

Análisis Cinemático y de Esfuerzos en Brazo Manipulador para la Recolección de la Cereza del Café



Colaboración

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Gabriel Ángel Ramírez Vicente; Jorge Rivera Flores, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

Fecha de recepción: 15 de enero de 2025

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2025

RESUMEN: El presente artículo expone los resultados del análisis de esfuerzos realizado a los elementos de un brazo manipulador destinado a la cosecha del grano de café. Se expone la cinemática del manipulador, así como el análisis estático mediante cargas límite para evaluar su resistencia. El estudio cinético y el análisis estático se realizaron mediante un software especializado CAD aplicando la metodología del elemento finito.

Los resultados arrojados por el análisis corroboraron que el material seleccionado para la fabricación del sistema mecánico soportará adecuadamente los esfuerzos. El prototipo se elaborará mediante fabricación aditiva, utilizando filamento PLA; y se ha demostrado su funcionamiento en un prototipo funcional, que ha confirmado un desempeño superior al esperado, lo que pone de manifiesto que la construcción de un prototipo de mayores dimensiones es técnicamente viable.

PALABRAS CLAVE: Brazo manipulador, Cinemática, Análisis de esfuerzos, Grano de café, Impresión 3D.

ABSTRACT: This paper presents the results of the stress analysis performed on the elements of a manipulator arm used for coffee bean harvesting. The kinematics of the manipulator is presented, as well as the static analysis using limit loads to evaluate its resistance. The kinematic study and the static analysis were carried out by means of a specialized CAD software applying the finite element methodology.

The results of the analysis corroborated that the material selected for the fabrication of the mechanical system will adequately support the stresses. The prototype will be manufactured by additive manufacturing, using PLA filament; and its operation has been demonstrated in a functional prototype, which has confirmed a higher performance than expected, which shows that the construction of a larger prototype is technically feasible.

KEYWORDS: Manipulator arm, Kinematics, Stress analysis, Coffee bean, 3D printing.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), México se posiciona dentro de los principales países productores de café en el mundo, con potencias como: Brasil, Colombia o Vietnam. El ranking de productores se basa en la cantidad de café que se produce anualmente, esta se ha visto mermada en los últimos años alcanzando actualmente 3,600,000 sacos (60 kg por saco) por año, debido en gran medida a la disminución en la exportación derivada de la

caída del precio internacional del café que, en consecuencia, vuelve al producto menos atractivo para los productores.

En México, estados como Veracruz, Oaxaca o Chiapas cuentan con denominaciones de origen. Sin embargo, el estado de Puebla ocupa el tercer lugar a nivel nacional en producción, siendo la sierra nororiental una de las zonas más importantes con producciones anuales que rebasan las 18,500 toneladas de café, con calidad de exportación.

De acuerdo con SAGARPA (2019), los municipios que pertenecen a la sierra nororiental contribuyen de manera importante aportando más de 10,000 toneladas anuales del aromático. Municipios tales como: Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán Tlatlauquitepec, Venustiano Carranza y Zacapoaxtla [1] [2] [3] [4] tienen plantaciones de calidad internacional.

En muchos de los cafetales la siembra de la planta del café se realiza en laderas debido a las condiciones orográficas de la región, permitiendo el cultivo de un grano de calidad de exportación. Estas condiciones se atribuyen al bosque mesófilo de montaña, que se presenta en altitudes comprendidas entre 800 y 2400 msnm (metros sobre el nivel medio del mar) donde confluyen poblaciones como: Teziutlán, Cuetzalan y Xicotepec, donde la topografía del terreno es escarpada.

La recolección manual, tradicionalmente utilizada en las plantaciones de café en Puebla debido a su topografía montañosa, enfrenta limitaciones que afectan tanto la productividad como la calidad del grano, como lo comenta el señor, Aquilino Santillán López propietario del cafetalero "Xanát Café" en entrevista realizada in situ desde el lugar donde se realizará el proyecto.

La propuesta de un brazo manipulador robótico busca superar las limitaciones inherentes al proceso manual. El enfoque específico en el diseño adaptado a las condiciones geográficas de Puebla, junto con la aplicación de la tecnología robótica, ofrece la posibilidad de mejorar la eficiencia, velocidad y precisión de la cosecha, beneficiando tanto a productores como a consumidores.

La implementación de un brazo manipulador automatizado tiene el potencial de transformar la forma en que se cosechan los granos de café en la región, mejorando la calidad del grano y optimizando la productividad. La propuesta contribuye a mitigar los riesgos asociados con el trabajo manual, como son los daños por manipulación incorrecta, caídas y movimientos bruscos, preservando así la integridad de los granos.

