

# Proceso de fresado CNC empleando herramientas CAD-CAM en sistemas de manufactura flexible



## Colaboración

Abelino Reyes Pablo; Grysel Pimentel Nogales; Eli Ruiz Calvo; Oscar Yael Guzmán Márquez; Raúl Fidel Ibáñez Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca

Fecha de recepción: 17 de noviembre de 2023

Fecha de aceptación: 20 de diciembre de 2023

**RESUMEN:** Se diseñó y fabricó exitosamente una pieza experimental compleja, compuesta por superficies curvas. Se planificó y se ejecutó el proceso de fabricación mediante maquinado. Se fresó con herramientas de corte plano en un centro de maquinado vertical. Equipado con control FANUC serie OI-F. Para la planificación, simulación y verificación del proceso, se desarrolló un modelo virtual de la máquina herramienta, disponible en un sistema comercial de maquinado asistido por computadora. Se implementó un montaje virtual del sistema de manufactura, permitiendo la verificación y ajuste del proceso hasta lograr un rendimiento óptimo. Se comprobaron las ventajas de utilizar los recientes métodos virtuales ofrecidos por varios sistemas de maquinado asistido por computadora para la simulación del proceso, especialmente cuando se trata de componentes complejos procesados en máquinas herramienta de más de tres ejes.

**PALABRAS CLAVE:** CAD, CAM, máquinas herramienta virtuales, planificación de procesos, maquinado de piezas complejas, simulación y verificación de procesos, maquinado multiejes, manufactura flexible.

**ABSTRACT:** A complex experimental part composed of curved surfaces was successfully designed and manufactured. The manufacturing process was planned and executed through machining. It was milled with flat cutting tools in a vertical machining center equipped with FANUC OI-F series control. For the planning, simulation and verification of the process, a virtual model of the machine tool was developed, available in a commercial computer aided machining system. A virtual assembly of the manufacturing system was implemented, which allowed for the verification and adjustment of the process until optimal performance was achieved. The advantages of using recent virtual methods offered by various computer-aided machining systems for process simulation were tested, especially when dealing with complex components processed on machine tools with more than three axes.

**KEYWORDS:** CAD, CAM, virtual machine tools, process planning, machining of complex parts, process simulation and verification, multi-axis machining, flexible manufacturing.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de fresado con herramienta de corte plano es utilizado en la manufactura de gran variedad de componentes, como partes de moldes, prótesis, implantes y álabes, entre otros. Estos componentes se caracterizan por su morfología compleja y por sus exigentes requerimientos de calidad geométrica e integridad superficial [6].

En virtud de las nuevas capacidades computacionales, los sistemas actuales de maquinado asistido por computadora CAM (Compu-

ter Aided Manufacturing) ofrecen potencialidades para el modelado, simulación y verificación tanto del proceso como del sistema completo, que comprende la máquina, herramientas, dispositivos de sujeción y materia prima [12-14]. Estas herramientas son de gran utilidad para complementar la metodología propuesta por Singh. Proporcionan un escenario digital de simulación y verificación integrada, especialmente cuando se maquinan componentes complejos en máquinas CNC.

En las máquinas virtuales, es posible realizar una simulación del proceso de maquinado más precisa. Además de la tradicional simulación de las trayectorias de la herramienta de corte. Es posible detectar la interacción, especialmente las colisiones, con otros componentes del sistema, como los dispositivos de sujeción y medición, material de trabajo, cuerpo de la herramienta, porta herramienta y husillo [15].

En este trabajo se diseñó una pieza experimental compleja, compuesta de superficies con curvatura. La pieza se fabricó con éxito, en un centro de maquinado de tres ejes con control FANUC. Para planear y verificar el proceso, se desarrolló un modelo virtual de la máquina herramienta disponible. Comprobando así, mediante un caso real, las ventajas de utilizar los recientes métodos virtuales. Ofrecidos por varios sistemas de maquinado asistido por computador, para la simulación y verificación del proceso de manufactura. Especialmente cuando se trata de componentes complejos procesados en máquinas de más de tres ejes.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Efecto de la curvatura de una superficie sobre las condiciones de corte en el fresado con herramienta de corte plano:

**1. Creación del espacio de trabajo en CAD:** Para iniciar, es necesario crear un espacio de trabajo en el CAD, utilizando el módulo de Modelado en el software NX. Una vez ahí, se selecciona el plano Top, ya que esto facilitará algunas opciones de mecanizado posteriores.

