

# Módulo autobloqueante para el cambio automático de herramientas

## *Self-locking module for automatic tool change*

Carlos Sánchez López<sup>1</sup> , Andrea Yoselin Castillo Rojo<sup>1</sup>, Alejandra Ibeth García Castañón<sup>1</sup> , Juan Gabriel Reyes Ramírez<sup>1</sup>, José de Jesús Martínez Prieto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Metal-Mecánica. Aguascalientes, Ags., México

### RESUMEN

Los dispositivos de cambio automático de herramientas (CAH) son componentes esenciales en diversas industrias, particularmente en los procesos de fabricación con manufactura de alta tecnología. La presente investigación tiene como objetivo facilitar el cambio automático de herramientas en máquinas que permitan dos o más procesos de fabricación conocidas como máquinas híbridas. Se analizaron dispositivos de almacenamiento y cambio automático de herramientas en máquinas de control numérico y en impresoras 3D. Se evaluaron los procesos de mecanizado CNC, la impresión 3D, el grabado con láser, el plóter de corte y el plóter de dibujo. Se consideró también la similitud de la cinemática en el cambio de herramientas a través del tipo de los elementos de unión. Tomando como variables de diseño la geometría y las dimensiones generales de cada una de las herramientas de los procesos seleccionados, se logró que los diversos portaherramientas se puedan colocar en un mismo dispositivo de sujeción. Como resultado, se obtuvo la propuesta de un módulo autobloqueante que permite la carga y descarga de herramientas que se utilizan en los procesos previamente citados. El módulo permite prescindir de un actuador para la sujeción y liberación de las herramientas, aunque por el momento está en etapa de prueba para herramientas de bajo peso.

**PALABRAS CLAVE:** manufactura híbrida; cambio automático de herramientas; Manufactura Sustractiva; Manufactura Aditiva.

### ABSTRACT

Automatic tool change (ATC) devices are essential components in various industries, particularly in manufacturing processes with high-tech manufacturing. The present research aims to facilitate automatic tool change in machines that allow two or more manufacturing processes known as hybrid machines. Automatic tool storage and change devices were analyzed in numerical control machines and 3D printers. CNC machining processes, 3D printing, laser engraving, cutting plotter and drawing plotter were evaluated. The similarity of the kinematics in tool change through the type of joining elements was also considered. Taking as design variables the geometry and general dimensions of each of the tools of the selected processes, it was achieved that the various tool holders can be placed in the same clamping device. As a result, the proposal of a self-locking module was obtained that allows the loading and unloading of tools used in the previously mentioned processes. The module makes it possible to dispense with an actuator for clamping and releasing the tools, although it is currently in the testing phase for low-weight tools.

**KEYWORDS:** hybrid manufacturing; automatic tool change; Subtractive Manufacturing; Additive Manufacturing.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Carlos Sánchez López  
**INSTITUCIÓN:** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Metal-Mecánica  
**DIRECCIÓN:** Av. Adolfo López Mateos núm. 1801, frac. Bona Gens, C. P. 20256, Aguascalientes, Ags. México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** carlos.sl@aguascalientes.tecnm.mx

**Fecha de recepción:** 21 de mayo de 2024. **Fecha de aceptación:** 17 de septiembre de 2024. **Fecha de publicación:** 27 de septiembre de 2024.



## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tendencia en la manufactura avanzada es aprovechar las ventajas de la manufactura sustractiva (SM, por sus siglas en inglés) o procesos en donde se elimina material a la materia prima, así como las que otorga la manufactura aditiva (AM) o impresión en 3D aportando al surgimiento de la manufactura híbrida (HM) que incluye el uso de dos o más procesos de fabricación en una sola máquina, lo que ha dado como resultado la fabricación de máquinas híbridas. De acuerdo con Zhu [1], los procesos de manufactura híbridos se clasifican como sigue: manufactura sustractiva híbrida, transformación híbrida, aditiva híbrida, sustractiva + aditiva, sustractiva + ensamble y aditiva + transformativa.

En el trabajo de Altiparmak *et al.* [2] se describe el estado del arte del uso de la AM en la industria aeroespacial, utilizando aleaciones de aluminio de alta resistencia; se señala que en las últimas dos décadas los procesos de AM se han generalizado en la fabricación de componentes geoméricamente complejos, siendo uno de sus principales campos de aplicación la industria aeroespacial; se abordan los inconvenientes y limitaciones de la manufactura convencional SM y AM, y se concluye que, como desarrollo futuro, los procesos de manufactura aditiva híbrida (HAM) podrán utilizarse a gran escala en piezas compuestas de multimateriales en diferentes secciones de componentes aeroespaciales. Estos procesos híbridos también podrán integrarse dentro de la industria 4.0.

