

Pneumatic Cylindrical Robot with 3 Degrees of Freedom

Danilo Luque¹, Josue Rivas²

Faculty mentor: José Luis Ordoñez-Ávila, M.Sc.¹

¹Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, daniloluque@unitec.edu, jlordonez@unitec.edu

²Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, davixback@unitec.edu

Abstract— The direct and inverse kinematic model of a pneumatic cylindrical robot with three degrees of freedom was carried out using the V methodology. A static analysis of the robot was also carried out using the SolidWorks tool. The creation of a pneumatic cylindrical robot involved a previous conceptual design in several SolidWorks sketches until a resistant and stable model was found according to the prototype's objective, considering the different actuators and fasteners that it would need at the time of its assembly.

Keywords— Inverse kinematics, direct kinematics, cylindrical robot, actuators, joints.

Robot Cilíndrico Neumático de 3 Grados de Libertad

Danilo Luque¹, Josue Rivas²

Mentor de facultad: José Luis Ordoñez-Ávila, M.Sc.¹

¹Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, daniloluque@unitec.edu, jlrdonez@unitec.edu

²Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, davixback@unitec.edu

Resumen- Se realizó el modelo cinemático directo e inverso de un robot neumático cilíndrico de tres grados de libertad utilizando la metodología V. También se realizó un análisis estático del robot utilizando la herramienta SolidWorks. La creación de un robot cilíndrico neumático implicó un diseño conceptual previo en varios bocetos de SolidWorks hasta encontrar un modelo resistente y estable acorde al objetivo del prototipo, considerando los diferentes actuadores y fijaciones que necesitaría a la hora de su montaje.

Palabras clave- Actuadores, articulaciones, cinemática directa, cinemática inversa, robot cilíndrico.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los distintos avances tecnológicos han ayudado a mejorar la productividad industrial en diversos campos: medicina, agricultura, farmacéuticas, industria alimentaria. Dichos avances se han presentado en diferentes facetas, ya sean en componentes electrónicos individuales, sistemas inteligentes o la robótica, la cual ha tenido gran impacto con el pasar de los años. La presente investigación se enfocó en el campo de la robótica, específicamente a la creación de un prototipo de robot cilíndrico de 3 grados de libertad (DOF) con la característica que cada una de sus articulaciones sean accionadas de manera neumática.

La necesidad de máquinas autónomas en diferentes procesos industriales ha aumentado con el paso del tiempo, para poder aumentar la velocidad de producción, reducción de accidentes y un notable aumento en la calidad de los resultados en los productos finales. La mayoría de las industrias está cambiando la mano humana por diferentes tecnologías, las cuales con una programación simple puede reducir errores de producción de manera drástica, garantizando un trabajo casi impecable.

Algunas empresas utilizan actuadores del tipo neumático para accionar cada uno de los robots en sus áreas, sin embargo, algunas empresas están optando por la implementación de actuadores y robots neumáticos por motivos de ahorro económico y la reducción de accidentes relacionados a la energía eléctrica.

El uso de robots, junto con la automatización se ha convertido en una necesidad para poder mantenerse en la competencia en el mundo industrial actual, ya que sus esfuerzos son significativos para incluir tanta tecnología como sea posible en cada uno de los procesos para poder mejorar sus operaciones y reducir sus pérdidas [1].

La robótica tiene un alcance amplio en cuanto a automatización industrial se trata, como los manipuladores robóticos maniobrables o automáticos, lo cual también lleva a la implementación de los brazos robóticos, que son máquinas eficientes para bastantes aplicaciones en áreas industriales y tareas peligrosas de realizar por mano humana [2].

Estas breves definiciones y ventajas pueden dar una idea semejante de lo que la maquinaria automática de la actualidad es capaz de hacer, aunque no todo el tiempo solo se trata de productividad y eficiencia, sino también de metodologías que nos ayuden a que estos dos anteriores factores aumenten considerablemente, reduciendo la fatiga de la investigación y desarrollo de nuevos prototipos para nuevos propósitos.

En Honduras, el tema de la robótica no posee el mismo impacto a comparación con el resto del mundo; en San Pedro Sula, la capital industrial y sus alrededores se han implementado por lo menos 50 robots en distintas fábricas, las cuales trabajan principalmente en alimentos y en la fabricación de arneses de automóviles [3]. Es un país que realiza gran parte de su comercio al por menor, lo que es el 30% de las importaciones son de aquellos productos que necesitan ser manejados en almacenes, lo cual hace aparecer la necesidad de desarrollar ciertas tecnologías que puedan mejorar los procesos dentro de los almacenes [3]. Dichos análisis hacen saber de qué a pesar de que son pocas las áreas del país, las que utilizan este tipo de tecnologías, poco a poco van presentando nuevas necesidades para más sistemas de este mismo tipo, ya que mientras más incrementa la velocidad de producción, más ira aumentando la necesidad de adquisición de otras unidades, las cuales pueden variar en diseño.

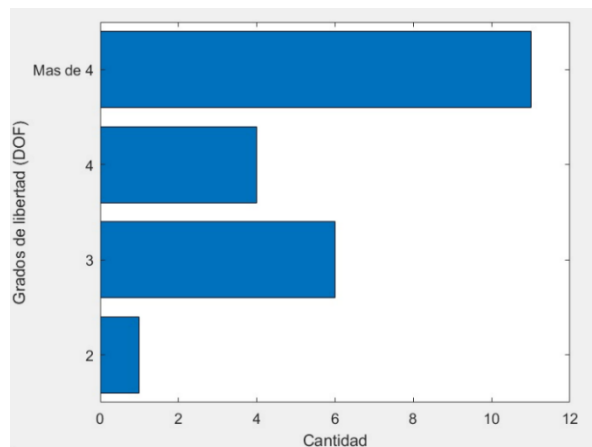


Fig. 1 Gráfica de cantidad de grados de libertad.