**2. Definición y extrusión del modelo:** Con ayuda de los planos del modelo a elaborar, se define completamente el perfil. Una vez definido, se extruye según indican los planos para obtener así el modelo final.

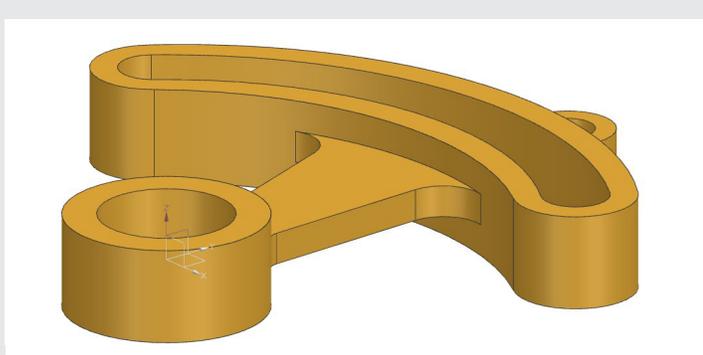


Figura 1. Modelo extruido.  
Fuente: Elaboración propia.

Fue utilizado un centro de mecanizado vertical de tres ejes. El husillo de la máquina alcanza una velocidad de giro máxima de 8000 r.p.m. con 5.5 kW de potencia. El controlador de la máquina es un Fanuc Oi-F con capacidad de controlar un cuarto eje adicional.

**3. Planificación del proceso:** Es importante observar que el proceso de fabricación de este modelo consta de varios pasos. Se detalla el procedimiento de fabricación en una hoja de procesos.

**a) Representación de operaciones de barrenado:** Se elabora un modelo que representa las operaciones de barrenado, utilizando el modelo final para extraer los sketches.

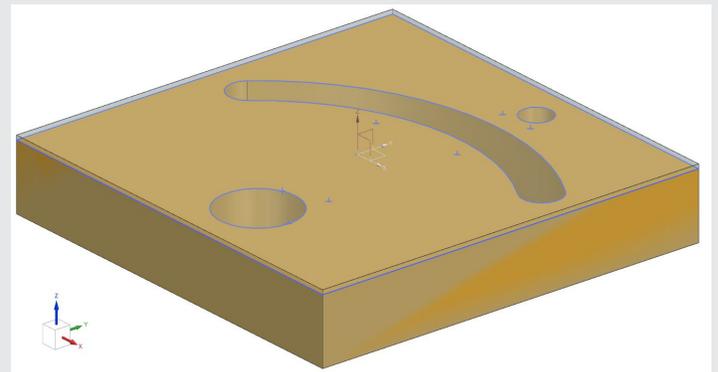


Figura 2. Representación de barrenados.  
Fuente: Elaboración propia.

**b) Definición del perfil del stock o blank:** Se realiza el perfil que conformará la parte a maquinar y la parte final no maquinada.

**c) Extrusión del perfil:** Se procede a extruir el perfil en dirección Z para obtener el blank.

**d) Visualización del modelo final:** Para visualizar de mejor manera el modelo final, se modifica la transparencia de la última operación de extrusión, quedando de la siguiente forma.

**e) Creación del espacio de trabajo en el módulo de manufactura:** Se selecciona la opción de mecanizado de fresado y suboperación Mill\_planar en NX.

**f) Configuración de la operación de mecanizado:** Se identifica la pieza de trabajo y se especifica la pieza a maquinar (Specify Part) y la pieza en bruto (Specify Blank).

**g) Creación de la operación:** Se configuran todos los parámetros necesarios para la operación de maquinado.

**h) Selección del tipo de suboperación:** Se elige Cavity Mill como suboperación y se definen las opciones de tipo de programa, herramienta, geometría y método.

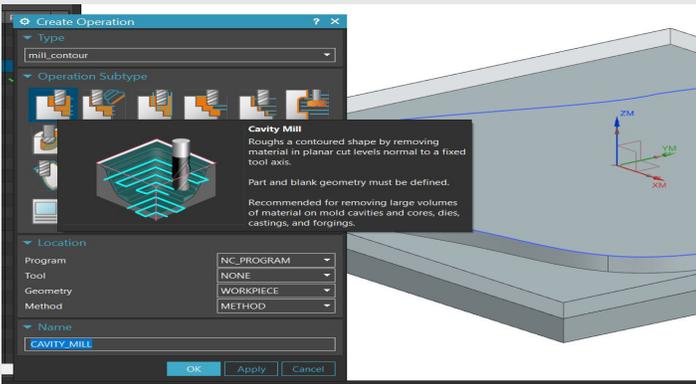


Figura 3. Elección de suboperación.  
Fuente: Elaboración propia.