Con base en la literatura analizada, no se observa evidencia de un dispositivo de similares características. El proyecto más cercano fue una competencia de robots

recolectores de café desarrollada en 2011, donde la práctica fue demostrativa. Para lograr este objetivo es preciso dividir el proyecto en dos partes: por un lado, el diseño de la aeronave de recolección que tendrá la tarea de llevar los granos de café hacia un punto de acopio y como complemento, el diseño de un brazo manipulador que pueda retirar los granos de la planta sin causar daño a los que aún no se encuentran en condiciones de ser cosechados.

Por lo tanto, en este trabajo se presenta el análisis de los esfuerzos que se presentan en los elementos que conforman el prototipo con la finalidad de saber si el material empleado en su construcción es el adecuado para resistir los esfuerzos que se presentan en la propuesta de diseño.

MATERIAL Y MÉTODOS

La propuesta se basa en la integración de principios de robótica y análisis cinemático para crear una solución técnica que aumente la eficiencia y calidad del proceso de recolección. Para lograrlo se sigue la metodología lineal de diseño, Figura 1 donde luego de tres iteraciones, el modelo presentado en la Figura 2 se caracteriza por tener los motores que le dan la movilidad concentrados en la parte superior lo más cerca del centro de gravedad del dron, en lo que se interpretaría como el hombro del brazo.

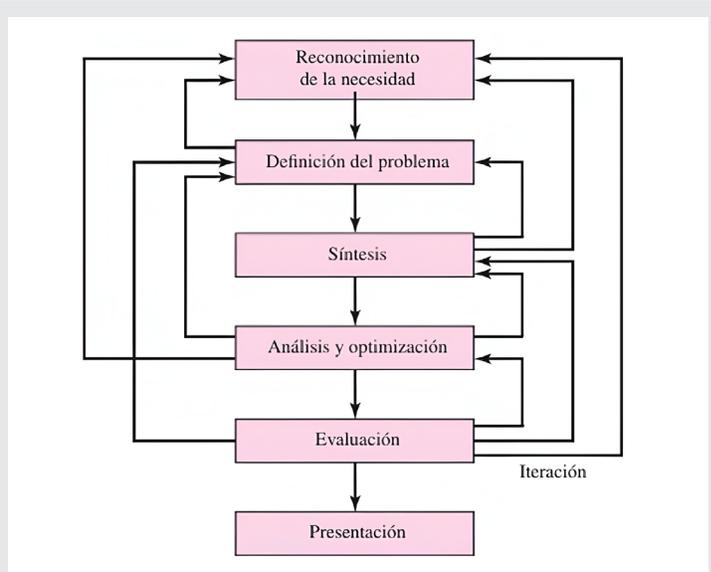


Figura 1. Metodología Lineal de Diseño. Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Budynas y Nisbett 8va Ed.

El brazo se montará en una base provisional para realizar prueba. Con el fin de simular el movimiento del dron sobre el eje vertical se aprovisiono con un motor que me brindará la movilidad necesaria.

Los parámetros de diseño requeridos, que corresponden con el planteamiento del modelo, se exponen a continuación:

- Existen 2 eslabones que integran el brazo manipulador, el eslabón primero "Bombro2" tiene 90 grados de libertad de movimiento en "Y" y el eslabón "Brazo" tiene 180° de movimiento en "Y", este segundo es el que va a recibir la fuerza de los frutos.
- Se mejoró la base teniendo en cuenta el equilibrio con respecto del centro de gravedad del robot, lo cual permitió que el brazo desequilibre lo menos posible a la máquina que lo trasportará.
- La cámara se ubica en la parte superior del hombro del brazo dejando totalmente libre al brazo manipulador.
- El peso del manipulador es menor que la carga límite de 800 gramos que se traduce en la máxima carga útil con la que cuenta el dron.

