

Análisis de Elemento Finito a eslabones de Robot Didáctico impreso en 3D**Finite Element Analysis of 3D printed Educational Robot links**

Jorge Oswaldo Rivera-Nieblas ^{a, b*}, Jesús Andrés Peinado-González ^c, Eduardo Chávez-Mendiola ^{a, b}, Rogelio Acedo-Ruiz ^b, Juan Carlos Grijalva-Acuña ^{a, b}, Eusebio Jiménez-López ^d

^a Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Carreras de Ingeniería Biomédica, Semiconductores y Electrónica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^b Departamento de Metal-Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^c Carrera de Ingeniería Biomédica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuar, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^d Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, ULSA Noroeste, Cd. Obregón, Sonora, 85024, México.

Correo electrónico: jorge.riveran@hermosillo.tecnm.mx

(Recibido: 01 de diciembre 2024; Aceptado: 12 de diciembre 2024; Publicado: 01 de enero 2025)

Resumen

En este trabajo se hace uso del Análisis de Elementos Finitos a los eslabones de un Robot Articulado Didáctico de tres grados de libertad (DOF) de cadena abierta, utilizando el software SolidWorks®. Los eslabones de este Robot Articulado van a ser impresos en una Impresora 3D marca Creality® en material PLA, por lo que es importante desarrollar estas pruebas no destructivas antes de su impresión para realizar correcciones antes de manufacturar. Este análisis permite también desarrollar en estudiantes criterios al momento de manufacturar, como la selección del material, dimensiones de piezas, defectos, deformaciones, entre otros; recordando que el fin de este proyecto es la realización de material didáctico para clases como Robótica, Diseño de Elementos, Manufactura, entre otras, en diversas carreras de Educación Superior.

Palabras claves: Análisis de Elemento Finito(AEF), Robótica, Solidworks®, Robot Articulado, Robot SCARA, PLA, Impresión 3D.

Abstract

In this study, Finite Element Analysis (FEA) is applied to the links of a three-degree-of-freedom (DOF) open-chain educational articulated robot, utilizing SolidWorks® software. The links of this articulated robot are intended to be 3D printed using a Creality® printer with PLA material. Therefore, it is essential to conduct these non-destructive tests prior to printing in order to implement necessary corrections before manufacturing. This analysis also aids students in developing critical manufacturing criteria, such as material selection, part dimensions, defect identification, and deformation assessment. It is important to highlight that the ultimate goal of this project is to create educational materials for courses such as Robotics, Machine Elements Design, and Manufacturing, among others, across various higher education programs.

Keywords: Finite Element Analysis (FEA), Robotics, Solidworks®, Articulated Robot, SCARA Robot, PLA, 3D Printing.

1. Introducción

La robótica fue impulsada sin duda por la ciencia ficción a través de la literatura, series de televisión y el cine. En la historia humana se han descrito máquinas autónomas. [1] [2] Pero la que más ha fascinado en la actualidad es la llegada del robot humanoide con capacidad de razonar y tomar decisiones, usando IA como Sophia, Alice, Mark 1, Grace, Ameca robots de última generación. [3] [4] La realidad histórica, es que, se ha avanzado de algo ficticio a algo real, y con la llegada de la IA y sistemas tecnológico más avanzados, [1] [3] la brecha de las propuestas y visión de los autores de ciencia ficción se va haciendo realidad. Pero la manufactura de estos dispositivos actuales es cara y no es sencilla de adquirir, más aún si lo que se pretende es llevar diversos diseños a la Educación Superior (ES). [5]

Con la llegada de los equipos de Prototipado rápido, softwares de CAD, CAE, y CAM más intuitivos, [6] [7] [8] [9] la impresión en 3D [10] [11] esta brecha se ha reducido bastante por lo que hoy en día es más sencillo la manufactura de equipos didácticos aplicados en el aula y laboratorio en Educación Superior. [12] El uso de sistema robóticos permite a alumnos de ingeniería y ciencias de la computación el aprendizaje de diversos temas que son fundamentales en el ejercicio de su carrera profesional. [5]

Por ello es importante que en México la Educación Superior comience a invertir en que sus laboratorios se equipen con estas tecnologías. Es importante mencionar que la simulación permite diseñar y realizar pruebas no destructivas antes de manufacturar lo que es primordial en las industrias.