En la Fig. 1 se es posible deducir que la mayoría de los robots con 4 o más grados de libertad (DOF), son del tipo

Digital Object Identifier (DOI):
ISSN, ISBN:

angular, ya que son los que poseen esta característica, mientras que los cilíndricos o SCARAS tienen por lo general 3 o 4 grados de libertad en la mayoría de sus aplicaciones. Estos DOF dependerán del tipo de actividad que el robot industrial necesite realizar, así como también el tipo de robot que se necesite

II. TIPOS DE ROBOTS ACTUALES

Existen distintos tipos de robot, como pueden ser los angulares, cartesianos, cilíndricos, SCARA, esféricos, entre otros. En este artículo nos centraremos en el robot cilíndrico y una breve explicación del robot SCARA, ya que cuentan con similitudes en sus articulaciones.

A. Robot SCARA

El brazo robótico del tipo SCARA se utiliza en el montaje y operaciones de manipulaciones, mayoritariamente en campos de automoción, electrónica y alimentaria. Con la llegada de competencias al mercado y el rápido desarrollo de varias industrias, hablando específicamente de las manufactureras, un gran número de robots industriales adecuados para procesos de montaje y manipulación, se han vuelto necesarios para una mejor eficiencia de producción y reducción de costos, algo que el SCARA ha cumplido con mucha expectativa [4].

B. Robot Cilíndrico

El robot cilíndrico se basa en un sistema de coordenadas cilíndricas de forma tridimensional que especifica las posiciones de los puntos por la distancia de un eje el cual se elige referencia. Su origen es el punto donde las 3 coordenadas pueden llegar a cero, el cual sería la intersección entre el plano de referencia y el eje polar. Este se puede denominar de diferentes formas, eje cilíndrico o longitudinal, para que así se pueda diferenciar del eje polar [5]. Este tipo de manipuladores se han vuelto cada vez más importantes cuando se habla de la trayectoria de alta velocidad y precisión en aplicaciones de seguimiento.

El robot cilíndrico, es un robot de coordenadas que utiliza una columna vertical y una corredera que le permite moverse de abajo hacia arriba y viceversa a lo largo de la esta; al girar toda su estructura, el mecanismo es capaz de utilizar todo un espacio de trabajo que se aproxima a la forma de un cilindro, de esta forma este tipo de robot ha sido uno de los más adecuado para trabajos de "tomar y colocar" (pick and place) [5]. Estos dos tipos de robot son utilizados prácticamente para la misma finalidad, sin embargo, el robot cilíndrico tiene un mayor desplazamiento en el eje Y, mientras que en el SCARA este se ve muy limitado.

El problema que estos presentan es en cuanto a su control. Este tipo de brazos robóticos están sujetos a cambios estructurados o no estructurados, ya sea en parámetros de cargas desconocidas, la fuerza y par de sus actuadores, entre otros factores primordiales [6]. A pesar de ser un recurso tecnológico bastante completo, siempre hay márgenes de errores que se tienen que mantener en constante monitoreo, ya que puede que en las aplicaciones a las cuales estén destinados, los pesos, fuerzas, presiones o ambientes, varíen conforme al

tiempo, y así provocar fallas en el sistema de actuadores que se posea, estructura.

III. ACTUADORES

En la actualidad, los actuadores utilizados para generar el movimiento en la mayoría de los robots son los actuadores eléctricos, tal y como se indica en la Fig. 2, ya que estos son fáciles de controlar, pero son costosos, requieren un mantenimiento continuo y se pueden dañar por sobrecarga.

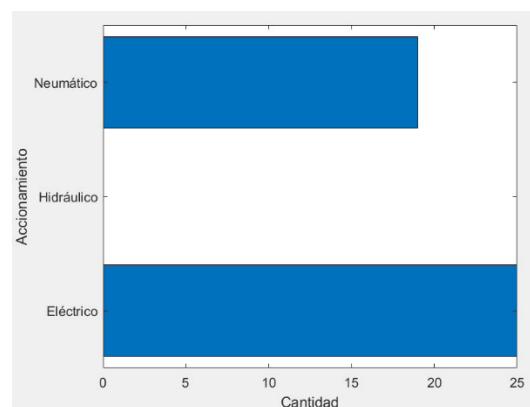


Fig. 2 Gráfica de actuadores más utilizados en la industria.

Asimismo, cuentan con una alta precisión para seguir un camino específico, pero tienen una muy baja relación potencia-peso. Los actuadores hidráulicos son los más fáciles de controlar, pero al igual que los eléctricos, son muy costosos y requieren de mucho mantenimiento.

De igual manera, requieren instalaciones especiales, ya que son altamente contaminantes porque funcionan directamente con aceite. Estos actuadores tienen la mayor relación entre potencia y peso [7]. La aplicación generalizada de este tipo de tecnologías necesita combinar estos dispositivos con otra de bajo costo y limpia.

El aire comprimido puede ser la mejor alternativa para accionamientos en actuadores industriales, el hecho de no presentar riesgo de fugas líquidas o chispas en atmósferas explosivas es un punto clave en su aplicación [8].

Todas estas características mencionadas de cada una de las distintas fuentes de accionamiento para los actuadores dan a entender que aparte de tener una gran variedad de formas para mover los elementos citados, se tienen opciones según el ambiente en el cual se necesite implementar. En el caso del aire comprimido es una de las mejores opciones en cuanto a seguridad y ahorro de costos, no requiere de energía eléctrica más que para el compresor fuente, su mantenimiento es bastante rápido y reducido, mencionando también que la reducción de accidentes por fugas o cortocircuitos es nula en su uso.

Los actuadores del tipo neumático representan una categoría de elementos importantes de manipulación, los cuales se utilizan en sistemas automáticos de control. Los actuadores de este tipo están formados por cilindros neumáticos accionados según una lógica o algoritmo programado, que

mayormente se asocian a sistemas de automatización no continuos con contactos o relés [9].

Por otro lado, la mala amortiguación de grandes pesos debido a la fricción mecánica y a la alta compresión del aire, dificultan la implementación de accionamientos continuos para sistemas de control de posición, por lo que requieren otros asistentes inteligentes para controlar dichos sistemas neumáticos [10].

Estos sistemas a pesar de presentar una gran ventaja de comodidad económica y funcionalidad, ciertas limitantes en cuanto a posicionamiento y dominio de las presiones que se usan para acciones específicas, como se menciona, requieren ayuda de otros sistemas inteligentes para poder dominarlos, un ejemplo claro sería posicionar un pistón a la mitad de su vástago, ya que se necesita un dominio de sus presiones, tanto de salida y entrada para poder mantener esa posición específica, siendo esta una clara desventaja en el uso de este tipo de actuadores.