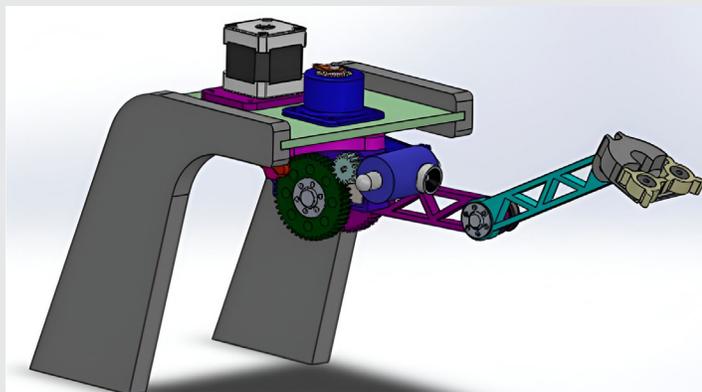


Figura 2. Iteración final del diseño del brazo manipulador. Se observa el brazo montado en una base que ocupa el lugar del dron donde se realizará el ensamble final.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Tabla 1 muestra la ponderación establecida para los parámetros de selección, el dispositivo debería de cumplir con: una funcionalidad que le permitiera cumplir con la tarea para la cual sería diseñado, el peso es otro factor importante a tener en cuenta ya que el brazo deberá de ir adosado a una maquina voladora y como es sabido cuanto mayor sea el peso a levantar el consumo energético se incrementa, de igual forma es importante tener un mecanismo confiable para que el porcentaje de falla se el menor posible, finalmente el tamaño y la forma son considerados para lograr una propuesta acorde al tamaño de la máquina que lo trasportará.

Tabla 1. Ponderación establecida para la selección de la iteración de diseño.

Propiedad	Ponderación
Funcionalidad - 30%	27 %
Peso - 30 %	30 %
Confiabilidad - 20 %	17 %
Forma - 10 %	10 %
Tamaño - 10 %	10 %
Total	94%

Fuente: Elaboración propia 2024.

Al realizar la suma de las ponderaciones de los criterios de diseño se obtiene el 94% porcentaje que permite concluir que el mecanismo diseñado tendrá un desempeño adecuado.

Cinemática directa del brazo manipulador

Para realizar el estudio de la cinemática del brazo es necesario conocer los eslabones con los que cuenta el brazo a través de un diagrama de cuerpo libre, que se observa en la Figura 3.

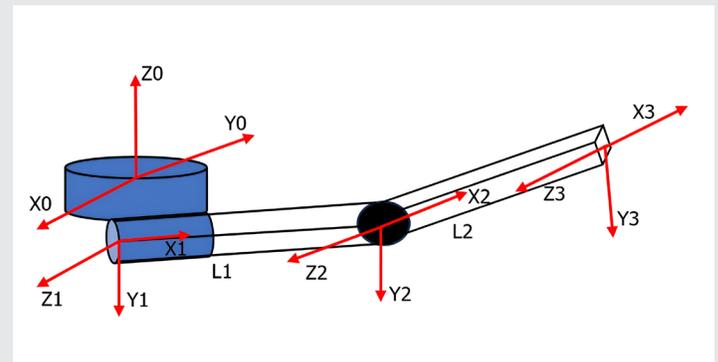


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del brazo manipulador Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras conocer los datos de movimiento mediante el diagrama de cuerpo libre, se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) que para esta aplicación corresponden a un sistema de tres grados de libertad. Esta metodología permite representar adecuadamente, las direcciones de los sistemas coordenados (principal y secundarios) de modo que sea posible observar las transformaciones de coordenadas de forma organizada. De manera general para representar esta transformación de coordenadas se genera la ecuación de transformación que corresponde a la conversión entre subsistemas, con base en el producto matricial, tal como se muestra a continuación:

$$T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \quad \text{Ec(1)}$$

Para obtener cada una de las matrices de transformación A, se aplican las matrices de rotación en los ejes, como a continuación se muestra:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(2)}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(3)}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(4)}$$

Para determinar el movimiento del sistema de referencia 0 al subsistema 1, se tiene:

$$A_1^0 = R_{z,\theta} * R_{x,\theta} \quad \text{Ec(5)}$$

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(6)}$$

Para establecer el cambio entre el subsistema 1 y el subsistema 2, se tiene una rotación en el eje x de 90° y una traslación también en x, con valor l_1 :

$$A_2^1 = R_{x,90} * T_{x,l_1} \quad \text{Ec(7)}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{Ec(8)}$$

Por tanto:

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & C_{90} & -S_{90} & 0 \\ 0 & S_{90} & C_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(9)}$$

Finalmente se determina la matriz de transformación.

$$T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \quad \text{Ec(10)}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec(11)}$$

Análisis de esfuerzos

Para llevar a cabo el análisis de los esfuerzos en los elementos del brazo manipulador es necesario realizar el análisis estático de las partes que conforman el mecanismo mediante CAD aplicando el Método del Elemento Finito para cuerpos rígidos.