En este artículo, el diseño fue realizado usando el software SolidWorks® por sus capacidades y el fácil acceso a su información, certificación y licencia, además de que cuenta con Análisis de Elemento Finito (FEA, *Finite Element Analysis*). [6] [13]

Este trabajo consiste en dos configuraciones de armado que comparten su base rotatoria y eslabones. Las configuraciones fueron las siguientes: Una para un brazo Robótico Articulado y otra para un brazo Robótico tipo SCARA. Los eslabones poseen un método de ensamblaje rápido entre estos y las articulaciones mediante una conexión por fricción y un pasador.

El diseño fue analizado mediante el Análisis de Elementos Finitos (AEF ó FEA por sus siglas en inglés)

[14] al eslabón del brazo para verificar que pudiese soportar el peso previo a su manufactura del Robot. [15]

2. Desarrollo

Un Manipulador o Brazo Robótico es una máquina cuyo mecanismo esta generalmente compuesto por una serie de segmentos articulados o deslizantes unos en relación con los otros, que tiene finalidad tomar o desplazar objetos (piezas o herramientas) generalmente según varios grados de libertad (GDL o DOF). [1] [2] [3] [16] [17]

Todo robot contiene partes, como son:

- Estructura mecánica.
- Controlador.
- Sensores.
- Actuadores.
- Etc. [1] [2]

Otros autores mencionaron que contiene tres subsistemas:

- 1) Subsistema de Movimiento.
- 2) Subsistema Reconocimiento.
- 3) Subsistema de Control. [3]

2.1 Estructura mecánica, eslabones, articulaciones y grados de libertad de un Robot

La estructura mecánica de un robot puede estar compuesta de articulaciones, eslabones, reductores, trasmisiones, pares, entre otros.

Un eslabón es un cuerpo rígido que mantiene unidas las articulaciones.

Una articulación (*joint*) es un tipo de enlace entre dos sólidos que obliga a que ambos se muevan compartiendo un punto común, trasladándose juntos, pero dejando libre algunos de los grados de libertad de orientación entre ambos.

En robótica podemos utilizar las Articulaciones lineales Prismáticas (1 GDL), la Articulación Rotacional o Revoluta (1 GDL), (ver figura 1) y la Articulación de Tornillo (1 GDL) de manera lineal, que en la robótica ya no se usa por cuestión de mantenimiento y velocidad.

Los grados de libertad (GDL) son el número de parámetros independientes que fijan la posición del robot, es decir las articulaciones del dispositivo y suelen coincidir con el número de eslabones de la cadena cinemática.

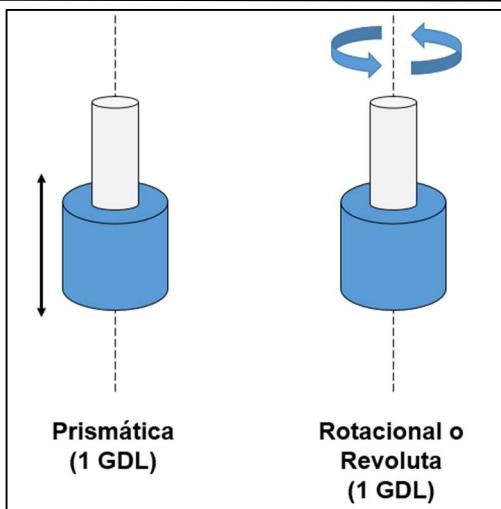


Fig. 1 Articulación Prismática y Rotacional.

2.2 Cadena cinemática de Robots

Los robots manipuladores pueden contener los siguientes tipos de cadenas cinemáticas:

- 1) **Cadena abierta.** Sus elementos se encuentran conectados uno a uno en serie.
- 2) **Cadena cerrada.** Sus elementos están conectados en paralelo. En esta la cadena se forma un lazo o ciclo u otra manera es ir de un punto de la cadena y regresar a este. [3]

2.3 Tipos de robots de cadena abierta según su estructura

Los robots de cadena abierta se pueden clasificar según su estructura en:

- 1) Cartesianos.
- 2) Cilíndricos.
- 3) Esféricos o Polares.
- 4) Antropomórficos o Articulares.
- 5) SCARA. [1] [3]

La figura 2 presenta ejemplo de los tipos de estructuras de cadena abierta.

