



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO ROBÓTICO PARA EL CONTROL DE MALEZA CON LÁSER

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

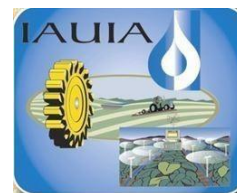
Presenta:

ALAN HERNÁNDEZ MERCADO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ



Chapingo, Estado de México a noviembre de 2024

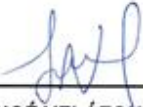


**DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO ROBÓTICO PARA EL CONTROL DE MALEZA
CON LÁSER**

Tesis realizada por **Alan Hernández Mercado** con matrícula 2212112-6, estudiante de la maestría del posgrado en **Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____


DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR: _____


DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO

ASESOR: _____


DR. GILBERTO DE JESÚS, LÓPEZ-CANTEÑS

ÍNDICE

Índice de Figuras	v
Índice de Cuadros	viii
Dedicatorias	ix
Agradecimientos	x
DATOS BIBLIOGRÁFICOS	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Justificación.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Robótica en la agricultura.....	4
2.2. Robótica para la eliminación de maleza.....	5
2.3. Técnicas de aprendizaje.....	5
2.4. Robots desmalezadores.....	5
2.4.1. Robots método mecánico.....	5
2.4.2. Robots eliminación por herbicidas.....	6
2.4.3. Robots eliminación por fuego.....	7
2.4.4. Robots eliminación por láser.....	8
2. 5. Literatura citada.....	9
3. DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO ROBÓTICO PARA EL CONTROL DE MALEZA CON LÁSER	12
3.1. RESUMEN.....	12

3.2. Abstract.....	13
3.3. INTRODUCCIÓN.....	14
3.4. Materiales y métodos.....	15
3.4.1. Localización del proyecto.....	15
3.4.2. Desarrollo del brazo robótico tipo SCARA.....	16
3.4.3. Diseño CAD.....	17
3.4.4. Sub-ensambles del brazo robótico.....	18
3.4.5. Sistema de paralelogramo.....	19
3.4.6. Eslabón 1.....	19
3.4.7. Eslabón 2.....	20
3.4.8. Sistema de control del brazo robótico SCARA.....	21
3.4.9. Área de trabajo del brazo robótico.....	22
3.4.10. Análisis de desplazamiento para el brazo SCARA.....	24
3.4.11. Configuración de motores paso a paso.....	25
3.4.12. Transmisión de eslabones.....	26
3.4.13. Configuración del sistema de visión.....	26
3.4.14. Software de visión para computadora.....	28
3.4.15. Calibración del brazo SCARA con la cámara.....	29
3.4.16. Organización de movimiento.....	30
3.4.17. Evaluación del sistema.....	31
3.4.18. Pruebas con láser.....	32
3.5. Resultados.....	33
3.5.1. Pruebas del brazo SCARA.....	33
3.5.2. Primera calibración.....	35
3.5.3. Segunda calibración.....	36

3.5.4. Resultados de calibración.....	38
3.6. Conclusiones.....	41
3.7. Literatura citada.....	42
4. Anexos.....	44
4.1 Cuadros de descripción.....	44
4.1. Desarrollo del prototipo.....	49
4.2. Sistema de paralelogramo.....	49
4.3. Eslabón 1.....	52
4.4. Eslabón 2.....	53
4.5. Láser.....	53
4.6. Cuadros de datos recolectados para obtención de resultados.....	55

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1. Prototipo tomado de Mukund.....	6
Figura 2. Robot AVO.....	7
Figura 3. Móvil para eliminar malezas con un lanzallamas.....	7
Figura 4. Robot <i>WeLASER</i>	8

Capítulo 3

Figura 5. Brazo robótico tipo SCARA.....	18
Figura 6. Brazo robótico SCARA explosionado.....	18
Figura 7. Sistema de paralelogramo.....	19

Figura 8. Eslabón 1.....	20
Figura 9. Eslabón 2.....	20
Figura 10. Esquema de conexión del sistema electrónico.....	22
Figura 11. Longitud de los eslabones.....	23
Figura 12. Área de trabajo del brazo SCARA.....	24
Figura 13. Comprobación de área de trabajo con el software SolidWorks.....	24
Figura 14. Esquema de las variables para la cinemática inversa.....	25
Figura 15. Calibración de cámara.....	28
Figura 16. Diagrama de flujo del brazo robótico.....	29
Figura 17. Bosquejo de área de visión en espacio de trabajo.....	30
Figura 18. Brazo en posición Home.....	31
Figura 19. Coordenadas con ventana de localización de centroide.....	32
Figura 20. Corte de maleza con láser	32
Figura 21. Grafica de diferencia de posicione entre coordenadas “X”	34
Figura 22. Grafica de diferencia de posicione entre coordenadas “Y”	34
Figura 23. Primera calibración en “X”	36
Figura 24. Primera calibración en “Y”	36
Figura 25. Segunda calibración en “X”	37
Figura 26. Segunda calibración en “Y”	38
Figura 27. Resultados en “X”	39
Figura 28. Resultados en “Y”	39
Figura 29. (MAE) 1ra y 2da prueba en “X”	40
Figura 30. (MAE) 1ra y 2da prueba en “Y”	40
Figura 31. Comparación de tercera y segunda evaluación del error absoluto en el eje “X”	41

Figura 32. Comparación de la primera y segunda evaluación del error absoluto en el eje “Y”	41
--	----

Capítulo 4

Figura A1. Explosionado del sistema de paralelogramo.....	44
Figura A2. Explosionado eslabón 1.....	45
Figura A3. Explosionado eslabón 2.....	46
Figura A4. IBT_2 y Arduino	47
Figura A5. Relación de poleas del eslabón 2.....	48
Figura A6. Foto de brazo SCARA sobre papel milimétrico.....	48
Figura A7. Disparo de laser y hoja perforada	48
Figura A8. Láser en riel.	49
Figura A9. Brazo robótico ensamblado completamente.....	49
Figura A10. Sub-ensamble del sistema de paralelogramo.....	50
Figura A11. Eslabón 1.....	50
Figura A12. Foto del eslabón 1.....	51
Figura A13. Eslabón 2.....	51
Figura A14. Eslabón 2 con acopladores instalados.....	52
Figura A15. Láser.....	52
Figura A16. Tornillos M3.....	53
Figura A17. Soporte.....	53
Figura A18. Soporte instalado en el láser.....	53
Figura A19. Unión de eslabones.....	54
Figura A20. Ensamble brazo SCARA.....	54