Cálculo de las fuerzas que intervienen en los elementos del brazo manipulador

En esta parte se inicia por determinar las fuerzas a las que se ven sometidos los elementos de los eslabones, el estudio comienza con el miembro más alejado del sistema, el cual realiza la función de antebrazo siguiendo la anatomía humana, por razones de diseño el elemento tiene una longitud de 120mm una altura o peralte de 14.383mm y un espesor de 10 mm.

Estas dimensiones sirven como punto de partida para la generación de la estructura del brazo manipulador. Durante este proceso, se identifican y crean un total de 8 nodos, estos nodos actúan como puntos de conexión clave en la armadura del eslabón, estableciendo la estructura básica que permitirá el movimiento y la flexibilidad necesarios para la recolección de granos de café.

La Figura 4 muestra al diagrama de la armadura que conforma el elemento que se someterá a análisis, en ella se pueden observar los nodos antes señalados y su ubicación. Los nodos 1 y 2 es donde la estructura se supone fija para el estudio que se ha de llevar a cabo.



Figura 4. Diagrama de nodos del elemento a analizar. Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 5 muestra las condiciones iniciales del punto de partida. La carga aplicada es de 50 gr o 0.49 0N, la cual hace referencia al peso del manipulador que se ubicara al extremo del elemento en conjunto con el promedio del peso de un grano de café; el análisis se realiza partiendo de considerar una viga empotrada.

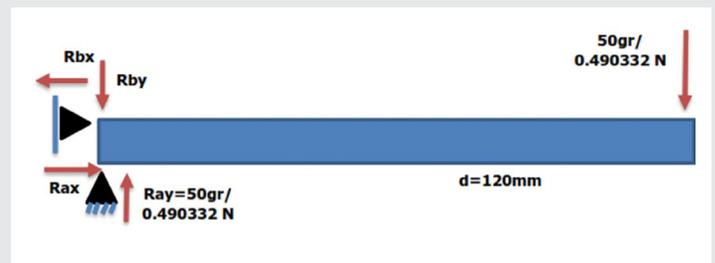


Figura 5. Condiciones iniciales de las cargas en el elemento a prueba. Fuente: Elaboración propia 2024.

Una vez se han establecido las condiciones iniciales y con apoyo de un software de diseño, se realiza el estudio. En la Figura 6 se muestra la configuración necesaria para el ensayo; en ella se observa las distancias a los que se encuentran los elementos de la estructura, los nodos donde se encuentra empotrada la viga, así como el punto donde se aplica la carga.

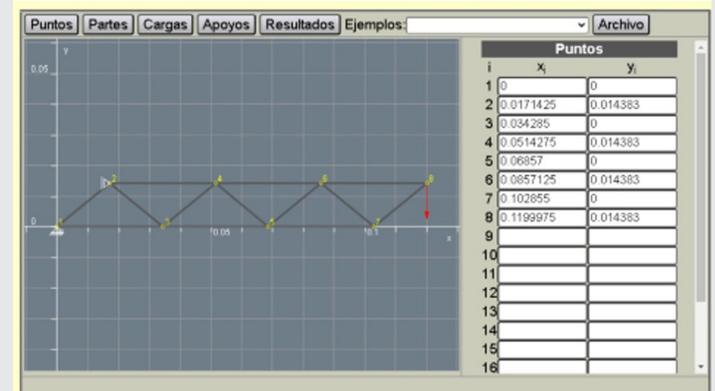


Figura 6. Parámetros iniciales para el ensayo estático de fuerzas. Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras haberse realizado la simulación se obtuvo que el elemento que se encuentra sometido a la mayor compresión es el eslabón 8 y de igual forma en el eslabón 9 se encuentra la mayor tensión esto haciendo referencia a la Figura 4.

Con base a un estudio similar aplicado al elemento que se encuentra cercano a la parte de la fuente de potencia, en esta ocasión el brazo si se hace referencia a la biomecánica humana. La tabla 2, muestra una fracción de los resultados obtenidos tras la prueba, en ellos destacan los valores obtenidos para el eslabón 8 con una fuerza a compresión de -3.506 N y el eslabón 9 con una fuerza a tensión de 2.922 N.

Tabla 2. Muestra de valores obtenidos en el análisis de fuerzas del elemento 2 destacando el nodo 8 y 9 con la mayor fuerza de compresión y de tensión respectivamente.

Eslabón 1		
$F_x = 0.5844$ N	$F_y = 0.4903$ N	$F_N = -0.7629$ N
Eslabón 2		
$F_x = 0.5844$ N	$F_y = 0.4903$ N	$F_N = 0.7629$ N
Eslabón 3		
$F_x = 0.5844$ N	$F_y = 0.4903$ N	$F_N = -0.7629$ N
Eslabón 8		
$F_x = 3.506$ N	$F_y = 0$ N	$F_N = -3.506$ N
Eslabón 9		
$F_x = -2.922$ N	$F_y = 0$ N	$F_N = 2.922$ N

Fuente: Elaboración propia 2024.