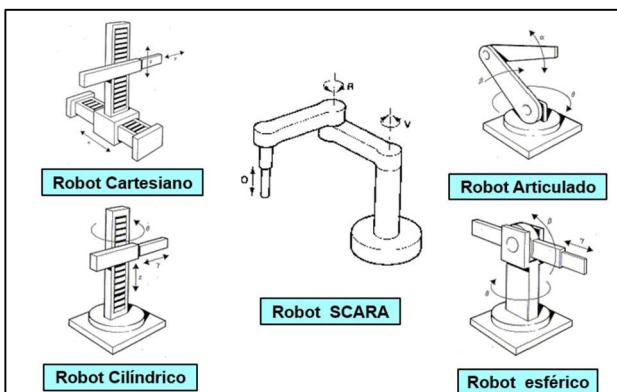


Fig. 2 Tipos de estructuras de cadena abierta en Robots.

2.4 Impresión 3D

La impresión 3D, también llamada fabricación aditiva, es un proceso que crea objetos tridimensionales (3D), mediante la superposición de capas de material, partiendo de un modelo digital.

La impresión 3D funciona de la siguiente manera:

- 1) **Diseño 3D:** Se crea un modelo digital del objeto utilizando *software CAD*, por ejemplo, SolidWorks®.
- 2) **Preparación del archivo:** El modelo 3D se divide en capas y se prepara para la impresión, utilizando un *software* de laminado, por ejemplo, Creality Print®.
- 3) **Impresión:** La impresora 3D construye el objeto capa por capa, depositando o solidificando material según el diseño. La figura 3 presenta una impresora 3D marca Creality® modelo K2 Plus Combo. [11]



Fig. 3 Impresora 3D Creality K2 Plus Combo.

2.5 Filamento PLA

El filamento PLA (Ácido Poliláctico) es un tipo de plástico biodegradable y es uno de los materiales más utilizados para la impresión 3D. [12] [18]

Las propiedades comunes del filamento PLA son las siguientes:

- Resistencia a la tracción: **37 MPa**.
- Alargamiento es de aproximadamente: **6%**.
- Módulo de flexión: **4 GPa**.
- Densidad: **1.3 g/cm³**.
- Punto de fusión: **173 °C**.
- Temperatura de transición vítrea: **60 °C**.

Ventajas del Filamento PLA:

- Ideal para principiantes.
- Precio más bajo.
- Funciona bien para impresiones complejas.
- Ideal para la creación de prototipos.

Desventajas del Filamento PLA:

- Puede ser sensible al calor.
- Quebradizo.
- Inflexible en comparación con otros filamentos. [18]

3. Metodología

Para el Diseño del robot se siguieron los siguientes pasos:

- **Selección de actuadores:** Se emplearon motorreductores de alto torque del tipo tornillo sin engranaje helicoidal, con la finalidad de que mantuviera la posición en caso de pérdida de energía. Además, poseen la capacidad de control de posición y sentido de giro por medio de *encoders* rotatorios. [19]
- **Selección de componentes mecánicos:** Se utilizaron diversos componentes de tornillería y respectivos insertos roscados, rodamientos tanto lineales como rotativos, ejes lineales, y balines para el funcionamiento de la base rotatoria.
- **Diseño mecánico:** Se utilizó el programa SolidWorks®. El objetivo final de un diseño mecánico exitoso es obtener un producto que se adapte a las necesidades planteadas, [20] se aplicaron criterios de diseño que permitan hacer más factible su fabricación por medio de impresión 3D. [10]
- **Análisis de Elementos Finitos:** Se realizó por medio de la *suite Simulation* del programa SolidWorks® para comprobar la resistencia del eslabón. [14]
- **Impresión en 3D:** Las piezas fueron impresas con una altura de capa de 0.4 mm.
- **Ensamblaje y pruebas:** Se ensamblaron las piezas impresas con actuadores y demás componentes mecánicos mencionados con anterioridad. Asimismo, si hicieron pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema de ensamblaje y articulaciones del diseño.

4. Resultados

A continuación, se presenta los resultados de la simulación de los diseños de Robot Articulado y SCARA.

4.1 Diseño mecánico

Se diseñaron un total de 18 piezas para el ensamblaje del Brazo Robótico Articulado, la figura 4 se muestra el ensamblaje del brazo robótico articulado en SolidWorks®, esto sin contar las configuraciones

específicas de cada ensamblaje de algunas de las piezas mencionadas.