IV. CINEMÁTICA DE ROBOTS

El método Denavit-Hartenberg es el más utilizado para representar la estructura cinemática de los robots, este proporciona una representación mínima garantizada, sirve para determinar sus parámetros de una manera intuitiva y funciona con algebra lineal directa cuyas matrices son rápidas de resolver, existe un problema constante con los robots debido a su estructura en serie que ocasiona movimientos inexactos [11].

El error común de la relación de desaceleración entre las articulaciones y los motores que utilizan los robots, pueden provocar una desviación entre el ángulo de rotación real y el ángulo que el robot recibe como comando, lo que tiene una gran influencia en la precisión de posición [12].

Este problema puede presentarse en la mayoría de los robots con los cuales sus sujeciones y correderas presenten algún tipo de desgaste por las repentinas aceleraciones o desaceleraciones, por lo que conocer la estructura cinemática de estos mecanismos son fuente clave de información para analizar diferentes alternativas para mitigar dichos desgastes.

A. Cinemática Directa

El propósito de la determinación de la cinemática directa trata de definir la posición de la plataforma móvil conociendo los otros parámetros cinemáticos del modelo creado [13]. La cinemática directa dicta que, a través de la medida de las articulaciones, alturas y longitudes extensibles de sus partes, podemos determinar la posición que tomara su elemento terminal o efector final. Las ecuaciones se pueden encontrar por métodos geométricos o por medio matrices homogéneas.

B. Cinemática Inversa

La cinemática inversa es la base y el énfasis del control de robots industriales. Las soluciones tradicionales de cinemática inversa causan muchas dificultades a la explotación de muchos tipos de robots industriales debido a la derivación de complejidad, dificultad de cálculo, múltiples soluciones, falta de instantaneidad [14].

Uno de los problemas más comunes para modelar las estructuras cinemáticas de los robots, se relaciona con la inaccesibilidad de los parámetros del modelo, que usualmente son manejados por el microcontrolador; Si el robot esta calibrado el usuario no tiene acceso a los parámetros cinemáticos, solamente a los nominales de la documentación [11].

Gracias a la cinemática inversa, aquellos parámetros que no estén documentados pueden ser determinados, para así analizar cada una de las posiciones a las que el robot pueda y necesite llegar sin ninguna dificultad, y en caso de poseerla, verificar cada valor afectado para encontrar el problema. La calibración de estas posiciones puede mejorar la precisión del posicionamiento absoluto del robot.

Pero, el método tradicional de calibración es complicado, ya que requiere mucho tiempo y es de alto costo. Luego de la calibración cinemática, las soluciones de manera cerrada de cinemática inversa se suelen implementar mediante métodos geométricos algebraicos reales (RAG), en el momento en que los robots no son capaces de convertir cinemática inversa completa en subproblemas conocidos.

V. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este proyecto se seleccionó la metodología de Vasić & Lazarević, o mejor conocida como metodología en V. Esta metodología es la más adecuada para la creación de un robot cilíndrico neumático, debido a que dicho proyecto contiene sistemas de desarrollo mecánico y control, mencionando además las diferentes etapas de pruebas para corroborar su funcionamiento.

En la Fig. 3 se puede observar la metodología en V, esta consiste en la descomposición de un resultado o producto final en diferentes etapas o los mencionados sistemas.

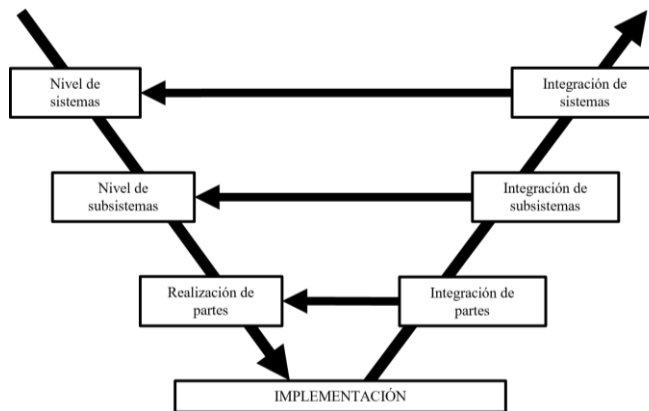


Fig. 3 Diagrama metodología en V

En la Fig. 4 se muestra cómo se divide el proyecto, este se divide en dos sistemas y estos en subsistemas. Contamos con el sistema de control y el mecánico. El sistema de control se divide en los algoritmos para el modelo cinemático y el de control. El

sistema mecánico se clasifica en el diseño estructural y los análisis de tensión realizados en la herramienta SolidWorks.

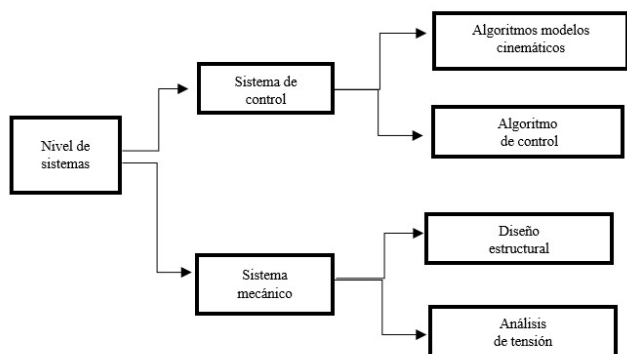


Fig. 4 División y subdivisión de sistemas

VI. REALIZACIÓN DE PARTES

A. Sistema Mecánico

1) *Diseño estructural*: con la ayuda del software SolidWorks se diseñará un prototipo del robot cilíndrico con tres actuadores neumáticos, siendo dos del tipo rotativo y uno prismático. El prototipo utilizará una estructura del tipo torre en su centro, con el que estará integrado un tornillo sin fin, acoplado a un actuador neumático rotativo.

2) *Análisis de tensión*: con el software SolidWorks se harán unas pruebas de tensión de Von Mises del prototipo del robot cilíndrico neumático. Estas servirán para realizar las mediciones correctas del grosor de las piezas para obtener que medida es la adecuada para un soporte de fuerzas idóneo.