En el trabajo de Dilberoglu *et al.* [3] se describe que en la fabricación de prototipos rápidos con termoplásticos como Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA) se presentan problemas de apariencia y resistencia que se incrementan debido a distorsiones por contracción térmica, efectos escalera y rebabas en la estructura de los soportes; se indica que aún no se pueden remediar los problemas actuales sin la sinergia de los procesos híbridos y se concluye que la combinación de la MA con otros procesos abre nuevas posibilidades para superar los inconvenientes actuales.

En el estudio de Sebbe *et al.* [4] se describe una amplia revisión bibliográfica sobre los métodos de fabricación aditiva, así como de procesos de mecanizado, estudiando la integración aditiva-sustractiva, con el fin de analizar los recientes desarrollos en este campo. En este trabajo se concluye que la fabricación híbrida ha

adquirido gran protagonismo, aportando muchas ventajas a la industria moderna, y que tendrá que existir una mayor integración de conocimientos entre quienes desarrollan los productos y quienes los hacen posibles mediante la programación y el funcionamiento de los equipos híbridos.

En complemento, los dispositivos de cambio automático de herramientas (ATC) son componentes esenciales en diversas industrias, particularmente en los procesos de fabricación. Estos dispositivos desempeñan un papel crucial en la mejora de la eficiencia, la reducción del tiempo de inactividad y el aumento de la productividad general. Las áreas que proporcionan las bases de su importancia y evolución se pueden resumir en los siguientes contextos, sin dejar de lado la posibilidad de incluir otras perspectivas:

- Integración en la automatización avanzada.
- Detección y monitoreo inteligentes de las herramientas.
- Cambios de herramienta rápidos y precisos.
- Sistemas de identificación de herramientas mediante identificación por radiofrecuencia (RFID) o tecnologías similares.
- Interfaces amigables e intuitivas
- Flexibilidad de adaptación a diversos tamaños y cantidades de herramientas.

En el trabajo de Tayal [5] se describe el desarrollo de un portaherramienta con un mecanismo de autocentrado que corrige virtualmente cualquier cambio o movimiento que puede afectar la precisión de la sujeción de la herramienta. El mecanismo es modular y permite sujetar cualquier tipo de herramientas, pero necesita que se aplique presión en el eje Z para que funcione correctamente, lo cual se logra mediante un servo que gira hacia arriba para bloquear la sujeción.

En el trabajo de la empresa E3D [6] se describe la atención en la impresión 3D con multimateriales, identificando estas tres principales situaciones: a) colocar dos o más boquillas en un solo eje, b) utilizar más de un material en una sola boquilla y c) colocar dos o más boquillas en ejes independientes, reduciendo el volumen de impresión y adicionando actuadores para el funcionamiento independiente de cada eje adicional. También se diseñó e implementó un sistema de cambio automático de 4 fusores (*hotends*) en una impresora 3D.

En el trabajo de Riley <sup>[7]</sup> se describe la configuración de la programación para el cambio de extrusores de manera automática en una impresora 3D Voron Trident con 4 extrusores. El sistema electromecánico para el cambio de las herramientas se realiza mediante un actuador cuyo eje se reduce a una geometría T que embona en una ranura en la placa de sujeción y está basado en el sistema desarrollado en <sup>[6]</sup>.

En el trabajo de Kramer <sup>[8]</sup> se describe un sistema para el cambio de extrusores en una impresora 3D como solución a la impresión con multimateriales en impresoras caseras o de oficina, utilizando desarrollos y tecnología de código abierto para acoplar cinemáticamente de manera individual hasta cuatro *hotends*. La dinámica del cambio es similar a las utilizadas en <sup>[5]</sup> y <sup>[6]</sup>, así como en la impresora Voron Trident.

En el trabajo de Cockfield <sup>[9]</sup> se describe que Will Hardy desarrolló un sistema de cambio de *hotends* utilizando electromagnetismo, con un mecanismo a prueba de fallas que evita que la herramienta se caiga del cabezal de la impresora en caso de un corte de energía, y que todavía se encuentra en la fase de prototipo y se necesita trabajar en el software para perfeccionar su funcionamiento y hacerlo adecuado para usos más generales.