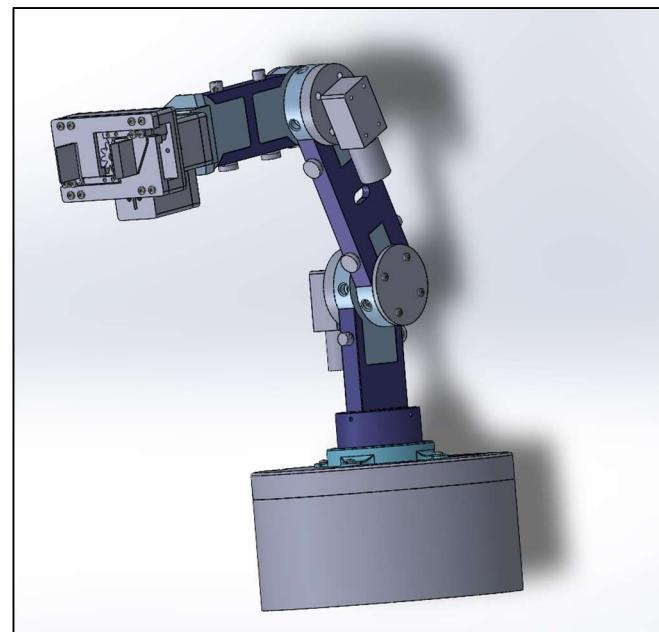


Fig. 4 Ensamble del brazo robótico articulado.

La figura 5 muestra el ensamblaje del Brazo Robótico SCARA un total de 25 piezas, esto sin contar las configuraciones específicas de cada ensamblaje de algunas de las piezas mencionadas.

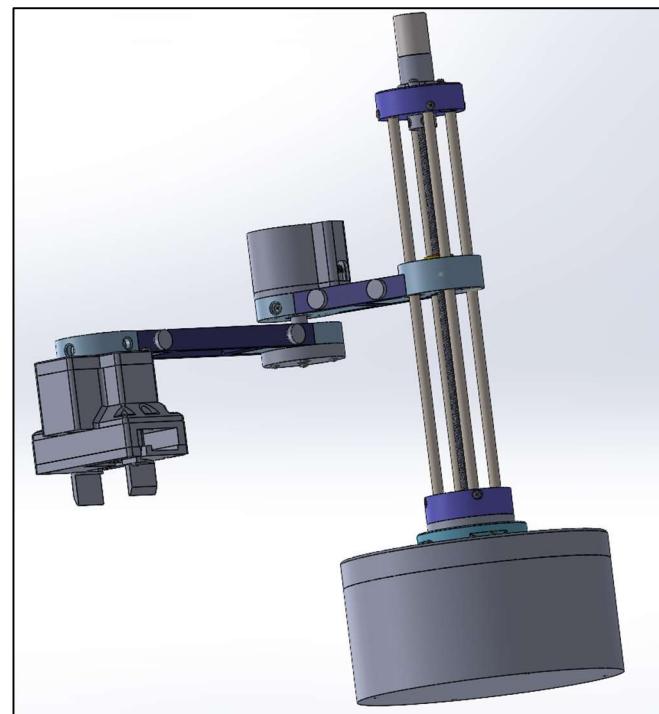


Fig. 5 Ensamble del brazo robótico SCARA.

Además, para cada ensamble se utilizaron componentes del tipo tornillería, actuadores, sí como rodamientos y otros componentes.

En la tabla 1 se presentan los materiales para el ensamble del Robot Articulado completo, incluyendo los actuadores, entre otros elementos.

Tabla 1 Lista de materiales del ensamble para el Brazo Robótico Articulado.