Figura A21. Dimensiones principales del brazo SCARA.....	54
Figura A22. Posición paralela al suelo.....	55

Índice de Cuadros

Capítulo 3

Cuadro 1. Aplicaciones y alternativas.....	16
Cuadro 2. Datos pruebas del brazo SCARA.....	33

Capítulo 4

Cuadro A1 Sub-ensambles.....	44
Cuadro A2. Explosionado del sistema de paralelogramo.....	44
Cuadro A3. Explosionado eslabón 1.....	45
Cuadro A4. Elementos del eslabón 2.....	46
Cuadro A5. Elementos electrónicos del brazo SCARA.....	47
Cuadro A6. Datos primer prueba.....	55
Cuadro A7. Datos de segunda prueba.....	56
Cuadro A8. Datos de tercera prueba.....	57

DEDICATORIAS

*A mi compañera de vida Marisé por su apoyo incondicional y constante
durante este camino.*

A mis padres Andrés Hernández e Irma Mercado.

A mis hermanos y familiares.

A mis tíos Jorge Mercado y Armando Ortiz.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico para realizar este trabajo de investigación y mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por la oportunidad brindada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Noé Velázquez López, por su invaluable guía, experiencia y apoyo a lo largo de todo este proceso. Sus consejos y observaciones han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento académico. Asimismo, agradezco profundamente a mis asesores, la Dra. Raquel, Salazar Moreno, y el Dr. Gilberto de Jesús, López Canteñs, quienes con su conocimiento, tiempo y dedicación contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros y amigos, quienes compartieron conmigo este camino académico, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento. Gracias por su apoyo, compañerismo y por estar presentes en los momentos de desafío y aprendizaje. Por su disposición para colaborar, sus palabras de aliento y las experiencias compartidas han sido fundamentales para hacer de este proceso una etapa significativa y enriquecedora. En especial, agradezco a David Iván Sánchez Chávez, Guillermo García Sánchez y Raúl Vidal, García-Hernández, por su amistad y por ser una fuente constante de motivación y apoyo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Alan Hernández Mercado

Fecha de nacimiento: 27 de junio de 1989

Lugar de nacimiento: Iztacalco, Ciudad de México, México

CURP: HEMA890627HDFRRL04

Profesión: Ingeniero Mecánico

Cedula Profesional: 12821793

FORMACIÓN ACADÉMICA

Bachillerato: CBTIS No. 6, Esperanza, Cd. Nezahualcóyotl,
Estado de México

Licenciatura: Ingeniería Mecánica, UAM, Azcapotzalco,
Ciudad de México

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación FAO (2023) estima que, para el año 2050, se necesitará aumentar en un 70% la producción agrícola para compensar la demanda relacionada con el aumento de población mundial. En este sentido, se han realizado diversos estudios en materia tecnológica con el objetivo de lograr una sostenibilidad en la agricultura.

En los últimos años, el uso de robots en la vida cotidiana se ha vuelto cada vez más común y necesario para facilitar diversas tareas. Este tipo de artefactos están presentes de manera importante en la manufactura, así como en diferentes labores de los hogares. Ambas escalas confluyen en la producción agrícola, a nivel industrial o familiar, en los cuales se está implementando la robótica de manera creciente.

Es en este contexto la Universidad Autónoma Chapingo se destaca como la primera institución educativa en México dedicada al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de la robótica agrícola. Su principal enfoque es fortalecerse en este sector a través de la mejora continua de robots autónomos. El robot Voltan construido en esta Universidad está diseñado para operar tanto en lugares protegidos como en campo abierto donde la maleza se ha identificado como una de las adversidades biológicas más significativas. El control eficiente de las malas hierbas es crucial en la agricultura para minimizar pérdidas de cultivos, reducir costos, evitar impactos negativos y mantener la calidad del producto. Las malezas compiten con los cultivos por recursos esenciales como agua, nutrientes y luz, disminuyendo la producción agrícola (Juwono, Wong, Verma, Shekhawat, Lease, y Apriono, 2023). Además, pueden servir como huéspedes para plagas, agentes patógenos y nematodos, amplificando problemas en el entorno agrícola. Estas plantas indeseadas también dificultan las operaciones de recolección y, en algunos casos, contribuyen a depreciar la calidad del producto limitando considerablemente el rendimiento de los cultivos (Wessner, 2023).

Por otro lado, el uso extensivo del glifosato en la agricultura se ha constituido como un problema debido a sus posibles efectos adversos en el suelo, el medio ambiente y la salud. Esta situación ha propiciado el desarrollo de diferentes estudios e investigaciones como el de Xiao (2023), quien concluyó que el glifosato puede afectar las funciones del ecosistema, incluido el ciclo de nutrientes y el equilibrio del carbono.

Ello ha generado debates e incluso ha derivado en restricciones para su uso en varios países, entre ellos México. Mediante un decreto publicado el 13 de febrero de 2023, se definieron diversas acciones en relación con el glifosato y el maíz genéticamente modificado. Puntualmente, en dicho decreto quedó formalizada la prohibición del glifosato (Presidencia de la República de México, 2023). Con este escenario surgió la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías y procesos diferentes que sustituyan el uso del glifosato en la eliminación de la maleza. En la actualidad la agricultura inteligente abarca un conjunto amplio de innovaciones tecnológicas; algunas emergentes en este campo incluyen sistemas de visión por computadora (Cesco et al., 2023). Con el empleo de tecnologías avanzadas de visión se están desarrollando sistemas que pueden identificar y clasificar automáticamente las malezas. Los algoritmos como YOLOv7 son usados en el reconocimiento de maleza dentro de los cultivos, los cuales han alcanzado una precisión significativa de 89.93% en promedio. La fidelidad en la detección de objetos e inferencia necesaria muestra que YOLOv7 es eficaz para localizar y clasificar malezas en cultivos de maíz (Hasan, Diepeveen, Laga, Jones y Soheli, 2023).

