

Brazo Robótico de 5 Ejes para Uso Didáctico Parte I: Diseño y Fabricación

5-Axis Robotic Arm for Educational Use Part I: Design and Manufacturing
Braço Robótico de 5 Eixos para Uso Educacional Parte I: Projeto e Fabricação

Germán Gutiérrez – Arias ^a
Carlos Aguirre - Rodríguez ^b
Fernando Jiménez - Díaz ^c
Diego Moreno - Ruiz ^d
Néstor Sierra - Sánchez ^e

División de Arquitectura e Ingenierías, Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás

^a german.gutierrez@usantoto.edu.co

^b carlos.aguirre@usantoto.edu.co

^c fernando.jimenez@usantoto.edu.co

^d diego.morenor@usantoto.edu.co

^e nestor.sierra@usantoto.edu.co

Resumen— Este artículo tiene como objetivo el diseño y fabricación de un brazo robótico con 5 grados de libertad de software y hardware libre, de bajo costo y fabricado en su mayoría por procesos de mecanizado e impresión 3D que permita operaciones de manufactura avanzadas tales como fabricación aditiva mediante un hotend de impresión 3D, procesos de corte y grabado láser además de un sistema de sujeción de piezas mediante pinzas. Esta herramienta se diseñará y fabricará en la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, universidad donde es necesaria una herramienta de control numérico para las actividades académicas de docentes y estudiantes ya que actualmente no se cuenta con una, debido principalmente a su elevado costo en el mercado. Con este brazo robótico se busca mejorar los procesos de aprendizaje, integrando al estudiante a un entorno de fabricación automatizado mediante máquinas CNC diseñando y fabricando piezas complejas en este tipo de máquinas con un impacto significativo en el aprendizaje y enseñanza de este tipo de tecnologías.

Palabras clave— Máquina didáctica, Software libre, Hardware libre, Control numérico, CNC.

Abstract— This article aims to design and manufacture a robotic arm with 5 degrees of freedom of free software and hardware, low cost and manufactured mostly by machining and 3D printing processes that allows advanced manufacturing operations such as additive manufacturing through a 3D printing hotend, laser cutting and engraving processes as well as a clamping system for parts. This tool will be designed and manufactured at the Tunja sectional Santo Tomás University, a university in which a rapid prototyping tool is necessary for the academic activities of teachers and students since there is currently no one mainly due to its high cost in the market. . This robotic arm seeks to improve learning processes, integrating the student into an automated manufacturing environment using CNC machines, designing and manufacturing complex parts on this type of machine with a significant impact on learning and teaching this type of technology.

Keywords— Didactic machine, Free software, Free hardware, Numerical control, CNC.

Resumo— Este artigo tem como objetivo projetar e fabricar um braço robótico com 5 graus de liberdade de software e hardware livres, de baixo custo e fabricado em sua maioria por processos de usinagem e impressão 3D que permite operações avançadas de Germán Gutiérrez, Carlos Aguirre, Fernando Jiménez, Moreno Ruiz, Sierra Nestor manufatura como manufatura aditiva através de um hotend de impressão 3D, corte a laser e processos de gravação, bem como um sistema de fixação de peças. Esta ferramenta será projetada e fabricada na Universidade Seccional de Tunja Santo Tomás, universidade em que se faz necessária uma ferramenta de prototipagem rápida para as atividades acadêmicas de docentes e discentes visto que atualmente não existe uma principalmente devido ao seu elevado custo no mercado. Este braço robótico procura melhorar os processos de aprendizagem, integrando o aluno num ambiente de fabrico automatizado utilizando máquinas CNC, projetando e fabricando peças complexas neste tipo de máquina com um impacto significativo na aprendizagem e ensino deste tipo de tecnologia.

Palavras chave— Máquina de ensino, Software livre, Hardware livre, Controle numérico, CNC.

I. INTRODUCCIÓN

Tomando como referencia a la época contemporánea y de cara a los diversos procesos de manufactura existentes en la industria, se ha evidenciado la rápida y constante evolución de las tecnologías aplicadas en la industria, una de las innovaciones tecnológicas más destacables en el sector radica en la automatización de los diversos procesos. Dicha automatización permite llevar a cabo distintas operaciones sobre una pieza o material en bruto para procesarlo de manera automática de acuerdo con instrucciones previamente establecidas por el operador del proceso.