No. de pieza	Nombre	Descripción	Cant.
1	Pasador		5
2	Montaje de motor	2 por cada articulación usada	4
3	Montaje rápido	Longitud central 10 mm	1
4	Montaje rápido	Montaje para base rotatoria	1
5	Montaje de motor	Montaje de <i>gripper</i> frontal	1
6	Montaje rápido	Longitud 40 mm	1
7	Esféra paramétrica	Balines de acero de 5 mm	30
8	Base		1
9	5972K95	Balero 6001	4
10	Pasador 12 mm		2
11	YSB DIN7985	M3 *12 mm	26
12	Retenedor		1
13	Protector de componentes		1
14	YSB DIN7985	M3 *16 mm	12
15	Encastre de motor		1
16	Ensambaje <i>gripper</i>		1
17	Base <i>gripper</i>		1
18	YSB DIN7985	M3 *16 mm	5
19	Base <i>gripper</i>		1
20	Montaje para mordazas y motor		1
21	Engranaje conductor		1
22	Cremallera <i>gripper</i>		2
23	Retenedor de <i>chuck</i>		2
24	Mordazas		2
25	MG995		1
26	YSB DIN7985	M3*12 mm	19
27	YSB DIN7985	M4*8 mm	4
28	Cople		1
29	Rodamiento		1
30	Mock up motorreductor	Se trata de un motorreductor JGY-370 con encoder	3
31	Adaptador motor con transmisión		2
32	Adaptador motor con transmisión		1
33	YSB DIN7985	M3*20 mm	12
34	YSB DIN7985	M3*30 mm	4

En la tabla 2 se presentan los materiales para el ensamble del robot SCARA completo, incluyendo los actuadores, entre otros elementos.

Tabla 2 Lista de materiales para el ensamble del Robot SCARA.

No. de pieza	Nombre	Descripción	Cant.	
1	Montaje rápido	Longitud central 10 mm	1	
2	Montaje rápido	Configuración 100 mm	1	
3	Montaje de motor	Configuración Contiene puntos de montaje para 28BYJ	2	
4	Pasador		4	
5	Montaje de motor	Montaje a tornillo	1	
6	Tuerca T8		1	
7	Montaje de motor	Montaje SCARA	1	
8	Riel lineal	Riel lineal de 8 mm de grosor, longitud a elección	4	
9	Tornillo T8		1	
10	Tapa superior Robot SCARA	Configuración predeterminada	1	
11	Tapa superior Robot SCARA	Montaje de motor	1	
12	5972K91	Ball Bearing 608	1	
13	YSB DIN7985	M3* 5mm	5	
14	LM8UU.stp		4	
15	5972K95	Ball Bearing	2	
16	Pasador 12 mm	Pasador SCARA	1	
17	Tapa SCARA		1	
18	Placa de montaje MG995		1	
19	Tapas	Para motor MG995	1	
20	YSB DIN7985	M3*25 mm	2	
21	YSB DIN7985	M3*8 mm	8	
22	Encastre de motor	Servomotor MG995	1	
23	Mock up motor GM25-370	Motor GM25-370	2	
24	Placa adaptadora		2	
25	YSB DIN7985	M3*10 mm	6	
26	Encastre de motor	Pin corto	1	
27	Protector de componentes		1	
28	Ensambaje <i>gripper</i>		1	
	Base <i>gripper</i>		1	
	YSB DIN7985	M3*16 mm	5	
	Base <i>gripper</i>		1	
	Montaje para mordazas y motor		1	
	Engranaje conductor		1	
	Cremallera <i>gripper</i>		2	
	Retenedor de <i>chuck</i>		2	
	Mordazas		2	
	MG995		1	
	YSB DIN7985	M3*12 mm	19	
	YSB DIN7985	M4*8 mm	4	
	29	YSB DIN7985	M3*16 mm	19
	30	Base	1	
	31	Rodamiento	Adaptación2	1
	32	Esféra paramétrica	Balines de 5 mm	22
	33	Conector de rodamiento		1
	34	Retenedor		1
	35	MG995		1

36	YSB DIN7985	M4*8 mm	4
37	YSB DIN7985		4
38	Cople 8 mm-7 mm		1
39	YSB DIN7985	M3*6 mm	10
40	YSB DIN7985	M3*12 mm	7
41	Adaptador motor con transmisión		1
42	Mock up motorreductor	Motorreductor con encoder JGY-370	1
43	YSB DIN7985	M3*20 mm	4
44	Cople		1
45	YSB DIN7985	M3*30 mm	4

4.2 Simulación

Se realizó una prueba de Análisis de Desplazamiento con el eslabón del brazo, utilizando ABS como material base de fabricación, se simuló una carga remota de 1 kg, se analizaron sus desplazamientos, las deformaciones unitarias y las tensiones de Von Mises, lo cual se pueden observar en la sección de resultados.

Se sometió una de las piezas que tienen que soportar mayores esfuerzos en el robot, para ver si sería capaz de soportar la carga, en particular el sistema de montaje. Los resultados se pueden observar a continuación.