B. Sistema de Control

1) *Algoritmo de modelo cinemático*: con ayuda de métodos como Denavit Hartenberg, se plantearán distintas matrices con las cuales se podrá determinar los movimientos del mecanismo del modelo cinemático directo y mediante las ecuaciones geométricas encontraremos el modelo cinemático inverso

2) *Algoritmo de control*: el software de TIA PORTAL, brinda la capacidad de realizar una programación del tipo escalera, creando las variables pertinentes de los actuadores e interruptores que se implementen en el mecanismo. El código estará diseñado para poder ejecutar comandos de activación que recibirá un bloque de electroválvulas las cuales estarán conectadas a los diferentes actuadores responsables del movimiento completo de la estructura y articulación del robot. De manera detallada estos elementos se distribuyen de esta forma:

- **Electroválvulas**: Se utilizará un bloque de electroválvulas que cuenta con 4 de estas, cada una de 4 vías y servirán para accionar los actuadores.

- **Interruptores de límite**: Estos se utilizarán para apagar las electroválvulas cuando la posición de los actuadores sea la correcta.

- **PLC**: Este controlador será utilizado para accionar las electroválvulas, ya que este mandará la señal de 24v para que

estas se activen y dejen pasar el flujo de aire comprimido emitido.

VII. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Pruebas de tensión Von Mises

En la Fig. 5 se pudo visualizar en la prueba de tensión de Von Mises que se presenta una tensión mínima de $5.175e-07$ N/m² y una máxima de $4.414e+05$ N/m², cuando se aplica una fuerza mayor a 2.2 libras, esto concuerda con el tipo de material que está compuesto el robot cilíndrico. Se asigna dicha fuerza únicamente en la parte de la herramienta, ya que por diseño de la estructura es la que soportaría la mayoría de las cargas a las que se someta el prototipo.

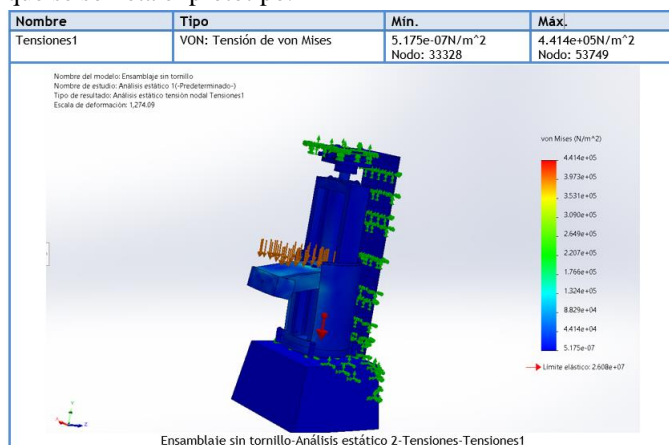


Fig.5 Pruebas de tensión de Von Mises

B. Prueba de desplazamiento

En la Fig. 6, se obtuvo que en las pruebas de desplazamiento se presenta un desplazamiento mínimo de casi 0 mm y uno máximo de $1.698e-01$ mm. Es importante mencionar la velocidad con la que se detenga la herramienta, ya que la fuerza con la que el material o herramienta sostenida por el robot se detenga, puede influir en el desplazamiento.

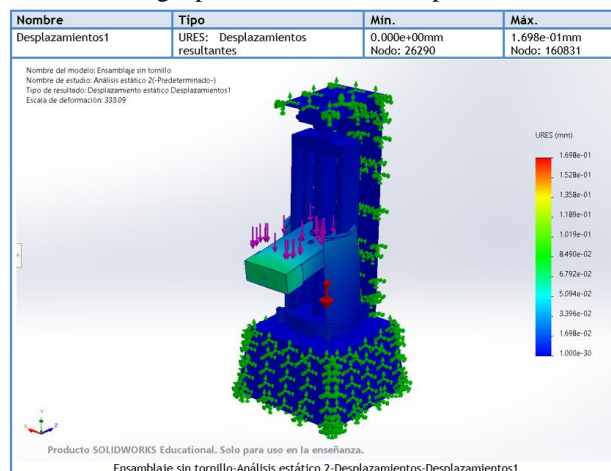


Fig. 6 Pruebas de desplazamientos resultantes

C. Prueba de deformación

En la Fig. 7 se observó que se presenta una deformación unitaria mínima de $2.944e-11$ y una máxima de $1.740e-04$. Se

pudo tomar en cuenta que para tareas con herramientas más pesadas se vería necesaria la creación de un prototipo a base de un metal u otro material más resistente que el PLA, concluyendo con este que más de 4 libras puede llegar a presentar deformaciones notables, mas no peligrosas que dañen el funcionamiento inmediatamente del prototipo.

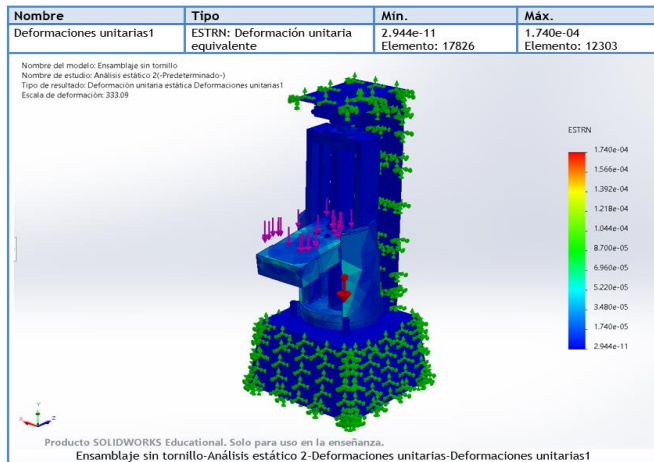


Fig. 7 Pruebas de deformación unitaria

D. Prueba de factor de seguridad

En la Fig.8 se aplica únicamente la prueba de factor de seguridad a la pieza que soportara un efector final o una herramienta, el factor de seguridad mínimo indica un valor unitario de 28, lo cual da a entender que si soportara los esfuerzos menores a 4 libras. Según la interpretación de estas pruebas, si el valor dado en la evaluación es menor o igual a uno, la probabilidad de que la estructura falle es elevada.