Mediante la inspección bibliográfica efectuada se pudo establecer que la enseñanza práctica del control numérico puede ser abordada principalmente a partir de dos métodos: de forma física y de forma virtual.

Inicialmente se puede resaltar la investigación realizada por la Universidad Castilla La Mancha de España y la Universidad EAN de Colombia, dirigido por Velosa García y colaboradores, los cuales investigaron y confirmaron el rápido avance tecnológico en los diversos procesos de manufactura, notando la baja capacidad de enseñanza frente a este avance tecnológico. Debido a este creciente desarrollo aplicado en la maquinaria industrial resulta necesario instruir profesionales con el conocimiento y capacidad de manipular este tipo

de maquinaria. en [1], se plantea crear laboratorios modulares de manufactura con puestos de trabajo presenciales, remotos y simulaciones virtuales. Estos laboratorios modulares se plantean con el fin de presentarle al aprendiz un entorno más real de trabajo en el cual pueda tener una experiencia más cercana a la realidad en distintos tipos de procesos de manufactura.

Otros proyectos se centran en abordar el aprendizaje de los distintos métodos y procesos de manufactura mediante la implementación de herramientas virtuales de aprendizaje [6], entornos digitales en los cuales se pretende acercar al aprendiz a múltiples procesos de manufactura mediante programas, plataformas y simuladores virtuales que presenten un entorno de trabajo lo más real posible. En estos entornos virtuales se plantea una simulación casi real de algunas máquinas de mecanizado, así como la posibilidad de realizar selección de herramientas, acomodamiento de estas e incluso parámetros técnicos de cada proceso como lo puede ser velocidades de giro o de avance de herramienta en caso de simulaciones para procesos de mecanizado realizados mediante entornos simulados. En [2] se habla sobre el desarrollo de un software que se acopla perfectamente al software Autodesk Inventor dando la oportunidad de programar el proceso de mecanizado al modelo CAD desarrollado en el software, permitiendo simular operaciones de

torneado, taladrado y fresado. Este software permite especificar los parámetros técnicos relevantes a cada proceso de mecanizado, permitiendo a maestros explicar detalladamente el paso a paso de cada proceso de manufactura y las variables más relevantes de acuerdo con la pieza que se desee fabricar. Con este software el aprendiz es capaz de programar distintas operaciones CNC y observar el desplazamiento tanto de la maquinaria simulada como de las herramientas a lo largo de la pieza diseñada.

En Università Degli Studi di Palermo, decidieron realizar una reprogramación abrumadora del software LinuxCNC (EMC2), software en el cual es posible cargar archivos de modelado CAD con el fin de simular distintas operaciones de mecanizado en máquinas CNC de acuerdo con la operación necesaria según la geometría de la pieza [3]. Este software se desarrolla con el fin de mejorar el proceso de aprendizaje en procesos de manufactura en ingenierías. Una característica para destacar radica en la recreación virtual de los equipos disponibles en las instalaciones de la universidad, resaltando la importancia de tener una enseñanza con los mismos equipos tanto de forma física como virtual.

Sin embargo, en otros trabajos se evidencian resultados positivos mediante la incorporación de prácticas presenciales en el aprendizaje de procesos de manufactura. En [4], se lleva a cabo

una metodología en la cual se pretende dar un enfoque de “aprender haciendo” durante diversos procesos de manufactura CNC, más específicamente procesos de mecanizado tales como torneado, taladrado y fresado e incluso procesos de manufactura por adición de material como la impresión 3D, esto con el fin de dar un enfoque en su mayoría práctico al aprendizaje de diferentes procesos de manufactura. En esta metodología planteada se observa una mejora significativa tanto en los métodos de enseñanza teóricos como prácticos para docentes y aprendices por igual, resaltando de igual manera la mejor retención de información de un entorno práctico en comparación a un entorno teórico y simulado.