En la figura 6 se puede observar que, en la punta del lado derecho de la pieza, es donde se identifica el mayor desplazamiento producido por la carga propuesta, en cambio, el lado izquierdo de la pieza, se puede observar en color azul el menor desplazamiento producido por la carga.

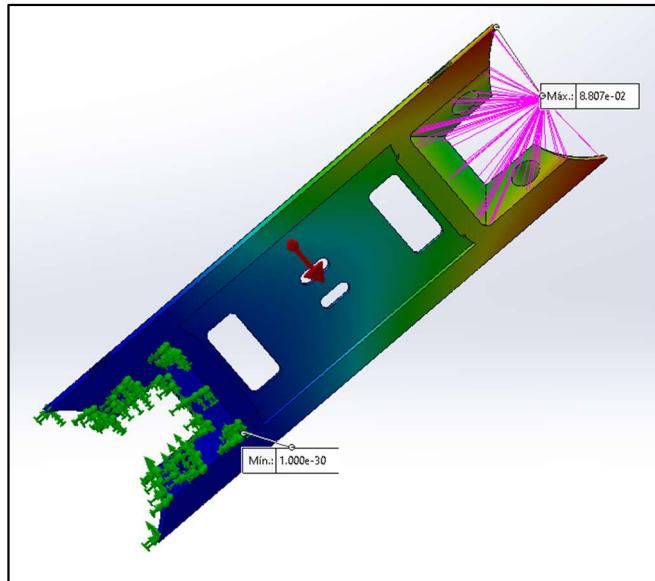


Fig. 6 Análisis de Desplazamiento.

La tabla 3 presenta los valores específicos del Análisis de Desplazamiento en escala de colores.

Tabla 3 Escala del análisis de desplazamiento.

Color	Desplazamiento en mm
Rojo	8.807×10^{-2} (máximo)
Naranja	7.926×10^{-2}
Verde amarillo	7.046×10^{-2}
Verde	6.165×10^{-2}
Cian	5.284×10^{-2}
Verde azulado	4.404×10^{-2}
Azul	3.523×10^{-2}
Cian	1.761×10^{-2}
Azul	8.807×10^{-3}
Azul	1.000×10^{-30}

En la figura 7 se puede observar el Análisis de Deformación, se concluye que en la superficie de la pieza se tienen valores de deformación mínimos.

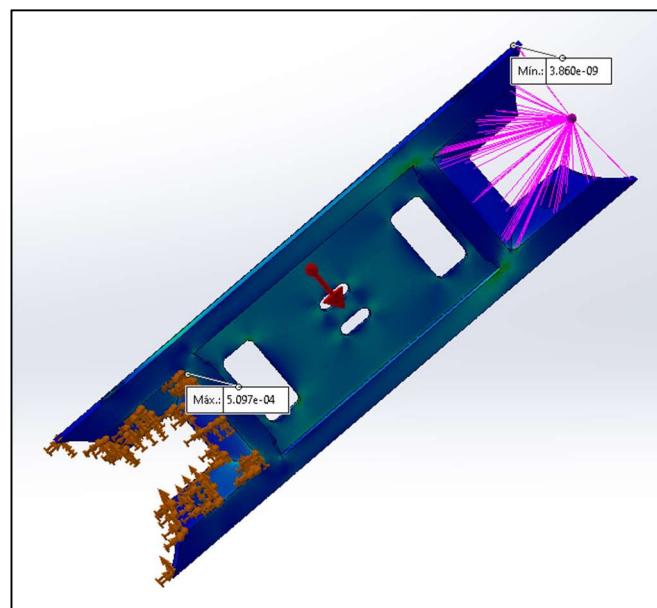


Fig. 7 Análisis de Deformación.

En la tabla 4 se pueden ver los valores específicos de cada uno de los colores que se identifican en la pieza.

Tabla 4 Escala del Análisis de Deformación.

Color	Deformaciones unitarias
Rojo	5.097×10^{-4}
Naranja	4.587×10^{-4}
Verde amarillo	4.077×10^{-4}
Verde	3.568×10^{-4}
Cian	3.058×10^{-4}
Verde azulado	2.548×10^{-4}
Azul	2.039×10^{-4}
Cian	1.529×10^{-4}
Azul	1.019×10^{-5}
Azul	3.860×10^{-9}

En la figura 8 se identifica el Análisis de Tensión producido por la carga propuesta, los extremos de la pieza son donde se concentra la mayor tensión referente al diseño de la pieza.

