas geométricas del perfil y así seguir el contorno del perfil deseado, Fig.10. Hecho esto se finaliza el proceso de mecanizado y se obtiene la pieza deseada.

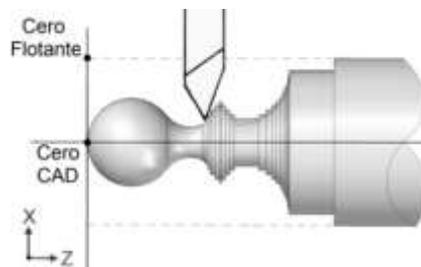


Fig.10: Proceso de Acabado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En pruebas posteriores a la fabricación del peón mostrado en Londoño et al. (2010), y del cual se describió de manera muy específica todo su proceso de mecanizado en el presente artículo, se procedió a fabricar otras dos piezas de ajedrez: una torre y un alfil. El objetivo era comprobar el correcto funcionamiento del sistema y de la estrategia de mecanizado propuesta y verificar sus ventajas y mejoras con respecto a la versión anterior descrita en Londoño et al. (2005). En la Fig. 11 se muestran las dos piezas de ajedrez que fueron fabricadas en latón, detallando las trayectorias de la herramienta que fueron determinadas por la estrategia de mecanizado implementada.

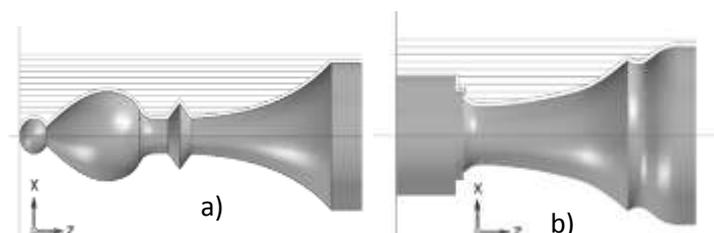


Fig. 11: Detalle de las piezas fabricadas con las trayectorias de la herramienta. a) Alfil b) Torre.

En la Tabla 2 se detallan los parámetros de corte utilizados para los mecanizados. Estos fueron seleccionados teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en Chevalier (1998). En la Tabla 3 se compara el tiempo que tomo cada una de las diferentes fases de la estrategia de mecanizado durante la fabricación del peón presentado en Londoño et al. (2010), el alfil y la torre.

Tabla 2: Parámetros de corte utilizados en el mecanizado del alfil y la torre en Latón

Parámetro	Valor
Diámetro del Cilindro Base	19 mm
Distancia de retirada	3 mm
Profundidad de corte	0,3 mm
Velocidad de Avance en Desbaste	5 mm/s
Velocidad de corte en Desbaste	120 m/min
Velocidad de Avance en Acabado	1 mm/s
Revoluciones por minutos del Husillo	2000 RPM
Aceleración del sistema	20 mm/s <sup>2</sup>

Tabla 3: Tiempo requerido por las etapas de la estrategia de mecanizado durante la fabricación del peón, el alfil y la torre.

Proceso	Tiempo (minutos)		
	Peón	Alfil	Torre
Desbaste + focalización	3,33	4,46	3,86
Acabado (un solo paso)	0,45	0,79	0,56
Tiempo total de mecanizado	3,78	5,25	4,42

Con la nueva estrategia de mecanizado implementada, que genera trayectorias de la herramienta para acercarse al perfil deseado de forma más eficiente que la versión anterior mostrada en Londoño et al. (2005), se lograron disminuir los tiempos de mecanizado, a la vez que se obtuvo una mejora sustancial en cuanto a lograr un maquinado de piezas de manera más precisa, segura y confiable. Esto es muy importante para la solución final que se desea dar a la pequeña y mediana industria, dado que se ve reflejado en menores tiempos de producción, reducción de costos de fabricación y eventual aumento de ganancias. Al validar el algoritmo implementado mediante tres piezas representativas (Peón, Alfil y Torre), se puede constatar que la estrategia implementada ofrece resultados aceptables cuando se desea diseñar y construir piezas básicas de revolución.