El campo de los procesos de manufactura y la maquinaria CNC que implique más de tres ejes o grados de libertad, se resalta la creciente implementación de estas maquinarias ya que día tras día resultan ser maquinarias más empeladas en la industria. Dada esta creciente innovación, resulta destacable las deficiencias a nivel académico en cara a la enseñanza de este tipo de tecnologías [7]. En el campo de la impresión 3D se ha indagado profundamente, con proyectos en los que se ha logrado fabricar máquinas didácticas de cuatro y cinco grados de libertad [5]. Normalmente las impresoras 3D de FDM incorporan los ejes X, Y y Z ortogonales en su programación, sin embargo, al emplear únicamente estos tres ejes, resulta necesaria la

generación de material de soporte para poder imprimir piezas con salientes o voladizos mayores a 45° . Un segundo inconveniente relacionado al proceso de impresión 3D recae en el software laminador o generador de capas, debido a que los softwares existentes siempre generan las capas en el mismo plano (XY) y no es posible reasignar este plano de corte para acoplarse a la forma de la geometría. Con el fin de hacer frente a esta problemática un grupo de investigación japonés conformado por miembros de Kanazawa Institute of Technology Tohshin Seiki, UHT Corporation y la Kanazawa University, diseñaron y fabricaron una impresora 3D con cuatro ejes o grados de libertad, incorporando el eje C a los tres ejes ordinarios ya existentes. Este cuarto eje se logra implementando una base rotatoria con respecto al eje Z, logrando con esto la capacidad de generar un plano arbitrario en la pieza y con esto la capacidad de variar el plano de generación de capa. Este eje C se ve reflejado en la rotación del extrusor de alimentación de material, permitiendo a la boquilla orientarse en cualquier dirección para la deposición de material reduciendo sus restricciones. Este sistema de cuarto eje permite la impresión de piezas 3D sin tener la necesidad de aplicar material de soporte en las piezas que presenten voladizo, Permitiendo una mayor versatilidad y velocidad de impresión.

En [8] se plantea la alternativa de poder llevar a cabo procesos de manufactura de manera remota con maquinaria

previamente enlazada a una red, de tal manera que cada aprendiz por medio de una computadora puede llevar a cabo el proceso de programación y preparación de la máquina para posteriormente enlazarse a la red y poder ejecutar el proceso establecido. Esta alternativa busca además de promover el aprendizaje de procesos de manufactura, también promueve la incorporación y práctica del internet de las cosas.

Un aporte bastante resaltable se puede observar en [12], en donde se resalta la difícil adquisición de equipos CNC, debido principalmente a su elevado valor en el mercado ya que en gran medida estos equipos deben ser importados para su adquisición. A raíz de esta situación plantean el diseño de un brazo robótico teniendo en cuenta diversos materiales para su fabricación, centrándose en un diseño fiable, compacto y resistente al menor coste posible.

En [13] y [14] plantean el diseño y fabricación de un brazo robótico multi propósito con herramientas de acople tales como husillo de fresado, extrusor caliente de impresión, grabador láser o una pinza. Este brazo se planteó fabricar mediante impresión 3D teniendo como criterio principal una rigidez e integridad adecuadas en las piezas impresas y completando su fabricación mediante elementos de adquisición comercial tales como motores y tornillería prestando gran atención a su fabricación con el menor coste posible.

Tomando como referencia los proyectos y trabajos previamente realizados por otros grupos de trabajo, existe una notable problemática en el aprendizaje y enseñanza de los distintos procesos de manufactura, presentándose como principal inconveniente el elevado valor comercial de la maquinaria CNC. El elevado precio de estas máquinas presenta como consecuencia que en gran parte de las instituciones educativas no tengan acceso a ellas. También cabe resaltar que las instituciones educativas que cuentan con máquinas CNC en sus instalaciones, no permiten la libre manipulación de estas máquinas a los aprendices durante su etapa de aprendizaje. Mediante el diseño de máquinas CNC con prestaciones similares a las empleadas en la industria (exactitud, rapidez, versatilidad y precisión de producción), se pueden lograr fabricar prototipos didácticos enfocados en la enseñanza de algunos procesos de manufactura, logrando un proceso integral para el aprendiz frente a la teoría y práctica de un proceso en concreto. Con una adecuada instrucción en estas nuevas tecnologías se consigue formar profesionalmente para dar un impulso tecnológico a las zonas en que estén ubicadas las instituciones que impartan y promuevan estas tecnologías.