Análisis estático de esfuerzos

Para realizar el análisis de esfuerzos en los elementos es necesario definir el material con el cual se fabricarán las piezas del robot manipulador. Se empleará plástico PLA ya que la manufactura de las piezas se realizará mediante manufactura aditiva, el filamento utilizado cuenta con una densidad igual a $\rho = 1385.836 \text{ kg/m}^3$.

La Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas obtenidas tras pruebas realizadas a tensión y compresión a los materiales plásticos: PLA (ácido poliláctico), PCL (poli-caprolactona) y Lay-Form 40, materiales empleados frecuentemente en la impresión 3D. las pruebas realizadas por Zuleima et al., (2019) fueron realizadas como lo expresa "deposición fundida" con las que obtuvo: modulo elástico, coeficiente de Poisson, modulo cortante, límite de tracción, límite de compresión y límite elástico. [5]

Con base en la tabla anterior, se configura el material en el programa de CAD utilizado para realizar la simulación de los elementos. La Figura 7 muestra dicha configuración.

Tabla 3. Propiedades mecánicas para los materiales PLA, PCL y Lay-Form 40 [5].

Material	P [%]	A [°]		E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_U [MPa]
PLA	30	0-90	\bar{x}	25.96	41.2	48.37
			s	1.80	4.42	1.91
		\bar{x}	12.61	27.76	30.87	
	45-135	\bar{x}	0.43	2.30	2.50	
		\bar{x}	23.88	29.67	33.04	
		s	1.06	2.08	2.54	
PCL	30	0-90	\bar{x}	6.93	-	9.68
			s	0.14	-	1.46
		\bar{x}	4.7	6.6	7.52	
	45-135	\bar{x}	0.30	0.44	0.89	
		\bar{x}	7.24	9.92	10.28	
		s	0.07	0.14	0.58	
Lay-Fomm 40	30	0-90	\bar{x}	4.16	6.38	6.99
			s	0.11	0.13	0.62
		\bar{x}	1.65	3.53	28.24	
	40	0-90	s	0.18	0.42	2.16
			\bar{x}	0.72	1.77	12.26
		s	0.18	0.31	2.30	
40	0-90	\bar{x}	1.28	2.65	18.97	
		s	0.18	0.39	3.17	
	\bar{x}	1.07	2.82	21.50		
s	0.19	0.78	0.70			

Fuente: Elaboración propia 2024.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos muestran la magnitud del desplazamiento de las partes del sistema mecánico en función de la carga administrada, así como la flexión que pudiera presentarse en los elementos citados.



Figura 7. Configuración de los parámetros del filamento PLA en el software utilizado para el ensayo de esfuerzos.

Fuente: Elaboración propia 2024.

El análisis se realizó como lo sugieren [6], [7] y [8] para la carga aplicada se tomó la mayor a la que se podría enfrentar en la vida real ya que cuando se diseña se debe hacer para las condiciones extremas a las que se enfrentara el modelo.

El criterio de energía máxima de distorsión o de Von Mises mide la resistencia elástica el cual se aplica a materiales de naturaleza dúctil, según este criterio el material no fluirá en el punto de interés mientras la energía de distorsión por unidad de volumen aplicada sea menor a la energía de distorsión por unidad de volumen.

El análisis aquí mostrado hace referencia solo a uno de los elementos Figura 8 debido a que el análisis para el otro elemento es de procedimiento similar. Se muestra la pieza del antebrazo mismo que para la prueba se configurará para el plástico PLA cuyos parámetros fueron configurados en el software como ha sido mencionado con antelación.

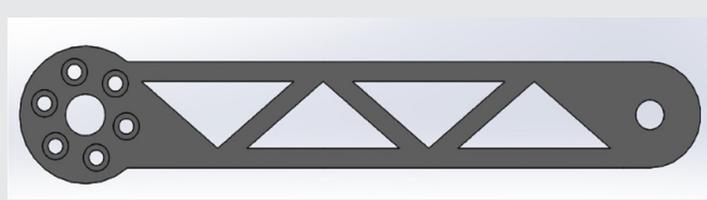


Figura 8. elemento de prueba configurado con material PLA para la simulación.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Para para el análisis se realizó un corte al elemento para realizar un anclaje similar a las condiciones de prueba mostradas con anterioridad en la Figura 3, los resultados arrojados por el ensayo se muestran en la Figura 9.