Este tipo de algoritmos de visión son utilizados en robots agrícolas equipados con cámaras y sensores que pueden detectar la maleza y realizar fumigación de forma autónoma con la ventaja de reducir el desperdicio de herbicidas (Cornejo y Delgado, 2021).

Bajo estas consideraciones, el objetivo de este trabajo fue desarrollar un brazo robótico con un láser como herramienta de corte para eliminar maleza, el cual será implementado en el robot Voltan. El presente documento está conformado

por cuatro secciones. La primera parte es introductoria, en ella se expone una perspectiva general de la investigación realizada. La segunda sección se trata de la revisión bibliográfica en la que se presentan los avances, tendencias y el estado del conocimiento actual en torno a los robots eliminadores de maleza. En la tercera sección se despliega un artículo científico, donde se explica el desarrollo de un brazo robótico destinado a la eliminación de maleza por medio de un láser. Los dibujos a detalle con dimensiones del prototipo construido pueden ser consultados en los anexos.

1.1. JUSTIFICACIÓN

El 13 de febrero del 2023 se expidió una actualización en el decreto por el que se establecen diversas acciones en materia de glifosato y maíz genéticamente modificado, donde se mandata la norma para abstenerse de adquirir, utilizar, distribuir, promover e importar maíz genéticamente modificado, así como glifosato o agroquímicos que lo contengan como ingrediente activo, para cualquier uso, en el marco de programas públicos o de cualquier otra actividad del gobierno (Presidencia de la República de México, 2023). Este decreto presidencial que prohibió el empleo del glifosato, a partir del 31 de enero del 2024, pone de relieve las consecuencias negativas de su uso en relación con la salud y la generación de diversas enfermedades como cáncer y diabetes. Esto constituye un reto importante para el Estado, la academia y, en general, para el país puesto que es apremiante hallar nuevos métodos de desmalezado. Además de ello, se deben encontrar medios eficientes que no afecten los costos para los productores y, al mismo tiempo, faciliten dicha tarea reduciendo el trabajo físico. En este contexto las investigaciones en robótica representan una alternativa para el control de maleza, lo cual no sólo abonaría a la preservación de la salud, sino que se coadyuvaría al logro de mejores cultivos en beneficio de los agricultores mexicanos, a pequeña y gran escala.

En este sentido, esta y otras investigaciones conexas contribuyen al objetivo de aumentar y fortalecer el posicionamiento de la Universidad Autónoma Chapingo

como precursora en el área de la agricultura robótica, en nuestro país. Para ello, particularmente, se propone implementar un método de control de maleza que opere sistemáticamente y en conjunto con el vehículo autónomo “Voltán” que forma parte de los desarrollos más importantes de la Universidad en esta materia.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar un brazo robótico tipo *SCARA* (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) con un láser como actuador final para eliminar maleza.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un brazo robótico tipo *SCARA* que abarque un el espacio de un surco con tamaño de 80cm y se pueda instalar como implemento en el robot Voltan.
- Diseñar el enganche para la instalación del brazo robótico.
- Construir el brazo robótico tipo *SCARA* y el enganche antes diseñado.
- Instrumentar y controlar el brazo robótico.
- Verificar el funcionamiento del brazo tipo *SCARA*.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Robótica en la agricultura

En la actualidad, una alternativa a la escasez de mano de obra en los campos agrícolas es la integración de sistemas robóticos autónomos que pueden mejorar la sostenibilidad en los cultivos. Con el avance de la tecnología, el uso de cámaras y sensores para calcular distancias permite que los sistemas autónomos realicen tareas como sembrar y cosechar de manera independiente (Naik et al., 2016 y Khadatkhar et al., 2022). Entre la variedad de robots que se emplean dentro de la agricultura se encuentran vehículos terrestres, manipuladores y drones (Roldán et al., 2017). Este tipo de avances tecnológicos dentro de la agricultura

contribuyen a reducir los costos en materia laboral al tiempo de mejorar la eficacia en las operaciones realizadas por el sistema robótico (Lowenberg-DeBoer, 2024).

2.2. Robótica para la eliminación de maleza

El control de maleza por medio de la robótica puede ayudar a la reducción en el empleo de productos químicos y a las afectaciones producidas en los seres humanos, así como en el impacto negativo al medio ambiente (Visentin et al., 2023). Actualmente, se están introduciendo sistemas robóticos con el objetivo de simplificar la tarea de eliminar maleza. La implementación de tecnologías robóticas puede reducir la mano de obra y el uso de herbicidas (Tummapudi et al., 2023).

2.3. Técnicas de aprendizaje

Para un control autónomo de maleza se necesita utilizar redes neuronales convolucionales (CNNs) para detectar los arvenses dentro de los cultivos. Este tipo de redes son entrenadas con conjuntos numerosos de imágenes a fin de diferenciar la maleza del cultivo (Giradkar, 2023).

Las redes neuronales profundas (DNNs) son utilizadas en robots donde se procesan las imágenes tomadas por una cámara instalada en el sistema que funciona para detectar la maleza (Tummapudi, 2023).

2.4. Robots desmalezadores

Destacan diversos métodos, entre los que se encuentran el mecánico, por herbicidas, por fuego y por láser, los cuales se describen brevemente en los siguientes subapartados.

2.4.1. Robots método mecánico

Algunos robots utilizan el método mecánico para la eliminación de malezas como el desarrollado por Mukund et al. (2024). En este proyecto se realizó un sistema robótico que localiza la maleza con algoritmos de inteligencia artificial y la corta

por medio de cuchillas. En la Figura 1 se muestra el proto tipo desarrollado por Mukund et al. (2024).