En la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, la situación no resulta ajena a esta problemática y para hacer frente a esta situación, se plantea diseñar un brazo robótico de cinco ejes didáctico teniendo como prioridad su simplicidad de diseño para facilitar

así su fabricación, también se diseñará pensando en mantener el menor coste posible de fabricación; Frente al sistema electrónico y de programación se plantea integrar en el brazo robótico un software de acceso libre para brazos robóticos de cinco ejes. Estos parámetros se determinaron con el fin de hacer al brazo robótico lo más accesible posible para la mayor cantidad de personas e instituciones que deseen replicar este diseño.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se desarrolló mediante un proceso investigativo aplicado, partiendo de la hipótesis de lograr fabricar un brazo robótico didáctica de cinco ejes de libertad al menor coste posible, diseñando un brazo robótico de libre acceso, así como el uso de un software libre, también se tendrá en cuenta los materiales de fabricación con el fin de que tengan la suficiente resistencia para el diseño y presente el menor coste de adquisición posible, así como su fácil adquisición. La metodología con la que se decide ejecutar la primera parte del proyecto consta de dos etapas, la primera etapa consiste en la investigación, documentación y antecedentes referentes al diseño del prototipo, mientras que la segunda etapa se trata de la fabricación del prototipo.

En la primera etapa se lleva a cabo la identificación y análisis de las necesidades y requerimientos técnicos del prototipo para así proceder a la etapa

de diseño mecánico, tomando como referencia los estudios previamente realizados por [12], [13] y [15] principalmente. Con los parámetros técnicos ya establecidos se procede a revisar catálogos de fabricantes con el fin de conocer la disponibilidad y dimensiones de las piezas comerciales tales como motores, tornillería, poleas, correas de transmisión, etc. En esta fase también se consideró llevar a cabo la fabricación de la mayor parte de piezas a diseñar mediante procesos de mecanizado con máquinas convencionales con el fin de generar el diseño de un brazo robótico fácilmente replicable para otras instituciones, además de tener en cuenta que el brazo robótico no puede exceder un peso máximo de 10 Kg y una fuerza de corte de 100N [16]. También se planteó durante la selección de materiales el emplear un material fácilmente maquinable, resistente, económico y de fácil acceso para llevar a cabo la fabricación de la estructura, por tales razones se decide emplear un polímero, puntualmente un polietileno UHMW (Ultra High Molecular Weight).

Con los parámetros establecidos para el diseño del brazo robótico se procede a realizar su diseño mediante el software Autodesk Inventor, diseño del que se parte desde unos bocetos previamente elaborados, teniendo como principal enfoque el generar piezas con geometrías sencillas, pero con una elevada resistencia además de cumplir las longitudes establecidas para cada sección del brazo. Finalmente, se culmina el diseño(fig.1) del brazo robótico

al cual se le agregan componentes estandarizados tales como los motores, correas, poleas, piñones, rodamientos, tornillería, pasadores, etc.

También cabe resaltar que las piezas del sistema electrónico que se decidieron emplear son piezas totalmente comerciales y de fácil acceso y en cuanto al software para operar el brazo robótico, se decidió emplear un software ya existente y de libre acceso.

Como se observa en la Figura 1, la base está sosteniendo todo el sistema del brazo robótico, el motor M1 permitiendo la rotación de todo el brazo (hombro), el motor M2 y M3 permiten la inclinación del primer eslabón del brazo (codo), el motor M4 permite la inclinación del segundo eslabón (muñeca), el motor M5 permite la rotación de la "muñeca" y finalmente el motor M6 permite la inclinación del acople de la herramienta.

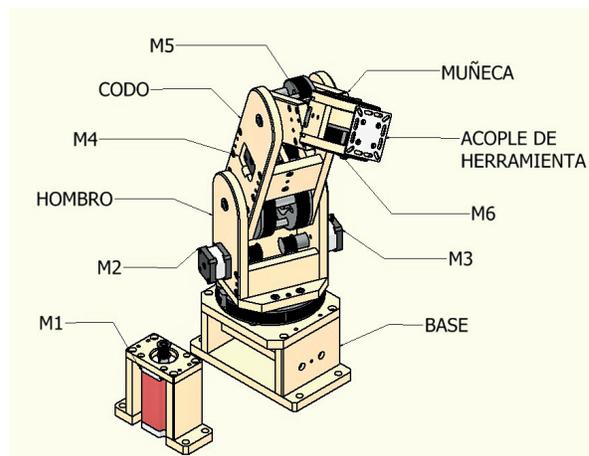


Figura 1. Diseño CAD del brazo, Fuente: Autor

El brazo robótico fue diseñado para poder emplear distintos tipos de herramientas en el acople de la herramienta

(fig. 2), en el cual se puede acoplar un módulo de grabado láser, un hotend de extrusión para impresión 3D, un lápiz para dibujos y un sistema de pinzas para manipulación de objetos.