En el trabajo de Mourtzis *et al.* <sup>[10]</sup> se describe que en la industria 4.0 se ha presentado un gran movimiento de las líneas tradicionales de fabricación al uso de celdas robóticas reprogramables y reconfigurables. Ahí se reconoce la habilidad para que un robot realice diferentes tareas y depende del efector final que pueda utilizar, se consideró crucial que los robots tengan un sistema eficiente para el cambio de las herramientas. También, se propone un novedoso sistema de cambio automático, cuyas especificaciones y diseño se basa en análisis de elemento finito, concepto que se sustenta en las especificaciones del robot colaborativo UR10.

En el trabajo de Dejan <sup>[11]</sup> se describe un plóter de dibujo (DIY Pen Plotter) con un sistema de cambio automático de plumones, facilitando realizar dibujos en 2D a colores. La cinemática del plóter se basa en 3 grados de libertad lineales para el desplazamiento en los ejes X, Y y Z, actuados con motores NEMA 17, y en complemento, la sujeción y liberación de los plumones se realiza con un servomotor SG 90. El mecanismo presentado por Dejan funciona de manera similar al propuesto en <sup>[6]</sup>.

En el trabajo de Engberg *et al.* <sup>[12]</sup> se describe la construcción de una bioimpresora de código abierto, que permite una variedad de tareas incluida la bioimpresión FRESH, así como, las impresiones con multimateriales y la extrusión de biotintas cargadas de células. El cambio de extrusor y el sistema de movimiento se basa en el sistema de cambio de herramienta desarrollado en <sup>[6]</sup>.

## II. METODOLOGÍA

La presente investigación se basó en el flujo del proceso del diseño de nuevos productos, partiendo de la necesidad de obtener un dispositivo para el cambio automático de herramientas para una máquina híbrida que incluya cinco procesos de fabricación. Las limitaciones potenciales radican en la disponibilidad de datos técnicos de los procesos seleccionados, lo cual se manejó escogiendo aquellos de los cuales se tiene acceso directo mediante las máquinas y sus herramientas.

El procedimiento general incluye lo siguiente: a) seleccionar los procesos de fabricación, b) identificar la similitud en la cinemática del cambio de herramientas, c) contrastar las geometrías y dimensiones generales de las herramientas de cada proceso, d) diseñar un dispositivo para la sujeción, e) diseñar el mecanismo que garantice su cambio y f) obtener la propuesta del dispositivo para el cambio automático de estas.

Los métodos utilizados se basan en el método deductivo directo, que permite obtener premisas comprobadas que incluyan la diferencia de movimientos, geometrías y dimensiones, así como el método lógico-deductivo, con base en que se conocen los principios de cambio de herramientas que existen en la actualidad. La descripción de lo realizado se resume en los apartados Cinemática del proceso, Portaherramientas y Cambio de herramienta.

### A. CINEMÁTICA DEL PROCESO

En esta etapa se evaluó la cinemática del cambio, manual y automáticamente, en los procesos de mecanizado CNC, la impresión 3D, el grabado láser de diodo, el plóter de corte y el plóter de dibujo. Como resultado, se identificó que las máquinas de dichos procesos sustentan los desplazamientos de las herramientas respectivas en el mismo tipo de cinemática. La [Tabla 1](#) muestra que prevalece el uso de juntas prismáticas de deslizamiento lineal.

TABLA 1  
TIPO DE JUNTA CINEMÁTICA EN LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

EJE	PROCESO DE FABRICACIÓN				
	CNC	3D	LÁSER	CORTE	DIBUJO
X	P	P	P	P	P
Y	P	P	P o R	P o R	P o R
Z	P	P	NA	NA	NA
A	R	R	NA	NA	NA
B	R	R	NA	NA	NA

P: prismática; R: revoluta; NA: no aplica.

El cambio de las herramientas implica la posición y orientación del dispositivo de sujeción en el almacén de las herramientas y se puede modelar utilizando los parámetros Denavit-Hartenberg [13], [14] y aplicando matrices de transformación homogénea para un sistema de cinco grados de libertad, tres lineales y dos rotacio-

nales. Considerando como variables de estudio el tipo de junta o unión cinemática, ya que permite identificar si el desplazamiento es lineal o rotacional, así como la distancia entre las uniones. Con estas variables se puede identificar la posición y la orientación del dispositivo de sujeción.