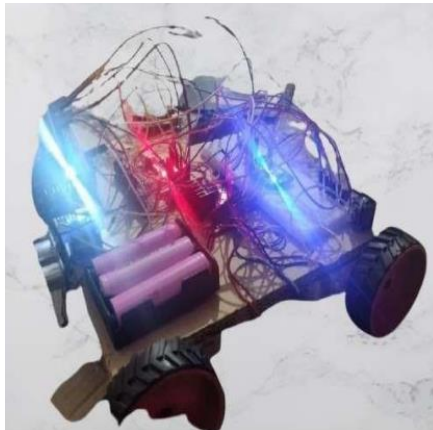


Figura 1. Prototipo tomado de Mukund et al. (2024).

Otro tipo de eliminación mecánica es arrancar las plantas de arvenses. El procedimiento consiste en detectar la maleza y utilizar un robot con pinzas como efector final. Existe un prototipo de robot con este sistema donde obtuvieron un 85% de efectividad en la eliminación de malezas (Visentin et al., 2023).

2.4.2. Robots eliminación por herbicidas

En la actualidad existen diversos prototipos de robots alrededor del mundo, diseñados para erradicar maleza en cultivos por medio de herbicidas, la mayoría de ellos en Europa. Destaca el robot AVO de EcoRobotix (2019), empresa suiza (Figura 2). Este robot utiliza visión artificial para detectar la maleza y una vez identificada, aplica herbicida en la planta afectada.



Figura 2. Robot AVO tomado de EcoRobotix (2019).

En el ámbito de robots aplicadores de herbicida se encuentra el estudio de Jeon y Tian, (2009), quienes presentan el desarrollo de un efector final colocado en un brazo robótico de 5 grados de libertad, el cual aplica herbicidas directamente al tejido vascular de los arvenses, aumentando la eficacia de la aplicación.

2.4.3. Robots eliminación por fuego

Por otro lado, Wang et. al (2024) presentan un manipulador móvil para eliminar malezas con un lanzallamas; la llama se adapta al terreno y logra una precisión promedio de 76%, según indican las pruebas realizadas, en la Figura 3 se muestra el manipulador lanza llama.



Figura 3. Móvil para eliminar malezas con un lanzallamas tomado de Wang et. al (2024)

También existen robots mixtos. En Argentina se encuentra un prototipo de robot desmalezador argentino fue pensado para ser autónomo, eficiente, capaz de navegar por un campo sembrado, recorriendo los surcos o siguiendo una trayectoria determinada. El equipamiento tecnológico le permite detectar las malezas y actuar sobre ellas, actúa con la aplicación selectiva de herbicidas o bien mediante medios mecánicos, arrancando las malezas o quemándolas (Mujica, 2018).

2.4.4. Robots eliminación por láser

Una de las alternativas innovadoras para eliminar arvenses ha sido la integración de láser como herramienta de corte con el objetivo de reducir el impacto ambiental relacionado con el uso de herbicidas.

Se han realizado diferentes estudios como el de Huy et al. (2024), quien desarrolló un robot eliminador de maleza por medio de láser, con visión artificial que detecta la maleza utilizando YoloV8.

En Europa existen algunos robots con láser ya comercializados como el *WeLASER*, el cual está conformado con un vehículo autónomo que trasporta el implemento donde se encuentra el sistema de detección y eliminación de maleza y cuenta con cuatro láseres de alta potencia (Krupanek et al., 2024).



Figura 4. Robot *WeLASER*. Tomada de Youtube @welaser-project (2023).

Otro estudio de eliminación de arvenses con láser es el de Andreasen (2024), en el que se realizaron pruebas de corte en maleza *Elymus repens* con pequeñas dosis de energía. El investigador concluyó que en la etapa de 3 hojas se obtiene una mejor eficacia demostrando que la maleza deja de crecer.

Este tipo de sistemas robóticos ofrecen soluciones prometedoras para el control de arvenses, si bien todavía existen desafíos importantes como el de obtener la clasificación correcta de las malezas (Angrawal y Dhule, 2023).

2.5. Literatura citada

- Ait, I. (2021). Simulación de robot desmalezador y planificación de trayectorias en entornos agrícolas (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario).
- Alonso. (2020). Robots desmalezadores, posible alternativa al uso de herbicidas. Recuperado de <https://agroexcelencia.com/robots-desmalezadores-posible-alternativa-al-uso-de-herbicidas/>
- Andreasen, C., Vlassi, E., & Salehan, N. (2024). Laser weeding: opportunities and challenges for couch grass (*Elymus repens* (L.) Gould) control. *Scientific Reports*, 14(1), 11173.
- Castellano, G., De Marinis, P. y Vessio, G. (2023). Mapeo de malezas en imágenes multispectrales de drones utilizando transformadores de visión livianos. *Neurocomputación*, 562, 126914.
- Cesco, S., Sambo, P., Borin, M., Basso, B., Orzes, G. y Mazzetto, F. (2023). Agricultura inteligente y gemelos digitales: aplicaciones y desafíos en una visión de sostenibilidad. *Revista Europea de Agronomía*, 146, 126809.
- Conacyt. (2022). Gobierno de México presenta avances en cumplimiento del decreto para prescindir del glifosato y del maíz transgénico. Recuperado de <https://conacyt.mx/gobierno-de-mexico-presenta-avances-en-cumplimiento-del-decreto-para-prescindir-del-glifosato-y-del-maiz-transgenico/>
- Contexto ganadero. (2021). Robot elimina 100000 malezas por hora con láseres de precisión e inteligencia artificial. Recuperado de <https://www.contextoganadero.com/agricultura/robot-elimina-100-000-malezas-por-hora-con-laseres-de-precision-e-inteligencia>
- Presidencia de la República de México. (2023, 13 de febrero). DECRETO por el que se establecen diversas acciones en materia de glifosato y maíz genéticamente modificado. Recuperado de

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5679405&fecha=13/02/2023#gsc.tab=0