AGUJEROS DE ACOUPLE

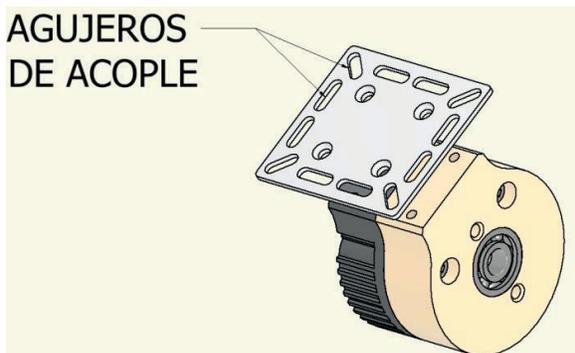


Figura 2. Modelado de acople para herramientas, Fuente: Autor

En la Figura 3 se puede observar la longitud que presenta cada sección brazo robótico y su radio de operación de acuerdo con el diseño establecido.

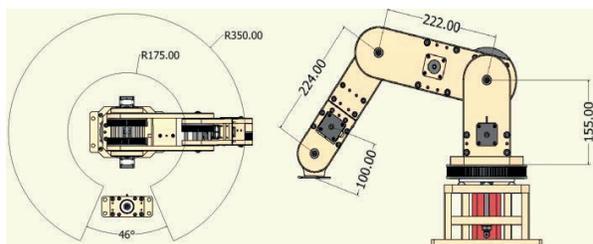


Figura 3. Dimensiones generales del diseño, Fuente: Autor

En la segunda etapa del proyecto, se plantea la adquisición de materiales necesarios y la fabricación de las piezas que así lo requieran mediante procesos de mecanizados tales como el torneado y fresado además de impresión 3D. Inicialmente se procede a realizar el mecanizado de todas las piezas diseñadas correspondientes al chasis del brazo robótico mediante procesos de fresado y torneado como se evidencia

en la figura 4, procesos llevados a cabo en máquinas convencionales (Torno y fresadora) empleando parámetros de mecanizado consultados en manuales de máquinas y herramientas. Cabe resaltar que para facilitar el fresado de las piezas, estas se adhirieron a rectángulos de madera mediante pegamento para poder realizar todos los procesos de mecanizado mediante un único montaje.



Figura 4. Mecanizado de chasis, Fuente: Autor

Para llevar a cabo la fabricación de las piezas restantes, se decide emplear la impresión 3D debido a la complejidad de las piezas, dichas piezas se construyeron en una impresora Anet A8 con ayuda del software laminador Cura, en el que algunos de los parámetros de impresión 3D fueron: tamaño de boquilla 0.8mm, grosor de pared, superior/inferior de 3mm, densidad de relleno del 60% con un patrón en rejilla, a una temperatura de extrusión de 245 °C de acuerdo con la sugerencia del fabricante del material y una velocidad de 44m/seg de desplazamiento de la boquilla. Para estas impresiones se decidió emplear PET-G, elegido sobre otros materiales comunes tales como el PLA o ABS por su alta resistencia y durabilidad además de su fuerte adherencia de capa. En la figura 5 se puede

evidenciar el proceso de impresión de las piezas restantes.

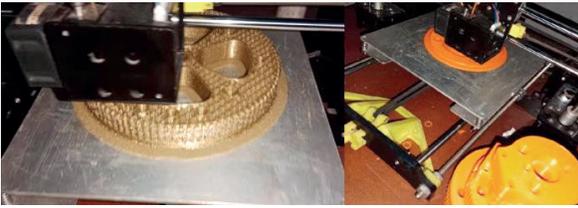


Figura 5. Impresión de piezas impresas en 3D, Fuente: Autor En la figura 6 se pueden observar todas las piezas de impresión 3D ya fabricadas junto a las piezas mecanizadas mediante procesos de torneado y fresado.