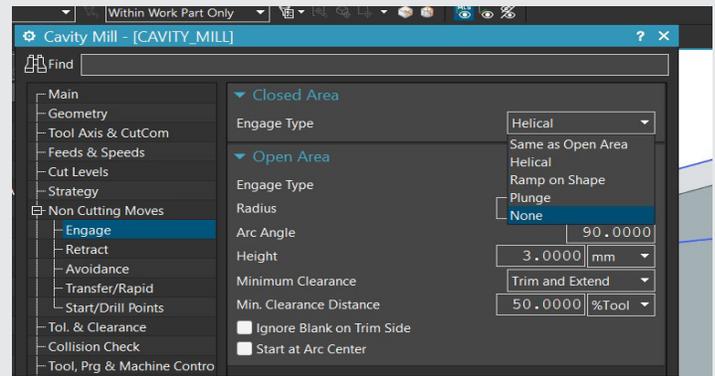


Figura 5. Configuración Movimientos no cortantes.  
Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en este mismo apartado se seleccionan las siguientes opciones:

- Tipo de programa: Program.
- Herramienta: None.
- Geometría: Workpiece.
- Método: Method.

i) Configuración de la herramienta y patrones de corte: Se opta por una herramienta plana de 3 mm con 4 flancos y se configuran los parámetros de corte.

A. Herramienta: En este caso se opta por una herramienta plana de 3 mm con 4 flancos, tal como se muestra a continuación.

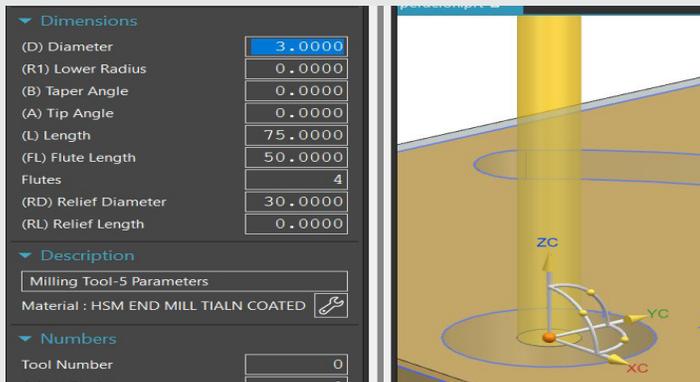


Figura 4. Selección de herramienta.  
Fuente: Elaboración propia.

- B. Patrón de corte: Follow part.
- C. Percent of float diameter: 70%.
- D. Distancia máxima: 2 mm (profundidad que va desbastando por pasada).
- E. Dirección de corte: Climb cut (En la misma dirección que la mesa de trabajo).
- F. Orden de corte: Depth First (primero la profundidad).
- j) Configuración de velocidades y avances: Se asigna una velocidad de corte y se calculan automáticamente las demás velocidades con la ayuda del software.
- k) Configuración de movimientos no cortantes: Se definen los tipos de acercamiento y puntos de inicio y transferencia.

l) Ajustes adicionales de movimientos no cortantes: Se configuran los puntos From Point, Start Point y se selecciona la opción Transfer / Rapid.

m) Ajustes para la última extrusión: Se configura la opción Transfer/Rapid, se selecciona Clearance Option como plane sobre la cara de la última extrusión a 3 mm.

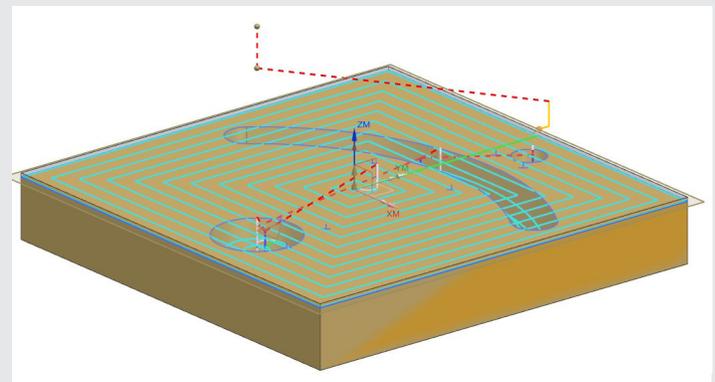


Figura 6. Patrón de corte de bajo relieve.  
Fuente: Elaboración propia.