- Giradkar, A., Adpawar, R., Agrawal, R., Dhule, C., & Morris, N. C. (2023, June). Design of Autonomous Weed Elimination using Machine Learning Techniques. In *2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)* (pp. 102-106). IEEE.
- Hasan, A. M., Diepeveen, D., Laga, H., Jones, M. G., & Sohel, F. (2023). Object-level benchmark for deep learning-based detection and classification of weed species. *Crop Protection*, 106561.
- Huy, K. B., Van, T. N., Duc, H. N., & Minh, H. D. (2024, April). Development of Deep Learning-Based Laser Weeding Robot. In *2024 IEEE 11th International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC)* (pp. 000089-000092). IEEE.
- Jeon, H. Y., & Tian, L. F. (2009). Direct application end effector for a precise weed control robot. *Biosystems engineering*, 104(4), 458-464.
- Juwono, FH, Wong, WK, Verma, S., Shekhawat, N., Lease, BA y Apriono, C. (2023). Aprendizaje automático para la discriminación entre malezas y plantas en la agricultura 5.0: una revisión en profundidad. *Inteligencia artificial en la agricultura*.
- Khadatkar, A., Mehta, C. R., & Sawant, C. P. (2022). Application of robotics in changing the future of agriculture, 17(1):48-51. doi: 10.5958/2582-2683.2022.00010.7
- Krupanek, J., de Santos, P. G., Emmi, L., Wollweber, M., Sandmann, H., Scholle, K., ... & Andreasen, C. (2024). Environmental performance of an autonomous laser weeding robot—a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-32.
- Lowenberg-Deboer, J. (2024). Economics of agricultural robotics.
- Mujica, M (2018). *Desarrollo e implementación de un sistema de censado y posicionamiento en prototipo de robot desmalezador*. Universidad Nacional de Rosario – Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura – Escuela de Ingeniería Electrónica. Recuperado de https://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman/files/informe_mujica.pdf
- Mukund, Nalawade., Aditya, Bihani., Amit, Adhav., Rashmi, Bajaj., Shashank, Attal,. (2024). Weed Cutting Robot. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(3) doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i03.20647
- Papa. J. (2009). Problemas actuales de malezas que pueden afectar el cultivo de soja. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-problemas_actuales_de_malezas.pdf
- Roldán, J. J., del Cerro, J., Garzón-Ramos, D., Garcia-Aunon, P., Garzón, M., De León, J., & Barrientos, A. (2018). Robots in agriculture: State of art and practical experiences. *Service robots*, 12(2), 67-90.

- Sejal, Naik., Smruti, Patel., Shruti, Guhaprasad., Apeksha, Waghmare. (2016). Robotics In Agriculture. International Journal of Engineering and Computer Science, doi: 10.18535/IJECS/V5I4.29
- Tummapudi, S., Sadhu, S., Simhadri, S. N., Damarla, S. N. T., & Bhukya, M. (2023, April). Deep Learning Based Weed Detection and Elimination in Agriculture. In 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) (pp. 147-151). IEEE.
- Visentin, F., Cremasco, S., Sozzi, M., Signorini, L., Signorini, M., Marinello, F., & Muradore, R. (2023). A mixed-autonomous robotic platform for intra-row and inter-row weed removal for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 108270.
- Wang, D., Hu, C., Xie, S., Johnson, J., Ji, H., Jiang, Y., ... & Song, D. (2024). Toward Precise Robotic Weed Flaming Using a Mobile Manipulator with a Flamethrower. *arXiv preprint arXiv:2407.04929*.
- Welaser-project (2023). *Stakeholder Event & FieldDay*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=6J2nFUCWVBY>
- Wessner, RN, Frozza, R., da Silva Bagatini, DD y Molz, RF (2023). Reconocimiento de malezas en cultivos de maíz: Sistema con redes neuronales convolucionales. *Revista de Investigación Agrícola y Alimentaria*, 100669.
- Xiao, R., Kuang, B., Hu, Y., Wang, Y., Bai, J., Zhang, L., ... y Pan, W. (2023). Evaluación del riesgo ecológico del glifosato y su posible efecto sobre la comunidad bacteriana en los sedimentos superficiales de un típico lago poco profundo, en el norte de China. *Ecotoxicología y Seguridad Ambiental*, 249, 114445.
- Xiong, Y., Ge, Y., Liang, Y. y Blackmore, S. (2017). Desarrollo de un prototipo de robot y algoritmo de planificación rápida de caminos para deshierbe estático. *Computadoras y Electrónica en la Agricultura* , 142 , 494-503.
- Yang, Q., Du, X., Wang, Z., Meng, Z., Ma, Z. y Zhang, Q. (2023). Una revisión de las tecnologías básicas de robots agrícolas para producciones agrícolas. *Computadoras y Electrónica en Agricultura* , 206 , 107701.

3. DESARROLLO DE UN IMPLEMENTO ROBÓTICO PARA EL CONTROL DE MALEZA CON LÁSER

Alan, Hernández-Mercado¹; Noé, Velázquez-López^{1*}; Raquel, Salazar-Moreno¹; Gilberto de Jesús, López-Canteñs¹.

Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México CP 56230; Teléfono. 595 95215 00. Correo autor de correspondencia: nvelazquezl@chapingo.mx

3.1. Resumen

Actualmente, uno de los mayores desafíos en la agricultura es el control de maleza cuya presencia disminuye hasta un 60% la producción del cultivo de maíz. Por consiguiente, se han desarrollado diversos métodos de eliminación, destacando entre ellas los mecánicos y químicos. El uso de herbicidas (principalmente el glifosato) ha sido vinculado a diversas enfermedades, como el cáncer. Una solución a este problema es la robótica. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue diseñar un brazo robótico SCARA con un láser de 80 W, para la eliminación de maleza en etapa temprana de crecimiento. El brazo tiene dos grados de libertad, controlados mediante dos motores a pasos (nema 23 y 17). El prototipo cuenta con sistema de enganche, dando un grado de libertad adicional permitiendo mayor movimiento al brazo, como implemento en el robot Voltan y tiene una longitud de 470 mm del origen del brazo al actuador final, cubriendo un área de trabajo de 0.24 m². Se llevaron a cabo pruebas de corte con 7, 10 y 15 días de edad con diámetros promedio de 2.3, 3 y 3.4 mm, respectivamente. Se ajustó la altura del láser con un rango de 2-150 mm sobre el suelo. Ya construido el prototipo se realizó una calibración del sistema de visión con una cámara Logitech C920 que detecta las coordenadas (x, y) de la maleza y las envía a un Arduino realizando el movimiento de los motores y dirigiendo el actuador final. Los datos obtenidos se compararon con la posición de visión y la posición real física. El resultado de las pruebas con malezas, se obtuvo el error medio absoluto (MAE) de (x=0.000584mm) y (y=0.00141mm). Esta solución responde a la necesidad de reducir el uso de herbicidas, y también ofrece una alternativa sustentable.