$$\frac{\sigma_{von Mises}}{\sigma_{Limit}} < 1 \quad (1)$$

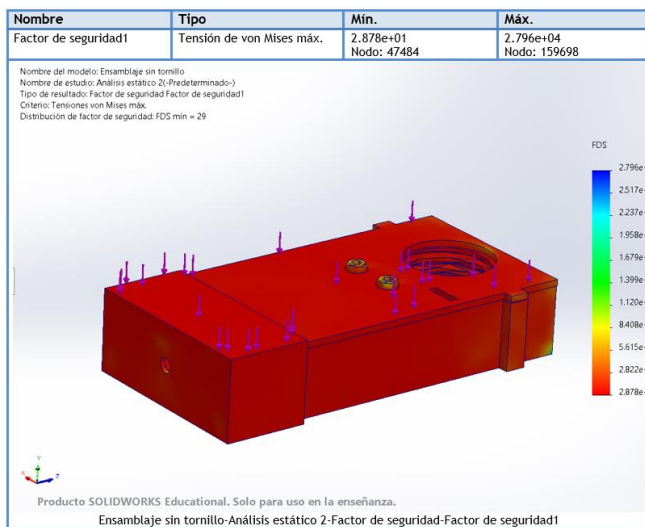


Fig. 8 Prueba de factor de seguridad

E. Impresión 3D

La fabricación de materiales mediante capa por capa es conocida como fabricación aditiva, esta permite crear

geometrías complejas y permite una gran facilidad en la fabricación, para fabricar materiales blandos en 3d y flexibles se utiliza TPU [15].

Las impresoras 3D son utilizadas para la fabricación de prototipos y productos personalizados porque son económicas y de Código abierto, estas se pueden usar para la realización de diseños complejos, ya que no el límite en la forma del producto es mínimo. El material de filamento PLA es ampliamente utilizado en la creación de estructuras [16]. En la fabricación aditiva el material utilizado se encuentra en carretes de diámetros estándar que varían de 1.75mm a 2.85mm, el PLA y el ABS son de uso común en impresiones 3D [5]. TPS, PLA, PBAT, son filamentos dedicados a la tecnología en impresión 3D. Gracias a estos materiales, la creación de distintos prototipos resulta menos costoso que crear estructuras con otros materiales como aluminio, acero u otros metales, sin mencionar la gran libertad de dimensiones de impresión que posee el usuario al momento de elaborar su propio diseño.

TABLA I
TIPOS DE FILAMENTOS

Sigla	Nombre
TPU	Poliuretano termoplástico
PLA	Ácido poliláctico
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
TPS	Termoplástico de almidón
PBAT	Poli butilen adipato-co-tereftalato

En este artículo “*Design of Low-cost Desktop Robot Based on 3D Printing Technology and Open-source Control System*” se diseñó un robot de bajo costo, su modelo se realizó en una herramienta CAD utilizando el software SolidWorks tomando en cuenta los principios de los robots industriales, se utilizó la impresión 3D para la fabricación de piezas. Esta investigación tiene como objetivo la creación de un robot cilíndrico de 3 DOF impreso en 3D, también se utilizará el dicho software para la creación de piezas y la realización de análisis de fuerzas de Von Mises, a su vez se cargarán los diseños en el software Autodesk Fusion 360 para obtener el código G que se ingresara a la impresora 3D.

F. Proceso de impresión 3D

En las siguientes ilustraciones se pudo observar el proceso y tiempo para poder imprimir las distintas piezas del prototipo. Se utilizó el material PLA, una velocidad de impresión de 60.0 mm/s, velocidad de desplazamiento de 100.0 mm/s, temperatura de la placa de impresión de 65°C y temperatura de impresión de 210°C.

En la Fig. 9 se pudo observar que, en las cuatro piezas se tardó un día con 10 horas aproximadamente y se gastó un aproximado de 456 gramos de filamento PLA.

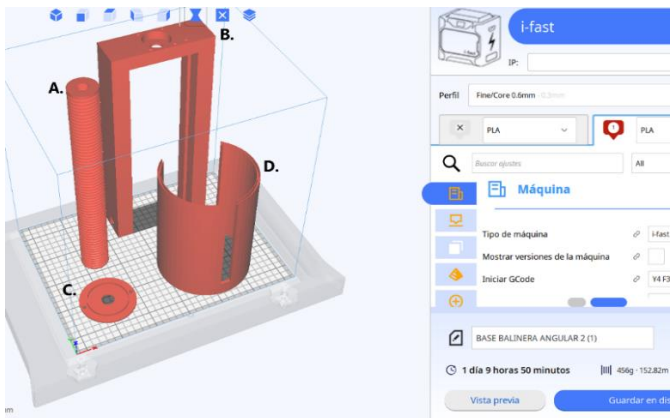


Fig. 9 Proceso de impresión. A. Tornillo sin fin. Columna para tornillo. C. Base balinera angular. D. Carcasa exterior.

En la Fig. 10 se pudo observar que en las tres piezas tardó aproximadamente 12 horas y se utilizó 152 gramos de filamento PLA.

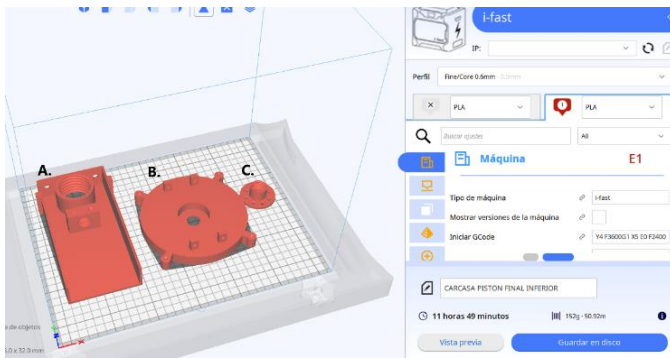


Fig. 10 Proceso de impresión 3D. A. Base pistón. B. Base tornillo. C. Acople actuador 180°.

VIII. FUNCIONAMIENTO Y ALGORITMOS

En la Fig. 12 se mostró la interfaz de control HMI, la cual se representó mejor en la Fig.11 por medio de un diagrama de flujo, la ejecución que tendrán las diferentes señales de botones e interruptores, así como también la forma de accionamiento de los actuadores. Dicho de otra forma, se muestra una forma más sencilla de la programación del tipo escalera realizada en la plataforma de siemens TIA PORTAL V16. La fuerza del aire que entrara por los actuadores se verá regulada de manera manual, ya que de ser necesario el cambio de compresor, podremos regular la cantidad de aire necesario para ejecutarse cada movimiento, ya sea que se necesite toda la potencia o poca.