- n) Generación de la operación: Se selecciona Generate para desarrollar el mecanizado de bajo relieve.
  - o) Validación de la operación: Se verifica la operación generada utilizando la opción Verify y la simulación 3D Dynamic.
  - p) Post procesamiento: Se genera el código de operación y se copia en un archivo .txt para su edición posterior.
4. Trabajo con el Útil-Sujeción: Se trabaja con el modelo útil\_sujeción siguiendo los pasos anteriores.
- a) Elaboración de un ensamble: Se ensamblan los modelos model\_1 y útil\_sujeción, incluyendo componentes adicionales como tornillos y arandelas.
  - b) Ensamble final: Se realiza el ensamble final.

**Nota:** En este paso fue necesario hacer una modificación en el model\_1 ya que se sustrajo el blank que se desbasta en la operación de barrenado. Además, se realizaron barrenados y roscados en el elemento de sujeción.

**g) Generación y validación de la segunda operación:** Se generan y validan las operaciones de maquinado

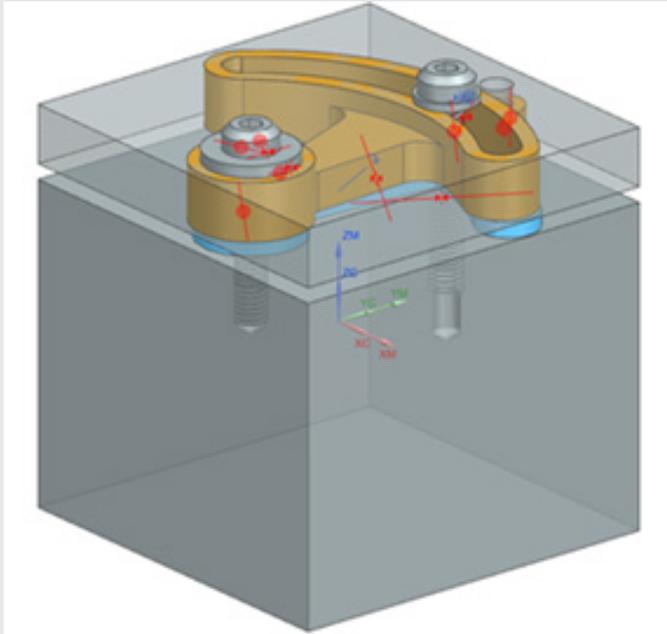


Figura 7. Ensamble Final.  
Fuente: Elaboración propia.

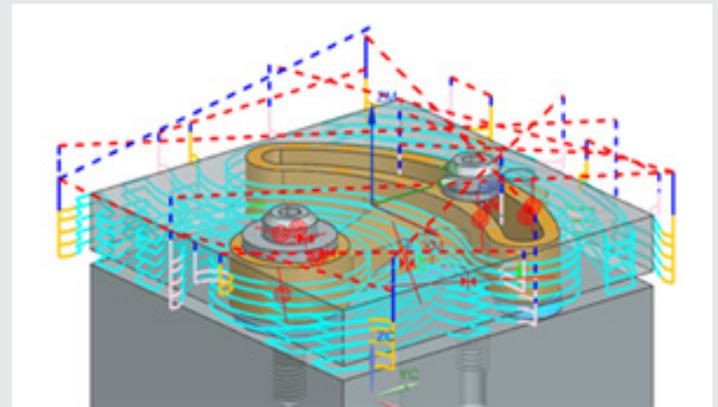


Figura 9. Ensamble Final.  
Fuente: Elaboración propia.

**h) Post procesamiento de la segunda operación:** Se obtiene un código de operación para la segunda operación.

**c) Asignación de Elementos de Sujeción como Checks:** Se seleccionan los elementos de sujeción para evitar operaciones en ellos.