Palabras claves: maleza, robot, brazo SCARA, automatización agrícola.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Alan Hernández Mercado

Director de tesis: Dr. Noé Velázquez López

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC IMPLEMENT FOR WEED CONTROL USING LASER

3.2. Abstract

Currently, one of the biggest challenges is weed control, as its presence can reduce corn crop production by up to 60%. Consequently, various methods of weed elimination have been developed, with mechanical and chemical methods standing out. The use of herbicides (mainly glyphosate) has been linked to various diseases, including cancer. A solution to this problem is robotics. Therefore, the aim of this work was to design a SCARA robotic arm with an 80 W laser for weed elimination at an early growth stage. The arm has two degrees of freedom, controlled by two stepper motors (NEMA 23 and NEMA 17). The prototype includes a coupling system, providing an additional degree of freedom that allows for greater movement of the arm, similar to the implementation in the Voltan robot, and has a length of 470 mm from the arm's origin to the end effector, covering a working area of 0.24 m². Cutting tests were conducted on weeds at 7, 10, and 15 days old with average diameters of 2.3, 3, and 3.4 mm, respectively. The laser height was adjusted within a range of 2-150 mm above the ground. After the prototype was built, a vision system calibration was carried out using a Logitech C920 camera that detects the (x, y) coordinates of the weeds and sends them to an Arduino to control the motors and direct the end effector. The obtained data were compared with the vision-based position and the actual physical position. The test results with weeds showed a Mean Absolute Error (MAE) of (x=0.000584 mm) and (y=0.00141 mm). This solution addresses the need to reduce herbicide use and also offers a sustainable alternative.

Keywords: weed, robot, SCARA arm, agricultural automation

3.3. Introducción

En el control de malezas, los agricultores emplean una combinación de métodos manuales, mecánicos y químicos para garantizar el crecimiento saludable y sostenible de sus cultivos (Tewari, Kumar, Nare, Prakash & Tyagi, 2014).

El uso de herbicidas ha sido empleado desde finales del siglo XIX utilizando sulfato de cobre y ácido sulfúrico como principales activos (Chauvel et al., 2022). En la actualidad el uso de glifosato ha aumentado rápidamente (Landrigan y Belpoggi, 2018); éste ha sido objeto de discusión debido a posibles efectos negativos en el ambiente y la salud humana. Algunos estudios, como el realizado por González, Meza, Martínez y Pedroza (2023), han planteado preocupaciones sobre la posible toxicidad del glifosato y su impacto ambiental.

La integración de robots en la agricultura es un sector en expansión que emplea tecnologías para aumentar la eficiencia en la producción agrícola, trabajando 24 horas los 7 días de la semana (Rai et al., 2023). Se reconoce que la robotización constituye una solución eficaz para abordar la creciente escasez de mano de obra en la producción de cultivos (Moshayedi et al., 2024). En consecuencia, la investigación y desarrollo de tecnologías robóticas agrícolas ha cobrado importancia en los últimos años (Yang et al., 2023).

Hay algunas tareas de la agricultura en las que los robots están siendo utilizados, entre ellas la siembra; en este proceso, los robots pueden ser programados para sembrar semillas de manera precisa y eficiente. Al respecto, Kumar, y Ashok (2020) desarrollaron un robot inteligente de siembra para semillas, el cual consta de un brazo robótico para colocar las semillas desde un contenedor a la posición configurada previamente. De igual manera, existen robots para la cosecha como el realizado por Stevanović, Ilić, y Rodić (2023) quienes realizan prototipos de brazos robóticos telescópicos destinados a la cosecha de ciruelas, utilizando una pinza diseñada específicamente para este propósito.

Asimismo, se han diseñado robots para otras labores agrícolas, como la eliminación de malezas. Estos robots pueden utilizar inteligencia artificial y visión por computadora para identificar y eliminar selectivamente las malezas sin dañar los cultivos circundantes. Raja, Nguyen, Slaughter y Fennimore (2020) realizaron una estructura mecánica robotizada para el control de malezas de UC Davis; incluye una cámara montada en la parte superior, seis espejos de primera superficie, doce LED UV y una cuchilla mecánica neumáticamente accionada para el corte de malezas.

Los brazos robóticos representan múltiples ventajas en diferentes sectores ya que pueden realizar tareas repetidoras o riesgosas reduciendo los peligros operativos (Molina y Peña, 2019).

Los brazos robóticos tipo SCARA (brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo, por sus siglas en inglés) son manipuladores multifuncionales, diseñados principalmente para tareas de manipulación y ensamblaje (Diaz et al., 2007). En la automatización industrial, los brazos tipo SCARA realizan procesos inteligentes y pueden estar interconectados obteniendo una mayor eficiencia y precisión (Frascá y Bruno, 2021).

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue, desarrollar un brazo robótico que, en conjunto con el vehículo autónomo existente en la Universidad Autónoma Chapingo, con el fin de contribuir al control de malezas, y de esta forma aportar soluciones a las demandas de sostenibilidad y cuidado ambiental en la agricultura moderna.

3.4. Materiales y métodos.

3.4.1. Localización del proyecto

El estudio fue realizado en el Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.4.2. Desarrollo del brazo robótico tipo SCARA

El brazo robótico fue desarrollado teniendo en consideración las necesidades específicas que implica este problema, así como por medio de la evaluación de distintos tipos de materiales empleados en su construcción. El diseño se basó en los principios establecidos por Budynas y Nisbett (2011). Mediante el proceso estándar de diseño de ingeniería, se identificaron los requisitos necesarios para abordar adecuadamente el problema y explorar opciones de solución. Las necesidades principales identificadas fueron: 1) tipo de enganche al robot, 2) movimiento de los eslabones y 3) herramienta de corte. Se plantearon posibles alternativas para las necesidades específica. En el Cuadro 1 se muestran las soluciones encontradas, las cuales son resaltadas en amarillo.