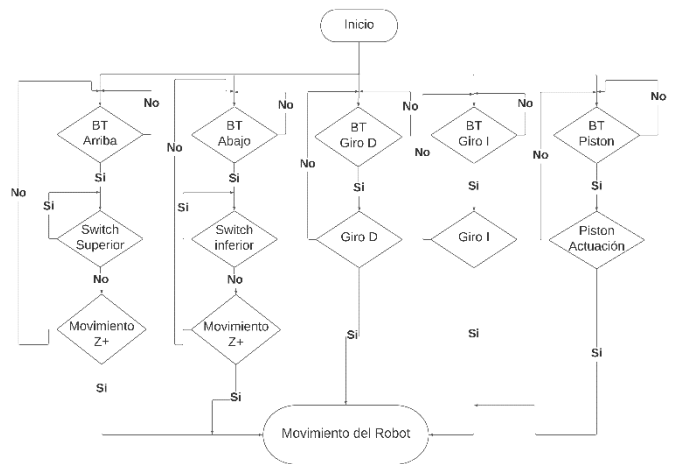


Fig. 11 Diagrama de flujo del código de programación

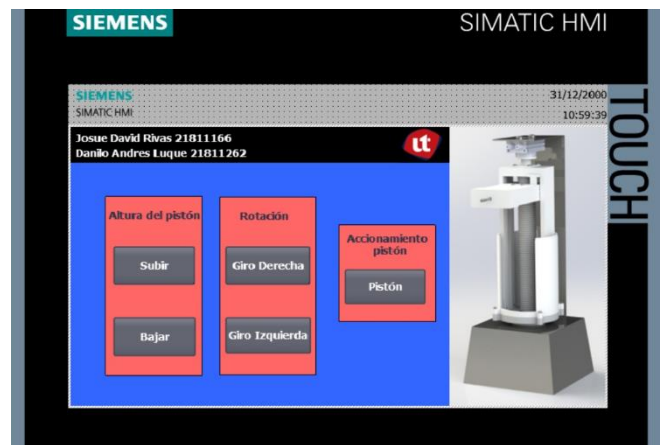


Fig. 12 Interfaz de control en HMI TP 700 Comfort.

A. Algoritmo cinemático directo

En lo que corresponde al modelo cinemático directo, se utilizó el método de Denavit–Hartenberg. El método se basó en operaciones geométricas y doble álgebra vectorial para procesar y determinar las matrices de transformación relativas, a partir de las cuales se calculan los parámetros estándar Denavit Hartenberg (D-H) [11]. En la Fig. 13 se pone en práctica el paso inicial del método, el cual consiste en identificar los ejes de desplazamiento y rotación en las articulaciones del robot cilíndrico, mientras que en Fig. 14 se colocan las distancias con las que se encuentran separadas cada uno de estos. Estos ayudaron a identificar los parámetros a colocar en la tabla predeterminada de valores del método D-H (a_i , α_i , d_i , θ_i).

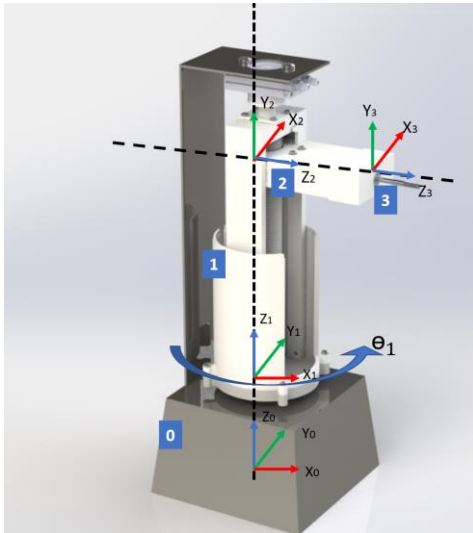


Fig. 13 Sistema de coordenadas para el análisis cinemático directo.

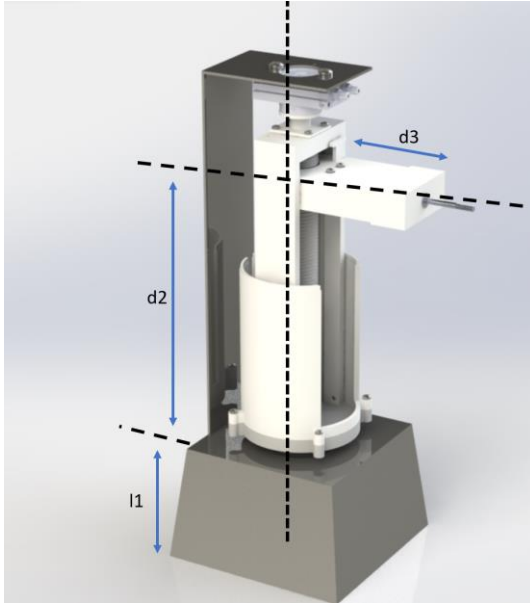


Fig. 14 Distancia entre articulaciones.

Luego de colocar los ejes y evaluar las distancias de las articulaciones, se procedió a elaborar la tabla de valores predeterminada de D-H (Tabla 2), con las cuales ayudaron a encontrar ciertas matrices que, multiplicándolas, determinan la matriz que defina la orientación y posiciones que optó por tomar las articulaciones según los movimientos que se quieran ejecutar. Para la obtención de las matrices (3), (4) y (5) se sustituyen los valores de la tabla 2, en la matriz general de D-H (2), para que al ser multiplicadas entre sí de la información necesaria para ver los movimientos del robot (7).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_i & -\text{Cos}\alpha_i \text{Sen}\theta_i & \text{Sen}\alpha_i \text{Sen}\theta_i & a_i \text{Cos}\theta_i \\ \text{Sen}\theta_i & \text{Cos}\alpha_i \text{Cos}\theta_i & -\text{Sen}\alpha_i \text{Cos}\theta_i & a_i \text{Sen}\theta_i \\ 0 & \text{Sen}\alpha_i & \text{Cos}\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