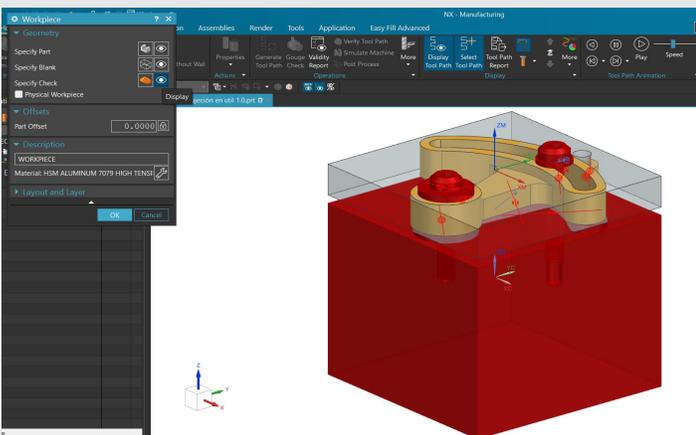


Figura 8. Elementos de Sujeción.  
Fuente: Elaboración propia.

**d) Repetición para la segunda operación de mecanizado:** Se repiten los pasos para configurar la segunda operación de maquinado.

**e) Configuración del menú Main para la segunda operación:** Se elige una herramienta plana de 5 mm con 4 flancos y se configuran los parámetros de corte.

**f) Configuración de Velocidades, Avances y Movimientos No Cortantes:** Se repiten los pasos anteriores para configurar estos parámetros en la segunda operación.

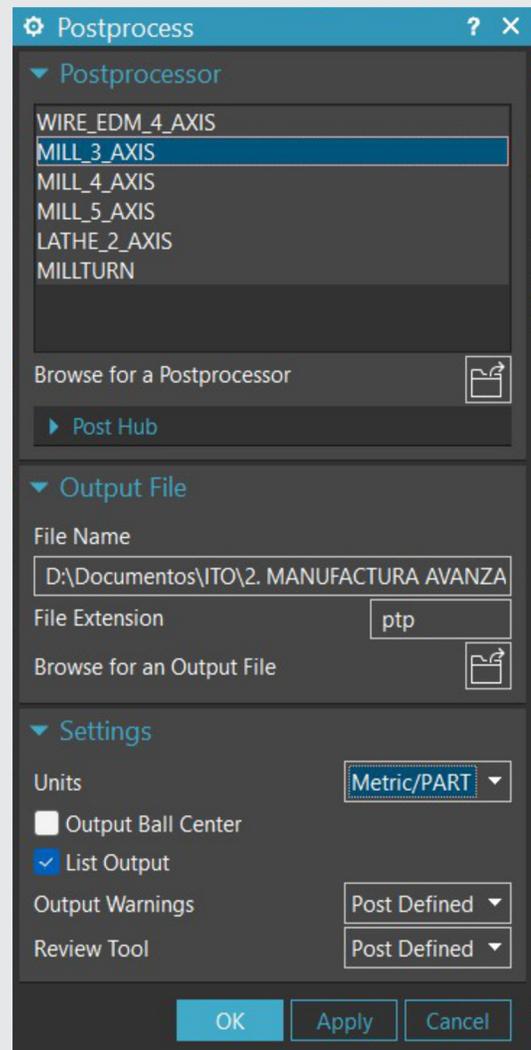


Figura 10. Parámetros de post procesamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

i) **Preparación para el movimiento manual:** Se elabora un modelo para el movimiento manual del material faltante.

Se eliminan bloques repetitivos como: T00, M6, G17, H0, G94, G43.

j) **Ensamble y configuración para la última operación de desbaste:** Se ensambla y configura la última operación de desbaste.

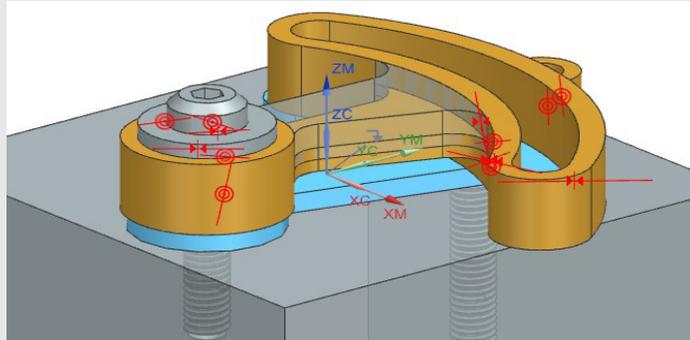


Figura 11. Ensamble de última operación de desbaste. Fuente: Elaboración propia.

k) **Configuración final y generación de la última operación:** Se configuran los parámetros finales y se genera la operación.