Cuadro 1. Aplicaciones y alternativas.

Aplicaciones y alternativas para solución			
Aplicaciones	Alternativas		
	1	2	3
1. Enganche	Fijo	Móvil	3 puntos
2. Materiales	impresión 3D	Aluminio	Combinación
3. Transmision	Banda	Ejes	Cadena
4. Sistema de corte	Cadena	Láser	Hilo de desbrozadoras
5. Control electrónico	Plc	Arduino	Raspberry

El proceso que implicó el desarrollo del diseño dio como resultado la viabilidad de las siguientes acciones, las cuales destacaron como mejores alternativas para implementar en el dispositivo:

- 1.- Enganche móvil con sistema de paralelogramo,
- 2.- Empleo de materiales ligeros como aluminio e impresión 3D,
- 3.- Transmisión para el movimiento de los eslabones por banda y poleas dentadas;
- 4.- Sistema de corte por láser
- 5.- Control para los motores con Arduino mega.

El diseño del sistema desmalezador se basó en un brazo SCARA debido a sus múltiples ventajas y su versatilidad. Este tipo de brazos robóticos ofrece una combinación entre velocidad, precisión, compatibilidad y costo.

3.4.3. Diseño CAD

El diseño del prototipo cuenta con un enganche que sostiene al brazo SCARA unido en el robot Voltan. Éste tiene un sistema de paralelogramo con el que se logra tener un movimiento paralelo al piso, propiciando que el láser siempre apunte hacia abajo (Ver Figura 51). El brazo robótico SCARA emplea un sistema de transmisión que utiliza motores a pasos para generar movimiento. Estos motores transmiten su movimiento a través de bandas dentadas, las cuales están conectadas mediante poleas específicamente diseñadas para este tipo de banda. Este sistema de transmisión se replica para cada grado de libertad del brazo robótico. Los materiales de construcción fueron cuidadosamente seleccionados con el objetivo de minimizar el peso del brazo robótico. Además, se estableció que la longitud del brazo tenía que cubrir el tamaño de un surco con 80 cm de distancia entre cultivo.

En el extremo final del segundo eslabón del brazo, se integró un láser de 80 watts de potencia, destinado a la eliminación de malezas. En la Figura 5 se muestra el brazo robótico tipo SCARA completo.



Figura 5. Brazo robótico tipo SCARA.

3.4.4. Sub-ensambles del brazo robótico

Con la finalidad de identificar y explicar los elementos que conforman el brazo robótico se optó por separar el ensamble final en sub-ensambles. En la Figura 6 se muestra el explosionado enumerado que consta de 1) Sistema de paralelogramo, 2) Eslabón 1, 3) Eslabón 2 y en el Cuadro A1 (ver Anexo) se menciona la descripción de cada sub-ensambre.

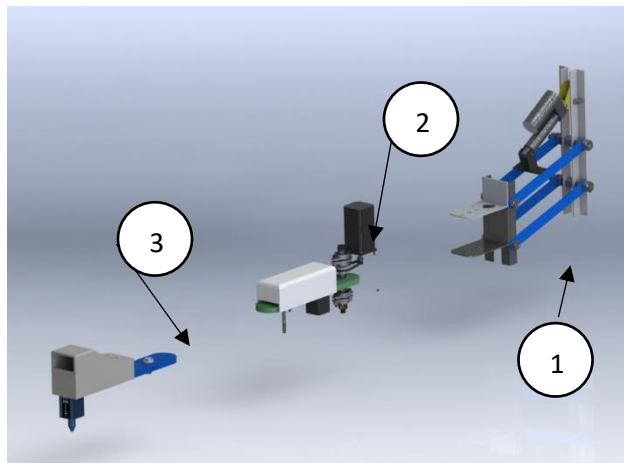


Figura 6. Brazo robótico SCARA explosionado.

3.4.5. Sistema de paralelogramo

Este sub-ensamble de paralelogramo realiza la conexión entre el robot Voltan y el brazo robótico tipo SCARA; está diseñado para tener un movimiento paralelo al suelo manteniendo el láser apuntando hacia abajo. Por medio de un actuador lineal electrónico el brazo adquiere otro grado libertad en la coordenada Z dejando la boquilla de la herramienta de corte con una altura máxima de 250 mm y 20 mm como mínimo al piso. En la Figura 7 se muestra el sistema de paralelogramo y en la Figura A1 (véase en el Anexo) se despliega un explosionado del enganche paralelogramo, mientras que en el Cuadro A2 (véase en el Anexo), se describen los componentes.



Figura 7. Sistema de paralelogramo.

3.4.6. Eslabón 1

El eslabón 1 es una de las partes principales debido a que contiene el mayor número de piezas y es donde se encuentra el sistema de transmisión para la manipulación del eslabón 2. Este sistema consta de un motor con su polea dentada motriz y una polea conducida que transmite el movimiento al eslabón 2. En la Figura 8 se muestra el sub-ensamble del eslabón 1 y en la Figura A2 (véase en el Anexo) se observa un explosionado con el número de elemento. En el Cuadro A3 (véase en el Anexo), se detallan los componentes del eslabón 1.

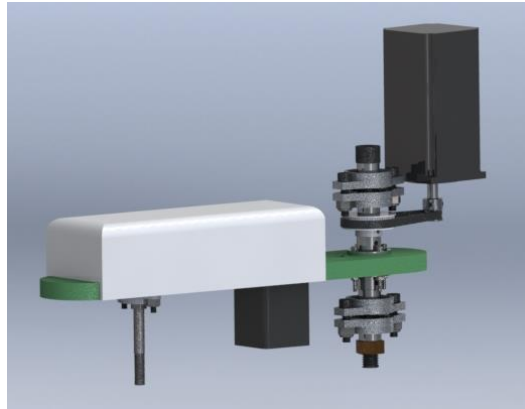


Figura 8. Eslabón 1.