### B. PORTAHERRAMIENTAS

El diseño del portaherramientas se basa en la geometría externa de las herramientas que debe sujetar. En este estudio se recurrió a las utilizadas en máquinas de escritorio o didácticas. La Figura 1 muestra las utilizadas en este trabajo: a) para el mecanizado CNC (cortador), b) para impresión 3D (extrusor), c) para el grabado láser de diodo (láser), d) para el plóter de corte (cuchilla) y e) para dibujo 2D (pluma). Las variables de estudio son la geometría externa (cilíndrica o prismática) y sus dimensiones generales (diámetro, largo, ancho, espesor).

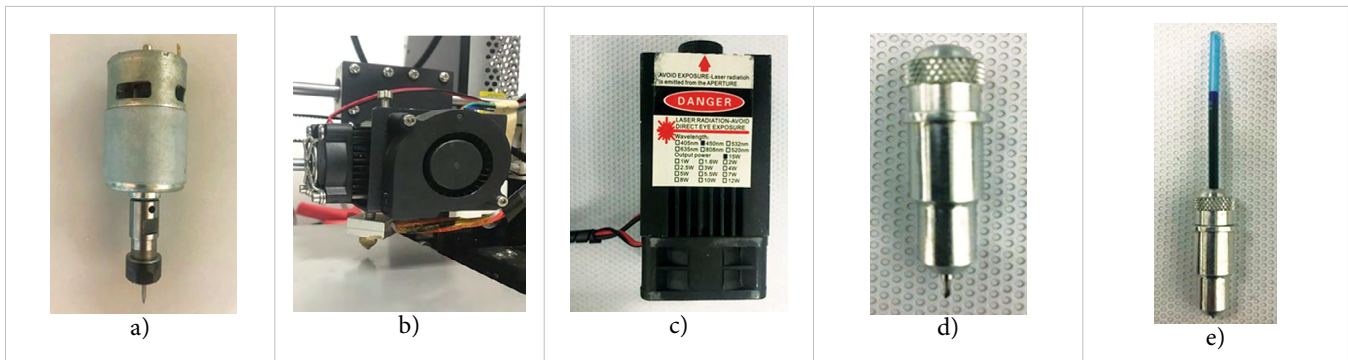


Figura 1. Herramientas: a) para mecanizado CNC, b) para impresión 3D, c) para grabado láser de diodo, d) para plóter de corte y e) para dibujo 2D.

La geometría general de las herramientas agrupa a tres de ellas del tipo cilíndrica, mientras que las otras dos son de tipo prismática. Aunado a lo anterior, se observaron diferencias en dimensiones, peso, materiales y fuente de accionamiento, información que se resume en la Tabla 2.

TABLA 2  
VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL PORTAHERRAMIENTAS

HERRAMIENTA	GEOMETRÍA	DIMENSIONES (mm)			
		D	L	A	E
Cortador	Cilíndrica	21	68.7	---	---
Extrusor	Prismática	---	67	47	41.5
Láser	Prismática	---	73.5	32.6	32.6
Cuchilla	Cilíndrica	12.7	41.6	---	---
Pluma	Cilíndrica	12	40	---	---

D: diámetro; L: longitud; A: ancho; E: espesor.

### C. CAMBIO DE HERRAMIENTA

A través del análisis del funcionamiento de los dispositivos ATC que actualmente se emplean en los procesos seleccionados, se identificó que para sujetar o soltar las herramientas se hace uso de alguno de los siguientes medios: un actuador adicional que proporcione un movimiento rotacional, mecanismos actuados con aire comprimido o electromagnetismo.

Después de identificar dicho requerimiento se procedió a establecer la meta de encontrar una opción que permitiera eliminar la necesidad del actuador adicional para sujetar y soltar las herramientas. Para lo anterior, se realizaron análisis de mecanismos autobloqueantes, de cierre de empuje y de bloqueo deslizante y, enseguida, se procedió a sintetizar un mecanismo para sujetar o soltar sin recurrir al uso de algún tipo de actuador.



### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la cinemática del proceso, se partió de un sistema de 5 grados de libertad empleando tres de traslación y dos de rotación. Al relacionar la cinemática de la máquina híbrida con la cinemática del cambio de herramientas, se obtuvo como resultado que esta se puede resolver dividiendo el modelo cinemático en dos sistemas uno de 2 grados de libertad rotacionales y otro de 3 grados de libertad lineales, sistemas que se pueden resolver por separado facilitando la orientación y la posición correcta de la placa portaherramientas.

Al analizar las restricciones geométricas, dimensionales, de peso y requerimientos de accionamiento de las herramientas seleccionadas en este proyecto, se logró un diseño modular tipo L. La Figura 2 muestra el concepto de la sección horizontal del portaherramientas, la cual permite sujetar un cortador para mecanizado..