**A. Configuración sobre el eje Z:** Configurar el From Point y el Start Point, sobre el eje Z a una distancia de 20 mm.

**B. Configuración de la última extrusión:** Configurar la opción Transfer/Rapid en donde se selecciona Clearance Option a 3 mm plano seleccionado.

**C. Nivel máximo de maquinado:** Configurar Cut Levels, se contempla el nivel de 2.5 mm.

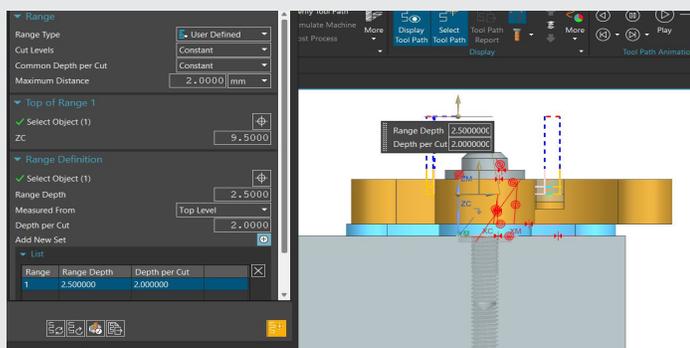


Figura 12. Niveles de maquinado. Fuente: Elaboración propia.

**D. Generación de la última operación:** Seleccionar la opción Generate seguido de Verify y 3D Dynamic.

i) **Postprocesamiento de la última operación:** Se obtiene el código final de operación.

**A. Edición del encabezado del programa:** Asignar nombre y establecer una estructura como se muestra a continuación:

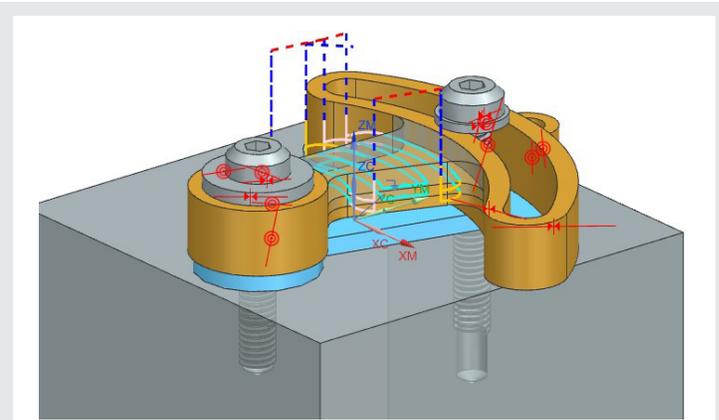


Figura 13. Patrones de corte de última operación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Códigos de encabezado de programa

Código	Descripción
O0001	Nombre del código
N10 G21 G54 G90	Selección de unidades métricas, Sistema de coordenadas de trabajo 1, Programación en costas absolutas
N12 M03 S2500 F150	Encender el husillo en sentido horario, Velocidad del husillo y Velocidad de avance
N13 G28 Z0 N14 G28 X0 N15 G28 Y0	Retorno en posición Z0 Retorno en posición X0 Retorno en posición Y0

Fuente: Elaboración propia.

**B. Edición del pie de página:** Después del último bloque de operación de desbaste, se sigue la siguiente estructura.

**5. Modelado y simulación virtual de la máquina y del montaje tecnológico:** Se validan el código .txt usando un simulador comercial; con el módulo FANUC OiM.

Tabla 2. Códigos de pie de página del programa

Código.	Descripción.
N10764 G28 Z0	Retono en posición Z0
N10765 G28 Y0	Retono en posición X0
N10766 G28 X0	Retono en posición Y0
N1076 M5	Apagar el husillo.
N10768 M30	Fin del programa con reset

Fuente: Elaboración propia.

**a) Ambiente del simulador:** se cierra la puerta virtual y se quita el paro de emergencia.

**b) Colocación de la materia prima:** Seleccionar menú Workpiece >> Stock Size y las dimensiones de la placa 50 mm de largo, 50 mm de ancho y 50 mm de espesor

c) **Selección de la herramienta:** se selecciona el menú Machine operation >>Tool Management, herramienta plana de 4 mm de diámetro con 4 flancos.

d) **Definición de cero piezas:** Seleccionar posicionamiento rápido, después la opción Off setting >> Work, asignando: X0 >> measure, Y0 >> measure y Z0 >> measure.

e) **Inserción del código en el simulador:** Seleccionar el modo Edit >>Select file y se inserta el código denominado como O3001.

f) **Verificación de cero piezas:** Verificar el cero pieza con el modo Program, seguido de MDI y se escriben los códigos: G54 X0 Y0; G54 Z0.

g) **Ejecución del programa:** el programa y se observan los resultados.