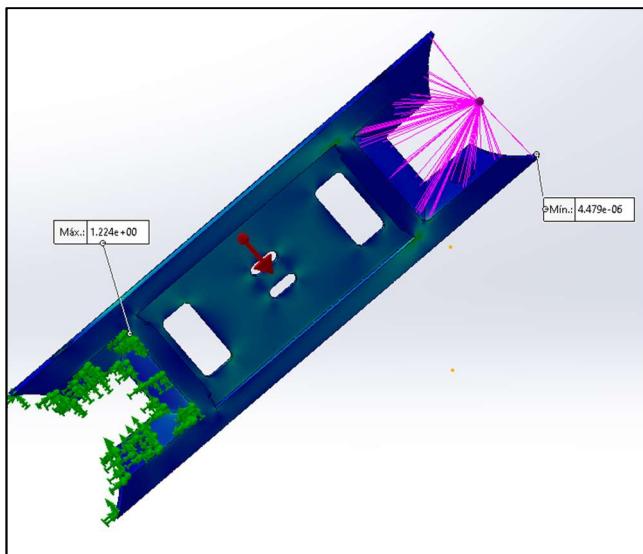


Fig. 8 Análisis de Tensiones.

Los valores de tensión de cada color se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5 Escala del Análisis de Tensiones.

Color	Tensión en N/mm ²
Rojo	1.224
Naranja	1.102
Amarillo	9.792*10 ⁻¹
Verde	8.568*10 ⁻¹
Verde	6.120*10 ⁻¹
Verde	4.896*10 ⁻¹
Cian	3.672*10 ⁻¹
Cian	2.448*10 ⁻¹
Azul	1.224*10 ⁻¹
Azul	4.479*10 ⁻⁶

4.3 Impresión 3D y ensamblaje físico

Cuando se comprobó por medio de la simulación que el sistema de montaje era capaz de soportar el peso, se introdujo al laminador las piezas (ver figura 9), una por una. El *software* de CAD se encarga de reproducir el diseño de las piezas, pero para poder imprimir en 3D dicho diseño, se requiere de una herramienta que convierta este diseño a comandos G, que se realiza a través del *software* determinado por el fabricante de la impresora 3D.

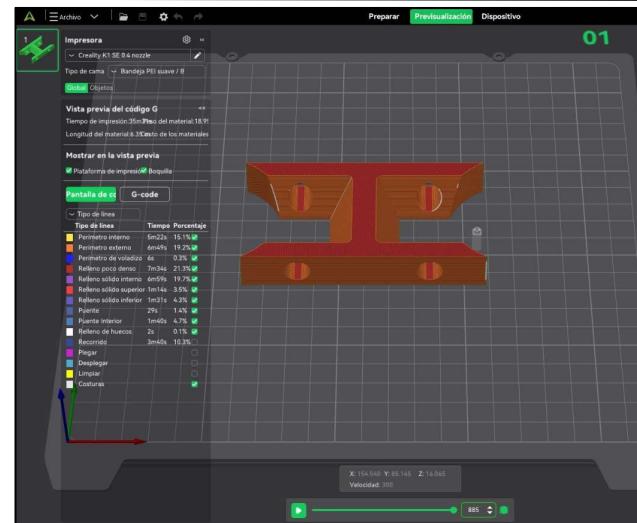


Fig. 9 Laminado de la pieza.

Al obtener los códigos de impresión, estos fueron usados en una impresora 3D para obtener las piezas impresas en PLA como se puede observar en la figura 10.



Fig. 10 Eslabón corto impreso en PLA.

5. Conclusiones

El Análisis de Elemento Finito muestra la utilidad de diseñar sistemas robóticos con un enfoque a la manufactura por medio de Impresión en 3D.

La integración de piezas manufacturadas tradicionalmente, con piezas impresas en 3D permiten obtener un balance muy provechoso en materia de costos, sin perder necesariamente por ello, capacidades que son necesarias en un brazo robótico.

Se proponen investigaciones futuras como el diseño de un sistema de control que se adapte a ambas configuraciones, así como el estudio respecto a cómo impacta en la educación de los alumnos el acceso a

tecnologías de Impresión 3D, que, si se pueden modificar, en contraposición a Brazos Robóticos Comerciales, que, por su costo, no suelen tener un acceso tan libre los estudiantes.