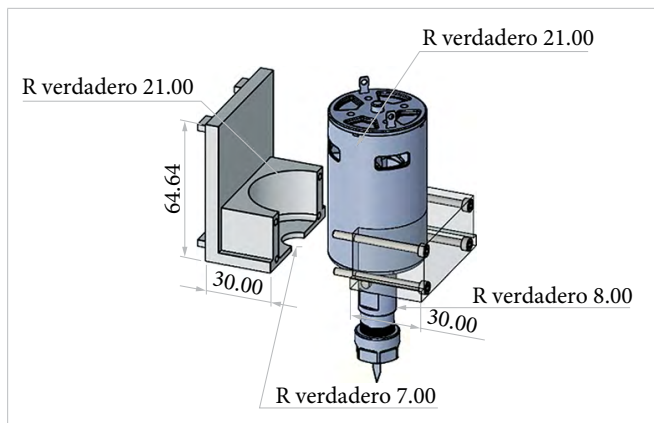


Figura 2. Portaherramientas para mecanizado CNC.

En la Figura 3 se evidencia el concepto de la sección lateral donde, sin importar el tipo de herramienta, pueda colocarse en una única base localizada en la máquina híbrida. Además, el concepto de la base portaherramientas se muestra en la Figura 4.

En lo concerniente al mecanismo para sujetar y soltar las herramientas, en la solución de [5] se hace uso de una base modular con guías para restringir los grados de libertad al ensamblarse con una base similar localizada en el portaherramientas, mientras que para sujetar y soltar se emplea un servomotor. En la propuesta de [6] se parte de un diseño similar al presentado por [5] con la restricción de que lo aplicaron únicamente en impresoras 3D para intercambiar entre 4 *hotends*. Por otra parte, en [7] y [8] se describen sistemas para el cam-

bio de herramientas similares al desarrollado en [6]. En cualquiera de las soluciones anteriores se hace uso de un servomotor para realizar la sujeción o liberación. En otros casos, el funcionamiento del mecanismo para sujetar o soltar los portaherramientas se lleva a cabo utilizando aire comprimido o mediante algún dispositivo electromagnético.

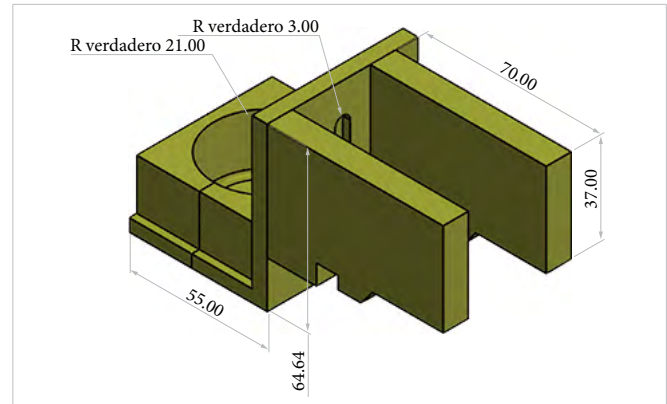


Figura 3. Sección modular del portaherramientas.

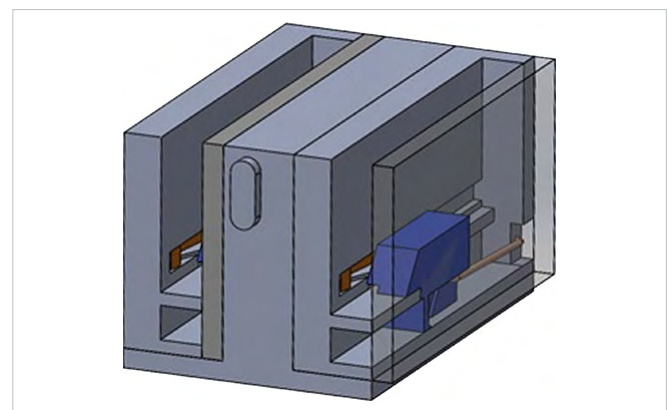


Figura 4. Base portaherramientas.

En este trabajo se tiene como resultado el diseño conceptual de un dispositivo para el cambio automático de herramientas aplicando el funcionamiento de los mecanismos autobloqueantes, de cierre de empuje y de bloqueo deslizante. Para el funcionamiento del mecanismo se aprovechó la dinámica de la máquina híbrida.