TABLA 2
VALORES DE CINEMÁTICA DIRECTA DEL ROBOT NEUMÁTICO

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	l_1	0	0
2	90°	d_2	0	90°
3	0	d_3	0	0

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta_1) & -\text{Sen}(\theta_1) & 0 & 0 \\ \text{Sen}(\theta_1) & \text{Cos}(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 \quad (6)$$

$$T = \begin{bmatrix} -\text{Sen}(\theta_1) & 0 & \text{Cos}(\theta_1) & d_3 * \text{Cos}(\theta_1) \\ \text{Cos}(\theta_1) & 0 & \text{Sen}(\theta_1) & d_3 * \text{Sen}(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & l_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

B. Cinemática Inversa

La cinemática inversa ayudó a saber las posiciones que tienen que tomar las articulaciones del robot para ubicar el efector final en una posición deseada, cada una de las fórmulas para determinar las posiciones se basan a partir de identidades trigonométricas.

El paso inicial de este método es identificar el origen del eje rotacional del robot y plasmar un eje coordinado, seguido de las distancias que hay entre sus articulaciones, tal como se observó en la Fig. 15.

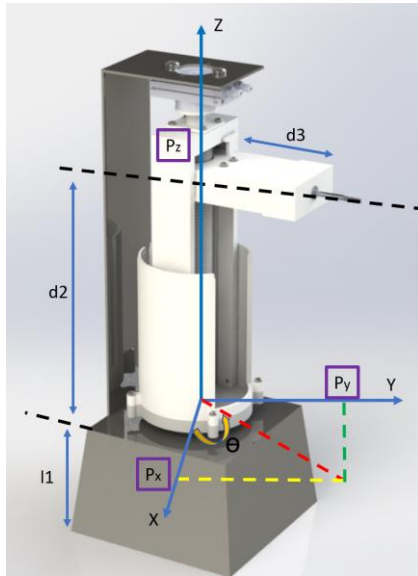


Fig. 15 Plano de movimiento e intersecciones del modelo cinemático inverso.

El paso siguiente se ubicó el modelo desde una perspectiva superior, usando el eje coordinado ubicamos las líneas de posiciones Pz, Py y Px, tal como se mostró en la Fig. 16, hasta que se interceptaran en un punto común, formando así un triángulo rectángulo con el que se ubicó el ángulo de rotación que toma el efector final,

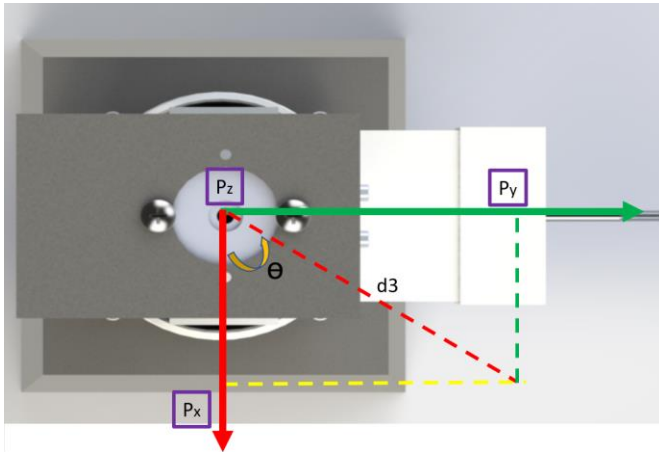


Fig. 16 Vista superior del modelo cinemático inverso.

Se hizo uso de funciones trigonométricas para la obtención de los distintos parámetros de distancia y ángulo, en (8) la determinación del punto máximo de Pz se basa en la suma de las dos longitudes bajo ella, a las cuales corresponden con la parte fija y la caja del pistón, dichos dantos pueden ser medibles y obtenidos de manera rápida, sin embargo, lo que se necesita es la posición que puede optar la caja, así que despejamos la ecuación para la distancia dos, tal como se muestra en la (9).

$$Pz = l1 + d2 \quad (8)$$

$$d2 = l1 - Pz \quad (9)$$

Para lo que es la longitud que se extiende el pistón simplemente se aplica el teorema de Pitágoras para determinar

dicha distancia (10), dando como resultado (11), al ser despejada correctamente.

$$d3^2 = Px^2 + Py^2 \quad (10)$$

$$d3 = \sqrt{Px^2 + Py^2} \quad (11)$$

Por último, para la obtención del ángulo se aplica una identidad trigonométrica (12) para ser despejada respecto a las posiciones Px y Py, dando como resultado (13).

$$\tan \theta_1 = \frac{Px}{Py} \quad (12)$$

$$\theta_1 = \text{atan 2}\left(\frac{Px}{Py}\right) \quad (13)$$

Cada uno de los valores obtenidos deberán funcionar entre las áreas de trabajo del robot tal como se indican en las Fig. 17 y Fig. 18.

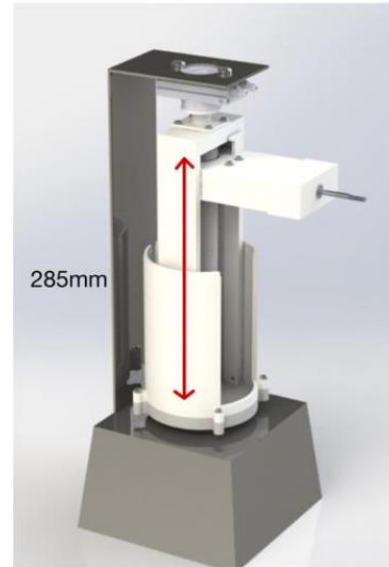


Fig. 17 Diagrama de movimiento de traslación.

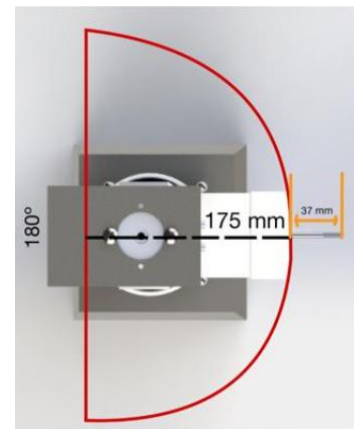


Fig. 18 Diagrama de movimiento mediante actuador giratorio de 180° y lineal.