## CONCLUSIONES

Haciendo una comparación con el sistema presentado en Londoño et al. (2005), el nuevo sistema es mucho más rápido, más preciso, ofrece un mejor acabado superficial y, además, redujo los tiempos de mecanizado alrededor de un 77%, tal como se presenta en Londoño et al. (2010).

El software desarrollado para la interpretación de perfiles desde archivos DXF cumplió con las expectativas. A este punto, el sistema es capaz de analizar el perfil deseado y de calcular automáticamente todos los movimientos necesarios de la herramienta de acuerdo a la estrategia de mecanizado adoptada. Esto hace sencilla la operación del sistema.

Se comprobó la posibilidad de automatizar un torno convencional para ser convertido en CNC, mediante la adición de algunos elementos de Hardware y la implementación de un software desarrollado para tal fin. Implementar el sistema propuesto es mucho más económico que adquirir un torno CNC básico. Es claro que no se puede comparar las capacidades de dichos tornos comerciales con el sistema desarrollado, pero se debe tener en cuenta que este proyecto fue concebido para evaluar la posibilidad de apropiar tecnología, y poder así repotenciar las capacidades y prestaciones de los tornos convencionales, resaltando que en nuestro país hay muchas pequeñas y medianas empresas que cuentan con tornos convencionales y no tienen la capacidad de adquirir un torno CNC comercial. Se pudo concluir que es posible, con recursos y tecnología local, dar valor agregado a los tornos convencionales, buscando mejorar y facilitar el trabajo a nivel de pequeñas y medianas industrias.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por el apoyo de “Sostenibilidad 2013-2014”; al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) por su asistencia y financiación; Al Grupo de Manejo Eficiente de la Energía GIMEL; y al Profesor Orlando Carillo Perilla del departamento de ingeniería electrónica, que con sus sugerencias y asesoría enriqueció el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

- Asiltürk, I., y Çunkas, M., Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications*, 5826–5832 (2011).
- Behrendt, T., Zein, A., y Min, S., Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 43–46 (2012).
- Chen, L., Yu, D., Geng, C., Sun, Y., y Feng, W., High surface quality tool path generation strategy for sculptured surfaces machining, *Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), 2012 IEEE International Conference on*, 396-399 (2012).
- Chen, T., y Ye, P., A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3), 369-373 (2002).
- Chevalier, J. B., *Tecnología del diseño y fabricación de piezas metálicas*. Ed. Limusa S.A. DE C.V. Grupo Noriega Editores Balderas 95, México D.F. (1998).
- Corney, J., Hayes, C., Sundararajan, V., y Wright, P., The CAD-CAM Interface A 25-Year Retrospective. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 5(3), 188-197 (2005).
- Dragomatz, D., y Mann, S., A classified bibliography of literature on NC milling path generation. *Computer-Aided Design*, 29(3), 239-247 (1997).
- Durán, O., Rodríguez, N., y Consalter, L., Definición Automática de la Geometría de Herramientas de Corte usando Algoritmos Genéticos. *Información Tecnológica*, 19(2), 51-58 (2008).
- Feng, H.-Y., y Li, H., Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining. *Computer-Aided Design*, 34(9), 647-654 (2002).
- Helu, M., Behmann, B., Meier, H., Dornfeld, D., Lanza, G., y Schulzeb, V., Impact of green machining strategies on achieved surface quality. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), 55-58 (2012).
- Karayel, D., Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network. *Journal of materials processing technology*, 3125–3137 (2009).
- Kerr, J. (n.d.). PIC-SERVO SC Datasheet. [www.Jrkerr.com](http://www.Jrkerr.com). Acceso: Marzo (2010).
- Lasemi, A., Xue, D., y Gu, P., Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, 641-654 (2010).
- Liu, Y., Xia, S., y Qian, X., Direct Numerical Control (NC) Path Generation: From Discrete Points to Continuous Spline Paths. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 12(3), 031002 (2012, July 19).
- Londoño Ospina, N., Molina, W. A., Fonseca, L. A., Álvarez Díaz, J., y Giraldo C, H., Diseño de un sistema integrado para la conversión de un torno convencional a torno CNC. *Revista Politécnica* (10), 44-56 (2010).
- Londoño, N., Simanca, P., Álvarez, J., y Marín, E., Diseño y construcción de un torno de control Numérico. *Scientia et Technica*(29), 121-126 (2005).
- Martínez, R., Criterios para Seleccionar Sistemas de Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora (CAD/CAM). *Información Tecnológica*, 15(2), 91-94 (2004).
- Mativenga, P. T., y Rajemi, M. F., Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 149–152 (2011).
- Morimoto, Y., Emoto, S., Moriyama, T., Kato, H., Nakagaki, K., Suzuki, N., Kaneko, Y., y Isobe, M., Creation of Curved Surface by Lathe Turning -Development of CAM system using original tool layout. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. *Procedia CIRP* 1, 114 – 119 (2012b).