Para la selección de una herramienta se recurrió al diagrama de flujo de la Figura 5. Después de seleccionar la herramienta a sujetar, representada en la Figura 6, la base (Figura 4) se desplaza para ensamblarse en la sección modular del portaherramientas, activándose el mecanismo autobloqueante quedando ambas unidas, como se muestra en la Figura 7. Luego se retira del almacén para proceder a su uso (Figura 8).

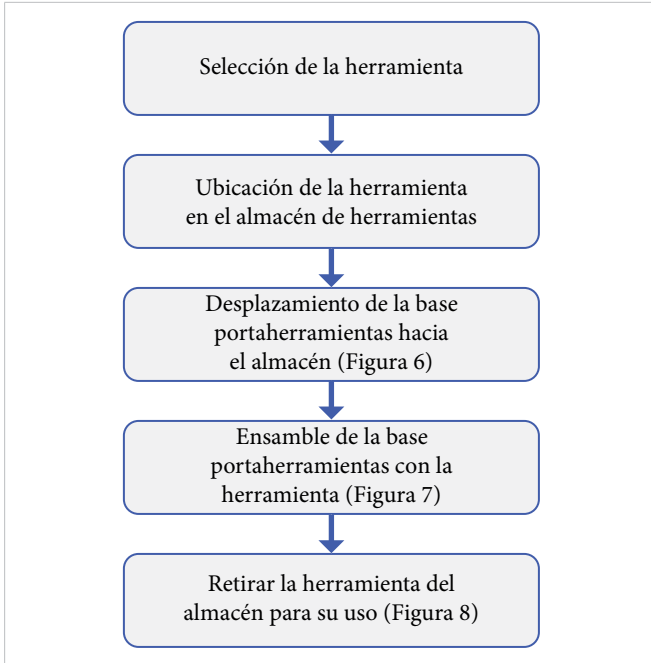


Figura 5. Secuencia para la sujeción de la herramienta.

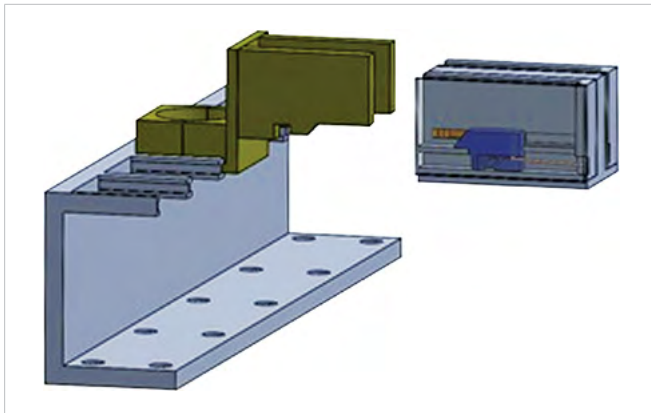


Figura 6. Selección del portaherramientas.

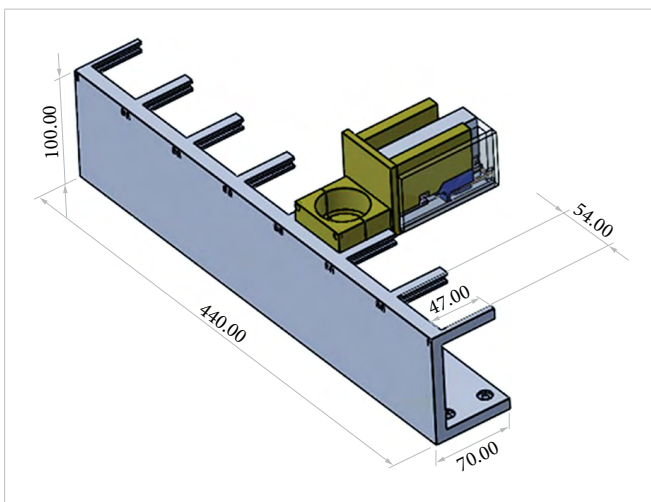


Figura 7. Sujeción de un portaherramientas.

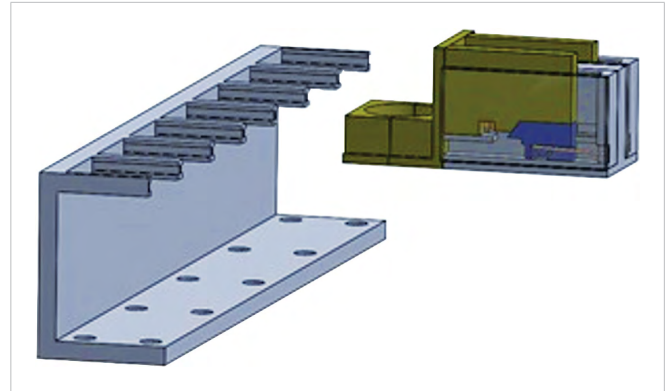


Figura 8. Uso del portaherramientas.