Figura 6. Piezas del brazo robótico, Fuente: Autor

Con todas las piezas ya fabricadas mediante mecanizado e impresión 3D, se procede a realizar la compra de los elementos comerciales tales como motores, correas, tornillería, piñones, etc. En la figura 6 se pueden observar por completo las piezas manufacturadas para ensamblar el brazo robótico en la parte dos del proyecto.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Partiendo del punto de vista del diseño, el espacio de operación del brazo robótico es fácilmente modificable ya que este diseño es escalable tanto para aumentar como para reducir el área de operación, manteniendo los límites razonables para un brazo robótico de

mesa. Cabe destacar que, al desear escalar este diseño, se debe considerar el aumentar o reducir el espesor del material empleado en la fabricación de la estructura, también resulta destacable recordar que la estructura está fabricada en UHMW (Ultra High Molecular Weight), material suficientemente resistente y duradero además de contar con una fácil adquisición en el mercado, pero no tan resistente como su contraparte metálica. De cara al diseño, un último factor resaltable radica en la fácil sustitución de las piezas del brazo robótico en caso de ocurrir una avería o desgaste con el tiempo.

Dejando de lado las piezas relacionadas a la estructura del brazo robótico, este fue diseñado para emplear componentes listos para utilizar y de fácil adquisición en el mercado. Las únicas piezas metálicas que se plantearon en el diseño constan de una serie de ejes y pasadores los cuales se pueden comprar a un bajo coste o incluso fabricarlos mediante el mecanizado de una manera muy sencilla.

El diseño de este brazo robótico está pensado para que sea de acceso libre, lo que, en conjunto con el software libre incluido en el brazo, permite que sea totalmente asequible a los interesados en replicar este diseño.

Una característica destacable en el brazo robótico consiste en que, al partir de geometrías sencillas, también presenta un sistema de ensamble bastante sencillo e intuitivo, empleando un

material económico y de fácil acceso con el fin de fabricarlo a un bajo coste además de tener un diseño personalizable, permitiendo cambiar fácilmente el tamaño del brazo robótico y capacidad de producción. La única limitante existente en el escalado del brazo robótico consiste en el área de trabajo de las máquinas de mecanizado disponibles por las personas interesadas en replicar este diseño, ya que, si estas máquinas presentan un área de trabajo reducida, resultaría difícil o imposible según sea el caso, la replicación del brazo robótico.

En resumen, el proyecto cuenta con 54 piezas y un peso aproximado de 9,42 Kg, con un tiempo de diseño y fabricación de piezas aproximadamente de 100 horas y presentando un costo de materia prima y materiales aproximadamente de 500 dólares, precio oscilante de acuerdo con la zona en que se fabrique el brazo robótico. Teniendo en cuenta el valor de los brazos robóticos actualmente existentes en el mercado, este resulta ser un precio significativamente bajo. Considerando que este brazo robótico es un proyecto que se encuentra en desarrollo, se debe realizar el ensamble del mismo además de una serie de pruebas técnicas para evaluar su funcionamiento y desempeño durante distintas operaciones. Sin embargo, se espera un óptimo desempeño del brazo robótico de acuerdo con su diseño, pero sin dejar de lado la posibilidad de optimizaciones futuras.

IV. CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO

En el ámbito industrial es cada vez más notable la necesaria manipulación de maquinaria CNC, la cual en muchos casos resulta en una barrera para ingenieros recién egresados ya que estos carecen de práctica e interacción directa con este tipo de maquinaria y dichas prácticas resultan costosas y difíciles de llevar a cabo en equipos de tipo industrial. El prototipado rápido permite plantear una idea de espacialidad del área de trabajo, operaciones y manipulación en algunos procesos CNC, brindando confianza al aprendiz y acercándolo a un entorno de trabajo más real.

El brazo robótico planteado en este proyecto será una herramienta que contribuirá a dar un enfoque novedoso de fabricación CNC en un único entorno de trabajo. Este brazo será una incorporación bastante importante en la Universidad Santo Tomás en Tunja, ya que, permitirá el aprendizaje de distintos procesos de manufactura mediante la práctica y la inclusión de programación de código G.