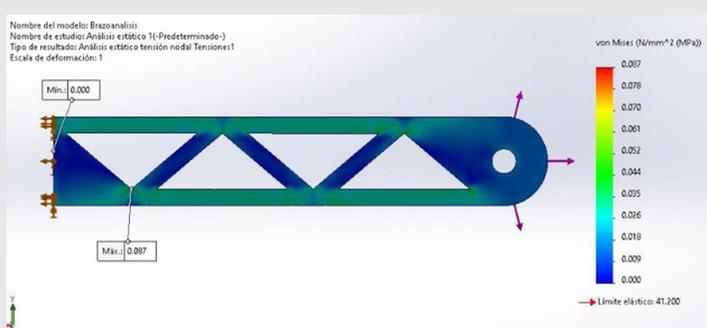


Figura 9. Resultados del esfuerzo de Von Mises ante flexión.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Los datos recabados indican la energía de distorsión máxima de 0.087 MPa valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material de 41.2 MPa.

Se repitió el análisis, pero esta vez con un anclaje en la parte donde se sujetará la pieza Figura 10 de forma real, arrojando los siguientes resultados: El esfuerzo de Von Mises es de 0.186 MPa, encontrándose por debajo del límite elástico del material de 41.2 MPa.

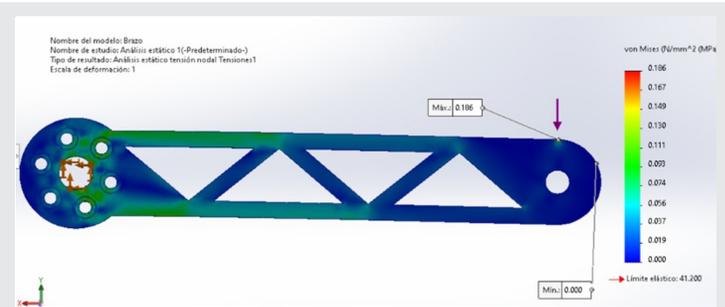


Figura 10. resultados de la prueba de von Mises para la pieza completa.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Encontrándose ubicada en el extremo del elemento como se puede ver en la Figura 11.

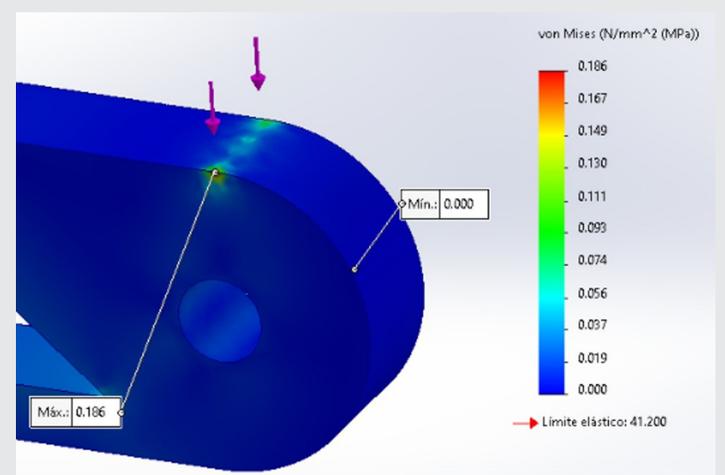


Figura 11. Ubicación del esfuerzo máximo de Von Mises.
Fuente: Elaboración propia 2024.

La deformación unitaria es una magnitud adimensional, expresada en un valor comprendido de 0 a 1 siendo este último el 100 % de la longitud del elemento, tras la prueba el valor de esta deformación resulto de 0.006 MPa lo que indica que la pieza sufrió un cambio en su longitud del 0.6 % con respecto a la inicial; la máxima deformación se presenta en la parte superior de la estructura cercana al origen del elemento, como se aprecia en la Figura 12.

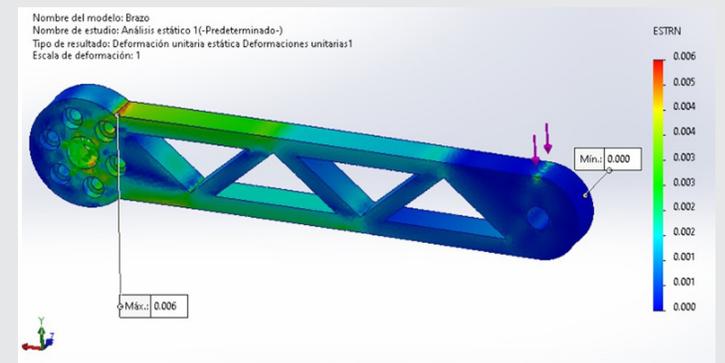


Figura 12. Resultados de la prueba de deformación unitaria para la pieza completa.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Discusión

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la propuesta de diseño del brazo manipulador es viable tanto técnica como tecnológicamente, ya que su construcción mediante el uso de técnicas de manufactura aditiva es viable al estar desarrollado sobre geometrías simples, lo que facilita su impresión con los recursos estándar con los que se cuentan.