Al dejar una herramienta en el almacén se utiliza la secuencia presentada en la Figura 9, la cual se ejemplifica en la Figura 10. Para esto debe ejecutarse la instrucción de cambio de herramienta, y a) se elige un casillero libre en el almacén, b) se desplaza el conjunto sección modular-portaherramientas hasta liberar la base portaherramientas, c) se inicia el retiro de la base y d) se deja el portaherramientas en el almacén.

El mecanismo desarrollado funciona de manera similar a un botón liberador (*push button*). La principal ventaja de este mecanismo es que permite sujetar o soltar el portaherramientas sin necesidad de algún actuador adicional, como el uso de servomotores, electromagnetismo o aire comprimido.

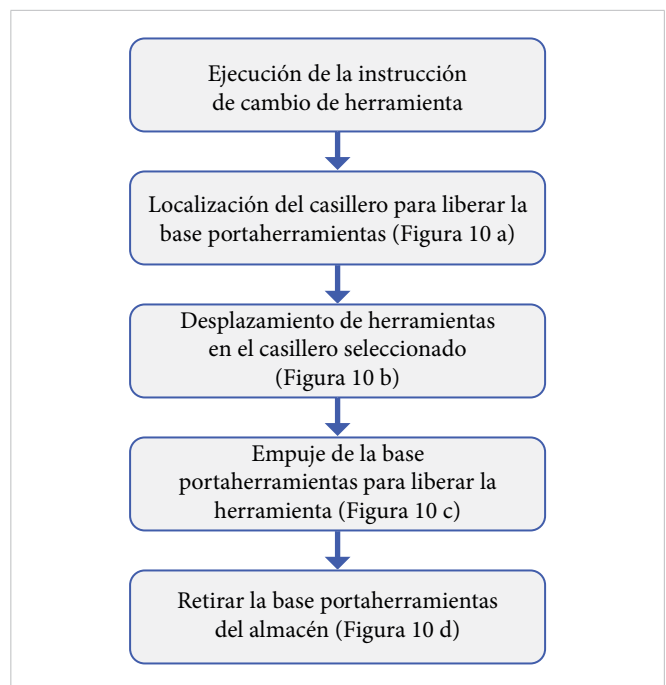


Figura 9. Secuencia para la liberación de la herramienta.

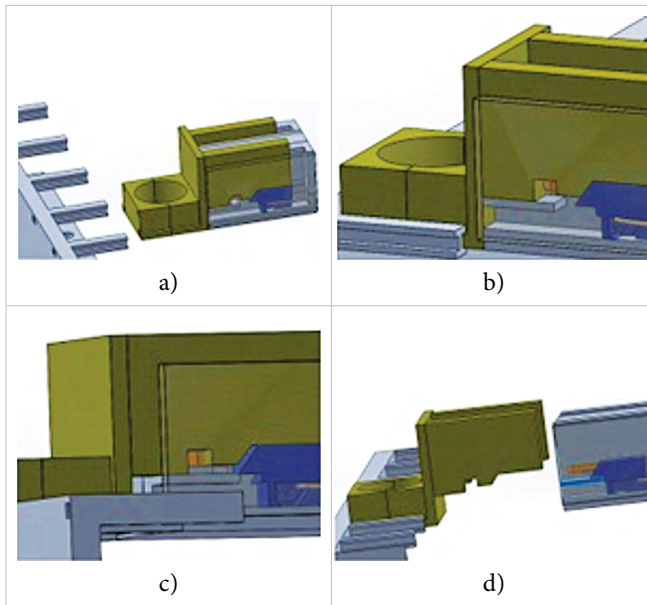


Figura 10. Secuencia para dejar la herramienta en el almacén.

#### IV. CONCLUSIONES

De acuerdo al enfoque del trabajo desarrollado, los procesos seleccionados permitieron establecer el contexto de manufactura híbrida. El análisis de la cinemática en dichos procesos favoreció identificar la similitud en el cambio de las herramientas. Asimismo, se identificó que la solución a la cinemática inversa para colocar el portaherramientas en la localización adecuada para el cambio de cada una se puede resolver vía programación o a través de software de código abierto.