CONCLUSIÓN

Se diseñó un robot cilíndrico neumático de 3 grados de libertad, obteniendo movimientos fluidos, conectado mediante electroválvulas, con relación a la presión aplicada por el compresor, realizando las piezas de este en el software de SolidWorks y las pruebas necesarias de resistencia y tensiones de Von Mises. Asimismo, se determinó el modelo cinemático directo con el método de Denavit Hartenberg, brindando una matriz de posiciones de ángulos y distancias de las articulaciones según la posición, y con ecuaciones geométricas el modelo cinemático inverso. De igual manera, se utilizó el software de TIA Portal para el diseño de la programación de tipo escalera con el objetivo de controlar todo el sistema neumático del robot, implementado una interfaz HMI para la comprensión de los controles del robot para el usuario. El resultado final del robot se aprecia en la Fig. 19.

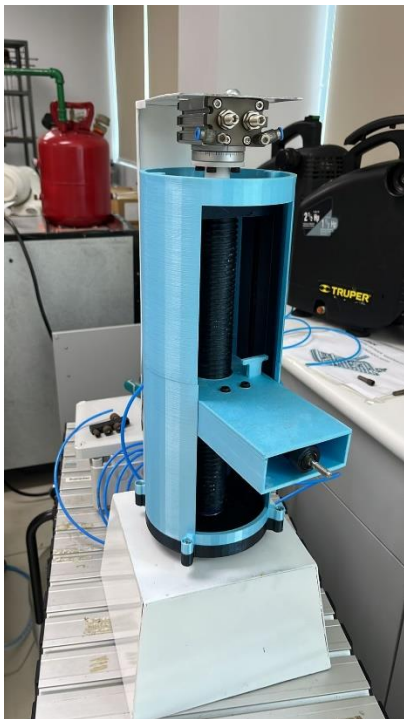


Fig. 19 Resultado final del prototipo.

REFERENCIAS

- [1] J. L. O. Avila *et al.*, «Study Case: Teleoperated Voice Picking Robots prototype as a logistic solution in Honduras», en *2020 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, Osaka, Japan, abr. 2020, pp. 19-24. doi: 10.1109/ICCRE49379.2020.9096483.
- [2] K. Jahnavi y P. Sivraj, «Teaching and learning robotic arm model», en *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, jul. 2017, pp. 1570-1575. doi: 10.1109/ICICT1.2017.8342804.
- [3] A. Vasquez y J. Luis Ordoñez Avila, «Seven Degrees of Freedom Simulation Comparison for Industrial Process in San Pedro Sula, Honduras», en *2020 6th International Conference on Robotics and Artificial Intelligence*, Singapore Singapore, nov. 2020, pp. 168-173. doi: 10.1145/3449301.3449330.

- [4] Z. Tang, Y. Pan, y Z. Cheng, «Vibration analysis and passive control of SCARA robot arm», en *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, Shanghai China, sep. 2019, pp. 89-93. doi: 10.1145/3366194.3366210.
- [5] S. Sathya, K. K. Goyal, G. Singh, J. Singh, y V. S. R. P. Akula, «Development of lab-scale extruder to produce feedstock filament for 3D printing using recycled thermoplastics», *Mater. Today Proc.*, nov. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.028.
- [6] A.-B. AL-Hussein, «Neural Network-Based Adaptive Control of Robotic Manipulator: Application to a Three Links Cylindrical Robot», *Iraqi J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, n.º 1, pp. 114-122, jun. 2017, doi: 10.37917/ijeee.13.1.13.
- [7] Jose-Eduardo Gaspar-Badillo, J.-M. Ramos-Arreguin, G. Macias-Bobadilla, D. Talavera-Velazquez, E.-A. Rivas-Araiza, y H.-B. Victor-Alexis, «Four DOF pneumatic robot design and hardware interface», en *2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN)*, may 2017, pp. 1-7. doi: 10.1109/CONIIN.2017.7968190.
- [8] M. Schluter y E. Perondi, «Mathematical Modeling with Friction of a SCARA Robot Driven by Pneumatic Semi-rotary Actuators», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, n.º 06, pp. 1066-1076, jun. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9099684.
- [9] Hang Su *et al.*, «Pneumatic Soft Robots: Challenges and Benefits», *Actuators*, vol. 11, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2022, doi: 10.3390/act11030092.
- [10] N. Glebov, T. Kruglova, y M. Shoshiashvili, «Intelligent Electro-pneumatic Module for Industrial Robots», en *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, oct. 2019, pp. 01-04. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934864.
- [11] C. Faria, J. L. Vilaca, S. Monteiro, W. Erlhagen, y E. Bicho, «Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators», en *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, oct. 2019, pp. 610-617. doi: 10.1109/IECON.2019.8927455.
- [12] H. Zhao, J. Zhao, Y. Lin, Q. Han, y M. Chen, «A New Calibration Method and Experimental Study for Kinematic Parameters of Industrial Robot», en *2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, Tianjin, China, jun. 2020, pp. 221-227. doi: 10.1109/AIEA51086.2020.00054.
- [13] E. G. Kalajahi, M. Mahboubkhah, y A. Barari, «Numerical Versus Analytical Direct Kinematics in a Novel 4-DOF Parallel Robot Designed for Digital Metrology», *IFAC-Pap.*, vol. 54, n.º 1, pp. 181-186, ene. 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.021.
- [14] Jin Huang, W. Ren, y C. Wang, «A Reinforcement Learning Approach for Inverse Kinematics of Arm Robot», en *Proceedings of the 2019 4th International Conference on Robotics, Control and Automation*, Guangzhou China, jul. 2019, pp. 95-99. doi: 10.1145/3351180.3351199.
- [15] S. Yuan, F. Shen, J. Bai, C. K. Chua, J. Wei, y K. Zhou, «3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization», *Mater. Des.*, vol. 120, pp. 317-327, abr. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.01.098.
- [16] K.-M. Lee, H. Park, J. Kim, y D.-M. Chun, «Fabrication of a superhydrophobic surface using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with poly lactic acid (PLA) filament and dip coating with silica nanoparticles», *Appl. Surf. Sci.*, vol. 467-468, pp. 979-991, feb. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.10.205.