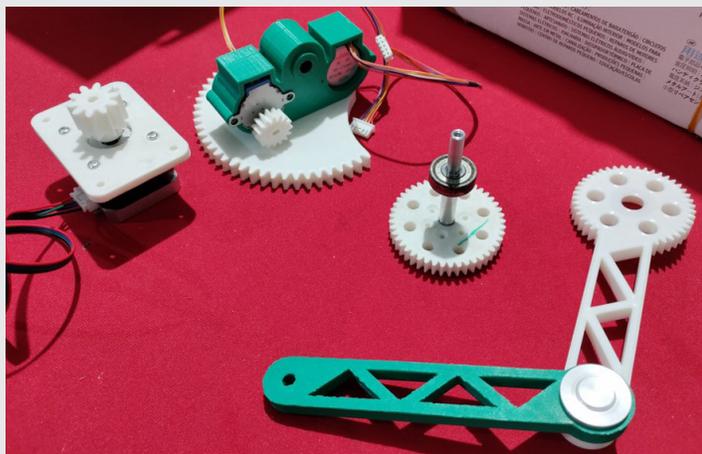


Figura 13. Partes del brazo manipulador impresas en 3D con filamento PLA.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Con la certeza demostrada por los datos encontrados mediante el análisis de esfuerzos se procedió a la impresión de las partes que formaran el brazo manipulador propuesto, la Figura 13 muestra las partes impresas con filamento PLA.

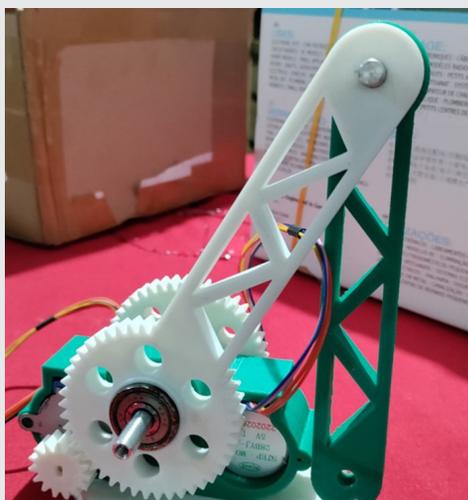


Figura 14. ensamble de las partes del brazo manipulador.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 14 muestra el parcial de las partes del mecanismo en conjunto de su fuente motriz, el modelo estará impulsado por dos motores a pasos con 400 pulsos por revolución lo que le permitirá al conjunto realizar movimientos con precisión.

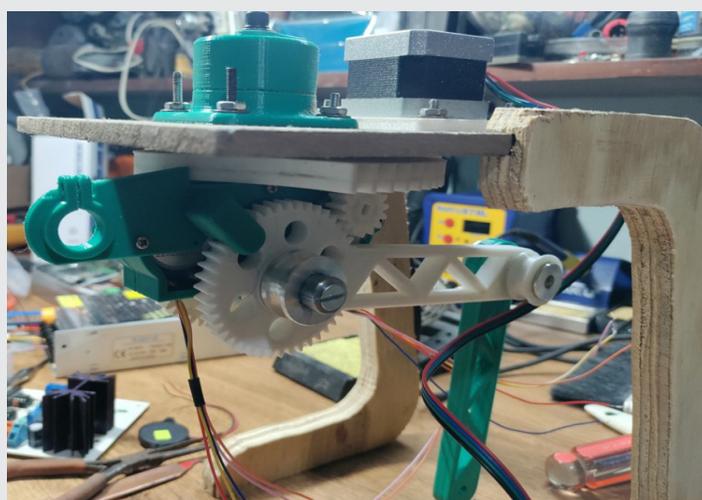


Figura 15. ensamble de las partes del brazo en la base de pruebas.

Fuente: Elaboración propia 2024.

La Figura 15 muestra al brazo manipulador montado sobre una base de pruebas la base esta provista de un motor que simula los giros dados por el dron donde montara en un futuro, el diseño de la base le permitió las pruebas de funcionamiento tanto mecánicas, electrónicas y de comunicación con el software de control.