Actualmente el brazo robótico continúa en desarrollo, puntualmente en la parte dos del proyecto. Esta parte del proyecto consta del ensamble e integración de todos los componentes electrónicos, así como la inclusión del software al mismo. Este trabajo avanza en conjunto con el concepto de incorporar la industria 4.0 en el proyecto, ya que este es un criterio muy importante

de cara al avance tecnológico y las nuevas tecnologías.

V. REFERENCIAS

- [1] J. Velosa, F. J. Castillo, E. Espildora y L. Cobo, "Requerimientos para laboratorios híbridos en Ingeniería de Manufactura", revista DYNA, Vol. 84(203), pp. 65-74, December, 2017.
- [2] P. R.Nair, H. Khokhawat y R. Chittawadigi, "ACAM: A CNC Simulation Software for Effective Learning", Procedia Computer Science, Vol 133, pp 823-830, 2018.
- [3] E. Valvo, R. Licari, y A. Adornetto. "CNC milling machine simulation in engineering education." International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE) Vol 8.2, pp 33 – 38, mayo, 2012.
- [4] Z. Gani, y S. Sivaloganathan, "Teaching Manufacturing Technology through 'Learning by Doing' Approach", ASEE 2018 American society for engineering education annual conference y exposition. 2018, Salt palace convention center, Salt lake City USA.
- [5] K. Kawagishi, S. Umetani, K. Tanaka, E. Ametani, Y. Morimoto y K. Takasugi, "Development of Four-Axis 3D Printer with Fused Deposition Modeling Technology". IJAT vol 11, pp 278-286, 2017.
- [6] L. Qian, "Teaching Multi-axis Complex Surface Machining via Simulation and Projects", Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, Department of Engineering Technology & Management, South Dakota State University, junio, 2006.
- [7] W. Zebala, M. Plaza, "Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form machining of difficult-to-cut material", International journal of Production Economics, pp 345–358, 2014.
- [8] N. Días, H. Alvarinhas, A. Quintana, J. Santos, "Web enabled CNC milling machine control", IFAC Proceedings, Vol 39, pp 759-764, 2006.
- [9] André Martins, João Lucas, Hugo Costelha, Carlos Neves, "Developing an OPC UA Server for CNC Machines", Procedia Computer Science, Vol 180, pp 561-570, 2021.
- [10] Youichi Nonaka, Gábor Erdős, Tamás Kis, Takahiro Nakano, József Váncza, "Scheduling with alternative routings in CNC workshops", CIRP Annals, Vol 61, pp449-454, 2012.
- [11] Yuanyuan Zhao, Quan Liu, Wenjun Xu, Huiqun Yuan, Ping Lou, "An ontology self-learning approach for CNC machine capability information integration and representation in cloud manufacturing", Journal of Industrial Information Integration, Vol 25, 2022.

- [12] Ashwin Misra, Ayush Sharma, Ghanvir Singh, Ashish Kumar, Vikas Rastogi, "Design and Development of a Low-Cost CNC Alternative SCARA Robotic Arm", *Procedia Computer Science*, Vol 171, pp 2459-2468, 2020.
- [13] Agathoklis A. Krimpenis, Vasileios Papapaschos, Evgenios Bontarenko, "HydraX, a 3D printed robotic arm for Hybrid Manufacturing. Part I: Custom Design, Manufacturing and Assembly", *Procedia Manufacturing*, Vol 51, pp 103-108, 2020.
- [14] Vasileios Papapaschos, Evgenios Bontarenko, Agathoklis A. Krimpenis, "HydraX, a 3D printed robotic arm for Hybrid Manufacturing. Part II: Control, Calibration & Programming, *Procedia Manufacturing*", Vol 51, pp 109-115, 2020.
- [15] Merckaert K, De Beir A, Adriaens N, El Makrini I, Van Ham R, Vanderborght B, "brazo robótico manipulador de medición y transporte de carga independiente para mejorar la relación carga útil/masa", *Robótica y fabricación integrada por computadora*, vol. 53, pp 135-140, 2018.
- [16] Erardo Leal-Muñoz, Eduardo Diez, Juan Márquez, Antonio Vizán, "Feasibility of machining using low payload robots", *Procedia Manufacturing*, Vol 41, pp 594-601, 2019.