La aplicación de Impresión 3D conlleva a que el docente actual se prepare en la aplicación de estas tecnologías (diseño, simulación y manufactura) y la aplicación de estas en el aula y laboratorio, para la asimilación tecnológica por parte de los alumnos.

Por el momento el proyecto se encuentra en la etapa de desarrollo de un sistema de control integrado que le permita una conexión con otros dispositivos, ya sea computadoras o dispositivos móviles más allá de un controlador simple.

6. Agradecimientos

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México Campus Hermosillo por todas las facilidades prestadas para el desarrollo de este trabajo, a los alumnos de la carrera de Ingeniería Biomédica, y a PRODEP por los Apoyos de Fortalecimiento a Cuerpos Académicos en el proyecto: Diseño y elaboración de prótesis, usando técnicas de manufactura para sistemas mecatrónicos.

7. Referencias

- [1] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, Fundamentos de Robótica, 2da Edición ed., Aravaca: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2007.
- [2] J. J. Craig, Robótica, Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice Hall, 2006, p. 408.
- [3] S. K. Saha, Introducción a la Robótica, Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana, 2010.
- [4] International Federation of Robotics, «ifr.org,» 2024. [En línea]. Available: <https://ifr.org/service-robots>. [Último acceso: 21 11 2024].
- [5] U. Gerecke y B. Wagner, «The Challenges And Benefits of Using Robots in Higher education,» Intelligent Automation & Soft Computing, vol. 13, nº 1, pp. 29-43, 2007.
- [6] Dassault Systèmes, «https://www.3ds.com/» 2024. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>. [Último acceso: 21 11 2024].

[7] Autodesk, «autodesk.com,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/mx/solutions/finite-element-analysis>. [Último acceso: 22 11 2024].

[8] Autodesk, «autodeskjournal.com,» Autodesk Journal, 28 01 2021. [En línea]. Available: <https://www.autodeskjournal.com/que-es-diseno-parametrico-conceptos-aportes-ingenieria/>. [Último acceso: 10 11 2024].

[9] Markforged Holding Corporation, «markforged.com,» 2024. [En línea]. Available: <https://markforged.com/es/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/3d-printing-strategies-for-composites/composites-3d-printing-design-tips>. [Último acceso: 25 11 2024].

[10] Hydra research, «hydraresearch3d.com,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.hydraresearch3d.com/design-rules>. [Último acceso: 22 11 2024].

[11] R. Forgach, «shapr3d.com,» 17 10 2022. [En línea]. Available: <https://www.shapr3d.com/blog/design-for-3d-printing>. [Último acceso: 23 11 2024].

[12] M. A. Abdul Wahit, S. A. Ahmad, M. H. Marhaban, C. Wada y L. I. Izhar, «3D Printed Robot Hand Structure Using Four-Bar Linkage Mechanism for Prosthetic Application,» Sensors, vol. 20, nº 15, p. 4174, 2020.

[13] S. Gómez Gonzalez, El gran libro de Solidworks, Ciudad de México: Alfa Omega, 2017.

[14] Autodesk, «Análisis de Elementos Finitos,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/mx/solutions/finite-element-analysis>. [Último acceso: 16 enero 2025].

[15] R. G. Budynas y K. J. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Ciudad de México: Mc Graw Hill Education, 2018.

[16] W. Bolton, Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 6ta ed., Editorial Alfaomega, 2017, p. 664.

[17] J. Hernandez, M. S. H. Sunny, J. Sanjuan, I. Rulik, M. I. I. Zarif, S. I. Ahamed y M. H. Rahman, «Current designs of robotic arm grippers: A

comprehensive systematic review.,» *Robotics*, vol. 12, nº 1, p. 33, 02 01 2023.

[18] bcn3d.com, «bcn3d.com,» 28 06 2022. [En línea]. Available:

<https://www.bcn3d.com/es/filamento-pla-los-pros-y-los-contras-de-este-material-basico/>. [Último acceso: 30 11 2024].

[19] C. E. Conejo Benitez, Tesis de Maestria: Modelado y control de un brazo Robótico de 3 grados de libertad, Salamanca, Guanajuato, 2021.

[20] R. L. Matt, Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición ed., Naucalpan de Juárez: Prentice Hall, Inc., 2006.