La Figura 16 muestra las pruebas realizadas a todo el sistema, durante el desarrollo de estas se pudo observar que los movimientos del brazo son fluidos, sin oscilaciones indeseadas, los mecanismos se mueven de forma precisa alcanzando el objetivo deseado.

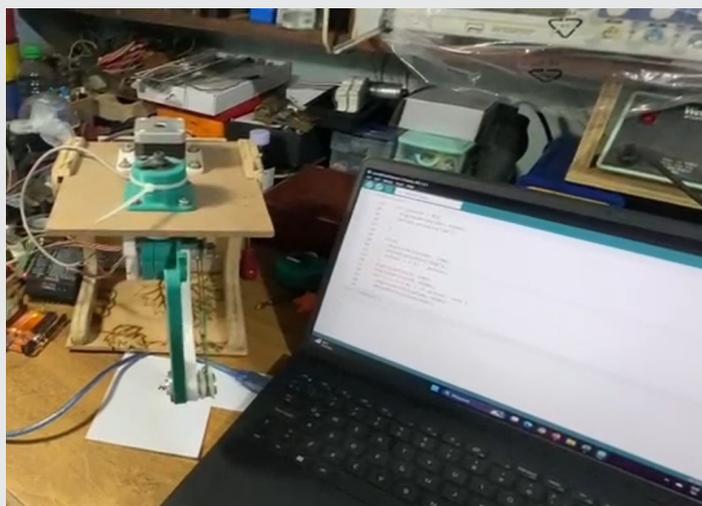


Figura 16. pruebas de funcionamiento del brazo manipulador.

Fuente: Elaboración propia 2024.

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo puso de manifiesto la viabilidad del proyecto, dejando ver los resultados obtenidos en el análisis de la simulación. Así, es posible expresar que el tamaño, forma y materiales elegidos cuentan con la capacidad técnica para que

el prototipo realice sus funciones de manera adecuada.

Los resultados observan que el material elegido para la construcción del robot cumple con los criterios para su selección, lo que concluyó eficientemente con la construcción de las partes utilizando la deposición fundida del material, dando como resultado piezas con la solidez adecuada para cumplir con las expectativas del proyecto.

En cuanto a los resultados de las pruebas puede observarse: el esfuerzo máximo de Von Mises es fue de 0.186 MPa al encontrándose por debajo del 2 % y para el caso del PLA es de 0.824 MPa, por lo tanto como no se supera este valor los elementos son confiables, de igual forma en el caso de la deformación unitaria el valor encontrado es de 0.6 % que esta por debajo del 1 % de la deformación del elemento, este también se considera seguro.

Finalmente, el estudio pone de manifiesto que el plástico PLA es un material adecuado para realizar prototipos de ingeniería sometidos a cargas mecánicas moderadas las cuales no produzcan grandes esfuerzos en los elementos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. C. Robles y I. R. Medina, «El bosque mesófilo de montaña y el cultivo del café en el municipio de Xilotepet, Puebla, México,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009262.pdf>. [Último acceso: 8 enero 2024].

[2] G. de Mexico, «SAGARPA,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/analisis-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 5 enero 2024].

[3] «Cursos Baristas Café,» 27 septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://cursosbaristas.com.mx/blog/cafe-de-puebla>. [Último acceso: 10 Enero 2024].

[4] «Statista,» 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 20 febrero 2024].

[5] J. Zuleima, «Caracterización mecánica de piezas de ácido poliláctico, policaprolactona y Lactofom 40 fabricadas por modelado de deposición fundida, en función de los parámetros de impresión,» ITECKNE, 2019.

[6] L. Armando, «ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES EN ELEMENTOS MECÁNICOS A CAR-

GAS SIMPLES,» 14 abril 2021. [En línea]. Available: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2012articulos/pdfs/A1/A1_156.pdf.

[7] J. Celigueta, «MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL,» 19 septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/10171/19069>.

[8] J. M. Gere y B. J. Goodho, *Mecánica de Materiales*, CENGAGE Learning, 2015.

[9] 3D, C. (04 de Marzo de 2022). *Simulación Computacional: Una herramienta indispensable para la solución de problemas de ingeniería*. Obtenido de Prototica3D: <https://www.prototica3d.com/2022/03/simulacion-computacional-una.html>.

[10] LEYTON, F. (2019). *Características y limitantes de la impresión 3D como método de fabricación digital*. *Textos De Tecnología*, (00), pp 151-162. Recuperado a partir de <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/97>