## RESULTADOS

Se diseñó y fabricó una pieza experimental con superficies curvas, demostrando la efectividad del fresado CNC con herramientas CAD-CAM, en un sistema de manufactura flexible. Se diseñó un dispositivo de sujeción específico y se implementó una máquina virtual que simuló con precisión el proceso de manufactura. La pieza final se maquinó en material polimérico. Se cumplieron las especificaciones establecidas.

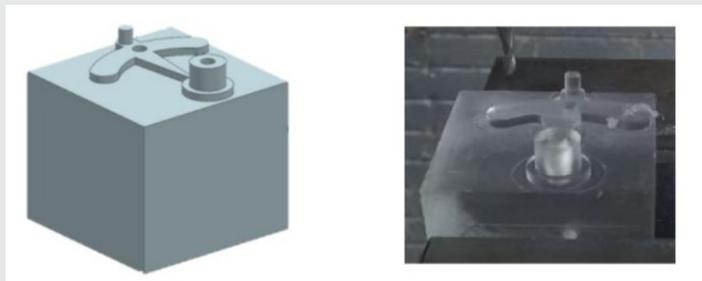


Figura 14. Fixture-Placa de ranura curva.  
Fuente: Elaboración propia.

Se implementó una máquina virtual, homóloga en características geométricas, cinemáticas y de controlador de trayectorias. Dicho centro de mecanizado vertical, permitió simular el proceso de manufactura. Se verificó su correcto desempeño, antes de realizar el montaje en el laboratorio. Se ejecutó el proceso de maquinado en el centro de maquinado vertical, obteniendo una pieza con las especificaciones establecidas. Las imágenes muestran la parte maquinada en material polimérico.

Se diseñó un dispositivo específico, para la sujeción de la materia prima al centro de mecanizado. Se cumplió con características funcionales de rigidez, precisión y rapidez de montaje. Se evitaron los elementos o componentes que causaran interferencias, con las herramientas durante el proceso de fresado.

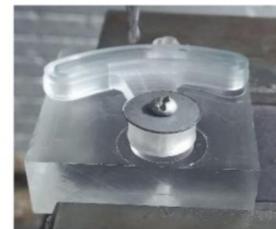


Figura 15. Pieza de ranura curva.  
Fuente: Elaboración propia.

Se estableció el diseño de una pieza experimental, que contiene superficies con curvaturas. Se manufacturó en un centro de mecanizado vertical de tres ejes. La información generada, sirve como referente para estudios de fresado, con herramientas de corte plano en máquinas de control numérico.

## CONCLUSIONES

Este estudio confirmó las ventajas de utilizar métodos virtuales para la simulación y verificación en el fresado CNC de componentes complejos. La metodología desarrollada, es adaptable a otros modelos y es especialmente útil para la manufactura de componentes de morfología constructiva compleja en máquinas CNC multiejes.

La metodología empleada para la elaboración del modelo anterior, contiene los principios necesarios para implementar en cualquier otro proceso; es decir, se puede adoptar a cualquier otro modelo (con algunas ligeras modificaciones).

Las estrategias de maquinado se constituyen a partir de las operaciones, herramientas y parámetros de corte y están en función de las características morfológicas de la pieza a fabricar.

Para la manufactura de componentes de morfología constructiva compleja, en máquinas CNC, es de notable utilidad el desarrollo de simulaciones digitales con elevado realismo, que permitan verificar las condiciones de proceso y de montaje, debido a los altos costos de la tecnología CNC asociada, de las herramientas de corte y de los materiales de trabajo de alto desempeño generalmente maquinados en estas aplicaciones.

El procedimiento desarrollado, servirá como fundamento para la planificación de procesos de manufactura en otras máquinas multiejes como; centro de maquinado vertical de 5 ejes TOP ONE FA-650 Control SIEMENS SINUMERIK 840D-SL.