Las variables de estudio relacionadas con la geometría, las dimensiones, la orientación y la posición, están directamente relacionadas con el diseño del módulo portaherramientas propuesto. Se logró su adaptación a las cinco herramientas seleccionadas. Aun cuando el diseño está a nivel de prototipo, se puede implementar en máquinas híbridas pequeñas y/o experimentales.

A diferencia de lo presentado en otros estudios, el principio de funcionamiento del mecanismo de bloqueo deslizante para el cambio de la herramienta elimina la necesidad de un actuador para la toma y descarga de las herramientas, tornándose en una alternativa más económica por todo lo que implica el agregar o quitar el uso de un actuador en el funcionamiento de una máquina. Como trabajo futuro se continuará con la implementación del prototipo en una máquina de 5 ejes, programable con software de código abierto y controlada mediante la plataforma Arduino.

#### REFERENCIAS

- [1] Z. Zhu, V. G. Dhokia, A. Nassehi y S. T. Newman, “A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives”. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, n.º 7, pp. 1-20, feb. 2013, doi: [10.1080/0951192X.2012.749530](https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530).
- [2] S. C. Altiparmak, V. A. Yardley, Z. Shi y J. Lin, “Challenges in additive manufacturing of High strength aluminum alloys and current developments in hybrid additive manufacturing”, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, vol. 4, n.º 2, pp. 246-261, jun. 2021, doi: [10.1016/j.ijlmm.2020.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.12.004).
- [3] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman y M. Dolen, “Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 113, pp. 623-648, en. 2021, doi: [10.1007/s00170-021-06688-1](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06688-1).
- [4] N. P. V. Sebbe, F. Fernandes, V. F. C. Sousa y F. J. G. Silva, “Hybrid Manufacturing Processes Used in the Production of Complex Parts: A Comprehensive Review”, *Metals*, vol. 12, n.º 11, pp. 1874-1894, nov. 2022, doi: [10.3390/met12111874](https://doi.org/10.3390/met12111874).
- [5] S. Tayal. “Automatic Tool Changing 3D Printer”. Instructables.com. Accedido: ag. 7, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.instructables.com/Tool-Changing-3D-Printer/>
- [6] E3D. “Research and development: Motion system and Tool changer”. E3D.com. Accedido: ag. 9, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://e3d-online.com/blogs/news/research-and-development-motion-system-and-tool-changer>
- [7] C. Riley. E3D Tool Changer Update. (Feb. 19, 2020). Accedido: ag. 11, 2023. [Video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=7W5pPm0lZDE&t=62s>
- [8] M. Kramer. “Tool Changing 3D Printer”. mattkramerdesign.com. Accedido: ag. 14, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mattkramerdesign.com/tool-changing-3d-printer>
- [9] B. Cockfield. “A 3D Printer with an Electromagnetic Tool Changer”. Hackaday.com. Accedido: ag. 17, 2023. [En lí-

- nea]. Disponible en: <https://hackaday.com/2021/06/12/magnets-how-do-they-work-on-3d-printers/>
- [10] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, M. Papadokostakis y N. Panopoulos, “Design for 3D printing of a Robotic Arm Tool Changer under the framework of Industry 5.0”, *Procedia CIRP*, vol. 115, 2022, pp. 178-183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.070>.
- [11] How to Mechatronics. DIY Pen Plotter with Automatic Tool Changer | Arduino based CNC Drawing Machine. (Nov. 24, 2021). Accedido: ag. 17, 2023. [Vídeo en línea]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=-virDtVVt2Xo&ab\\_channel=HowToMechatronics](https://www.youtube.com/watch?v=-virDtVVt2Xo&ab_channel=HowToMechatronics)
- [12] A. Engberg, C. Stelzl, O. Eriksson, P. O'Callaghan y J. Kreuger, “An open-source extrusion bioprinter based on the E3D motion system and tool changer to enable FRESH and multimaterial bioprinting”, *Sci Rep*, vol. 11, art. 21254, 2021, doi: [10.1038/s41598-021-00931-1](https://doi.org/10.1038/s41598-021-00931-1).
- [13] J. Denavit y R. S. Hartenberg, “A Kinematic notation for lowerpair mechanisms based on matrices”, *J. Appl. Mech.*, pp. 215-221, jun. 1955, doi: [10.1115/1.4011045](https://doi.org/10.1115/1.4011045).
- [14] C. Sánchez, *Introducción a la Cinemática de Manipuladores Conceptos Básicos*. Editorial Académica Española, 2013.

## RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del proyecto (18044) IT16B088, en la convocatoria CI-2023.