- Morimoto, Y., Moriyama, T., Emoto, S., Saito, H., Nakagaki, K., Kaneko, Y., y Isobe, M., Development of linear-motor-driven NC table for high-speed machining of 3D surface by lathe turning. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. *Procedia CIRP* 1, 271 – 276 (2012a).
- Morishige, K., Takeuchi, Y., y Kase, K., Tool Path Generation Using C-Space for 5-Axis Control Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(1), 144-149 (1999).
- Neugebauer, R., Bouzakis, D., Denkena, B., Klocke, F., Sterzing, A., Tekkaya, A. E., y Wertheim, R., Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 627–650 (2011).
- Rajemi, M. F., Mativenga, P. T., y Aramcharoen, A., Sustainable machining selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1059–1065 (2010).
- Ramli, R., Yamamoto, H., y Qudeiri, J. A., Tool path of lathe machine in flexible transfer lines by using genetic algorithms. *Int. J. Production Economics*, 72–80 (2009).
- Safaieh, M., Nassehi, A., y Newman, S. T., A novel methodology for cross-technology interoperability in CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 79–87 (2013).
- Satheesh Kumar, N., Shetty, A., Ananth, K., y Shetty, H., Effect of spindle speed and feed rate on surface roughness of Carbon Steels in CNC turning. *International Conference on Modeling, Optimization and Computing (ICMOC 2012)*. *Procedia Engineering*, 691 – 697 (2012).
- Schulze, V., y Becke, C., Analysis of machining strategies for fiber reinforced plastics with regard to process force direction. *Procedia Engineering*, 19, 312 – 317 (2011).
- Toh, C., Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials. *Materials & Design*, 26(6), 517-533 (2005).
- Tournier, C., Castagnetti, C., Lavernhe, S., y Avellan, F., Tool Path Generation and Post-Processor Issues in Five-axis High Speed Machining Of Hydro Turbine Blades. Metz, France: Fifth International Conference on High Speed Machining (2006).
- Vagnorius, Z., Rausand, M., y Sørby, K., Determining optimal replacement time for metal cutting tools. *European Journal of Operational Research*, 407–416 (2010).
- Wang, H., Jang, P., y Stori, J., A Metric-Based Approach to Two-Dimensional (2D) Tool-Path Optimization for High-Speed Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(1), 33-48 (2005).
- Yiqing, Z., Zhiyong, Z., Yun, X., y Wen, W., Research and application of automation technology in renovation for old import machine tool. *International Technology and Innovation Conference 2007*. Wuhan Baode Electromechanical Company Limited. China, 2134-2137 (2007).
- Zamora, E., Fernandes, M., y Albizuri, J., Caracterización Dinámica de Máquinas Herramienta y Diseño de un Sistema Activo de Reducción de Vibraciones durante el Mecanizado. *Información tecnológica*, 15(1), 23-28 (2004).
- Zhang, D., Yang, P., y Qian, X., Adaptive NC Path Generation From Massive Point Data With Bounded Error. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(1), 011001 (2008).