Los resultados presentados en este artículo se pueden explotar aún más en el proceso industrial y académico, así como en la impartición de cursos para el uso y aplicación de máquinas CNC en la práctica técnica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dubovska, R., Jambor, J., & Majerik, J. (2014). Implementation of CAD/CAM System CATIA V5 in Simulation of CNC Machining Process. En *Procedia Engineering* (Vol. 69, pp. 638-645). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.037>.
- [2] Mauthner, G., Hoffmann, M., Plessing, L., Trautner, T., & Bleicher, F. (2023). Industry-Oriented System Architecture for Feature-Based Data Management in CNC Machining Processes. En *Procedia CIRP* (Vol. 118, pp. 157-162). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.028>.
- [3] García-Barbosa, J., Arroyo-Osorio, J., & Córdoba-Nieto, E. (2014). Planificación del proceso de fresado de una pieza compleja utilizando una máquina herramienta virtual. *Ingeniería Mecánica*, 17(3), 281-287. [fecha de Consulta 12 de enero de 2024]. ISSN: Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225132611007>.
- [4] Reis, R. C., Kokare, S., Oliveira, J., Matias, J. C., & Godina, R. (2023). Life cycle assessment of metal products: A comparison between wire arc additive manufacturing and CNC milling. En *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* (Vol. 6, p. 100117). <https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100117>.
- [5] Dodok, T., Čuboňová, N., Císar, M., Kuric, I., & Zajačko, I. (2017). Utilization of Strategies to Generate and Optimize Machining Sequences in CAD/CAM. En *Procedia Engineering* (Vol. 192, pp. 113-118). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.020>.
- [6] Cifuentes Gómez, A. F., & Cordoba Nieto, E. (2020). Influence of dynamic geometric parameters on multi-axis machining processes. En *DYNA* (Vol. 87, Números 215, pp. 214-220). <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.90417>.
- [7] Ezugwu, E. O. y Wang, Z. M. "Materials Titanium alloys and their machine ability - A review". *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, vol. 68, p. 262-274. ISSN 0924-0136. DOI 10.1016/S0924-0136(96)00030-1.
- [8] Moriwaki, T. "Multi-functional machine tool". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008. vol. 57, n.º. 2, p. 736-749. ISSN 0007-8506. DOI 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
- [9] Quinsat, Y., Lavernhe, S. y Lartigue, C. "Characterization of 3D surface topography in 5-axis milling". *Wear*. 2011, vol. 271, n.º. 3-4, p. 590-595. ISSN 0043-1648. DOI 10.1016/j.wear.2010.05.014.
- [10] Becze, C. E., Clayton, P. y Chen, L. "High-speed five-axis milling of hardened tool Steel". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, vol. 40, n.º. 6, p. 869-885. ISSN 0890-6955. DOI 10.1016/S0890-6955(99)00092-9.
- [11] Singh, N. *Systems Approach to Computer - Integrated Design and Manufacturing*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996. ISBN 0-471-58517-3.
- [12] Kadir, A. A., Xu, X. y Hämmerle, E. "Virtual machine tools and virtual machining-A technological review". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011, vol. 27, n.º. 3, p. 494-508. ISSN 0736-5845. DOI 10.1016/j.rcim.2010.10.003.
- [13] Altintas, Y., Brecher, C. y Weck, M. "Virtual Machine Tool". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2005, vol. 54, n.º. 2, p. 115-138. ISSN 0007-8506. DOI 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.
- [14] Kadir, A. A. y Xu, X. "Towards High-Fidelity Machining Simulation". *Journal of Manufacturing Systems*. 2011, vol. 30, n.º. 3, p. 175-186. ISSN 0278-6125. DOI 10.1016/j.jmsy.2011.04.004.
- [15] Altintas, Y., Kersting, P. y Biermann, D. "Virtual process systems for part machining operations". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014, vol. 63, n.º. 2, p. 585-605. ISSN 0007-8506. DOI 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
- [16] Radzevich, S. *Kinematic Geometry of Surface Machining*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-1-4200-6340-0.
- [17] Lasemi, A., Xue, D. y Gu, P. "Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review". *Computer-Aided Design*. 2010, vol. 42, n.º. 7, p. 641-654. ISSN 0010-4485. DOI 10.1016/j.cad.2010.04.002.
- [18] Azzam, N., Chaves-Jacob, J. y Boukebbab, S. "Adaptation of machining tool path to distorted geometries: application to remove a constant thickness on rough casting prosthesis". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 72, p. 1073-1083. ISSN 0268-3768. DOI 10.1007/s00170-014-57.