3.4.7. Eslabón 2

En este eslabón se encuentra instalado el láser que está destinado a eliminar la maleza. Se diseñó una tolva con el propósito de salvaguardar el sistema electrónico de daños eventuales ocasionados por el polvo y otros agentes externos. Esta tolva ha sido realizada meticulosamente, incluyendo tomas de aire estratégicamente ubicadas para garantizar el adecuado enfriamiento del láser y de sus componentes electrónicos en funcionamiento. Este diseño protege los circuitos eléctricos de la contaminación de polvo y también asegura un rendimiento optimo y una larga vida útil del sistema en su conjunto. En la Figura 9 se muestra el sub-ensamble del eslabón 2 y en la Figura A3 (véase en el Anexo) el explosionado del eslabón 2, mientras que en el Cuadro A4 (véase en el Anexo) se detallan los elementos del eslabón 2.

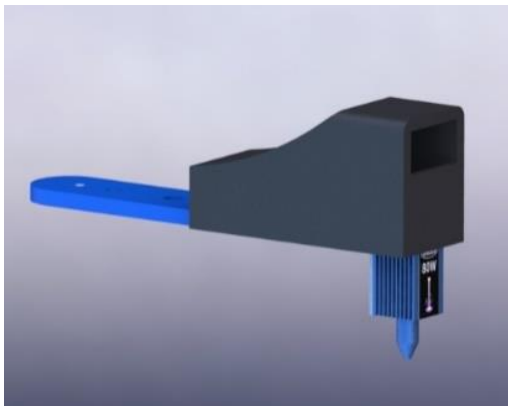


Figura 9. Eslabón 2.

3.4.8. Sistema de control del brazo robótico SCARA

El brazo robótico tipo *SCARA* cuenta con dos motores a pasos para el control de su trayectoria, los cuales son controlados mediante un *driver* DM542 y programados con un Arduino Mega 250. Este microcontrolador, reconocido por su versatilidad y capacidad de procesamiento, coordina los movimientos precisos de los motores a pasos, permitiendo un control óptimo y eficiente del brazo robótico en su totalidad. Además, cuenta con un actuador lineal con un sistema de paralelogramo controlado con un driver L298N, el cual aporta un grado de libertad adicional en el eje vertical (Z). Para la detección de maleza se utiliza una cámara Logitech C920 *Full HD conectada a una laptop DELL P49G*. El actuador principal del brazo es un láser tipo diodo, el cuál se controla con un puente H IBT_2, que permite controlar la potencia necesaria para su trabajo, permitiendo ajustes precisos según los requerimientos específicos del tipo de maleza. Se utilizaron sensores de fin de carrera para delimitar el recorrido del brazo, así como para detectar el inicio de rutina. La combinación de estos elementos garantiza un control preciso y seguro del brazo robótico tipo *SCARA*, así como una operación confiable y eficiente. En la Figura A4 (véase en el Anexo) se muestra un Arduino Mega y un puente H IBT_2, mientras que en la Figura 10 se ilustra la conexión de los elementos electrónicos y los elementos utilizados para el control del brazo se describen en el Cuadro A5 (véase en el Anexo).

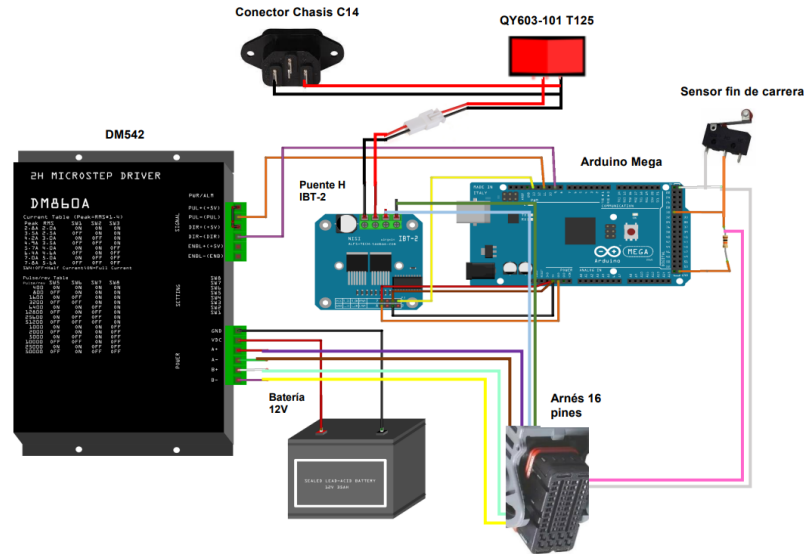


Figura 10. Esquema de conexión sistema electrónico.

La construcción del brazo robótico ensamblado al sistema de enganche pesó 5 kg.

3.4.9. Área de trabajo del brazo robótico

Se calculó el área de trabajo del brazo *SCARA* considerando el movimiento que realiza en el plano (x, y) ya que en este caso el movimiento en el eje “z” no influye en el área de trabajo. Las variables utilizadas para realizar el cálculo del área de trabajo son la longitud de los eslabones L_1 , L_2 y la longitud total estas se muestran en la Figura 11, las longitudes son tomadas a partir del centro del eje de rotación de los eslabones y el centro de la boquilla del láser. Se toman en cuenta las restricciones de movimiento donde los ángulos máximos de cada eslabón son de 180° para cada eslabón, el primero con respecto al origen del brazo y el segundo con respecto al eslabón 1. Para este cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$R_{max} = L_1 + L_2 = 0.476m \dots\dots\dots(1)$$

$$R_{min} = L_2 = 0.271m \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{área de trabajo} = \pi \left(\frac{(R^2_{max})}{2} - \frac{(R^2_{min})}{2} \right) = 0.24m^2 \dots\dots\dots(3)$$

En donde: R max es igual al radio máximo y R min es igual al radio mínimo.

En el *software* SolidWorks se realizó el dibujo del área de trabajo. En la Figura 12 se muestra en color verde el espacio de trabajo del brazo robótico; en azul se ilustran los ejes con las dimensiones de cada eslabón y con líneas punteadas se simulan los límites de cada surco con separación de 80 cm. Utilizando el mismo *software* se verificó que el resultado dado por la Ecuación anterior es igual al diseño en CAD este se muestra en la Figura 13.

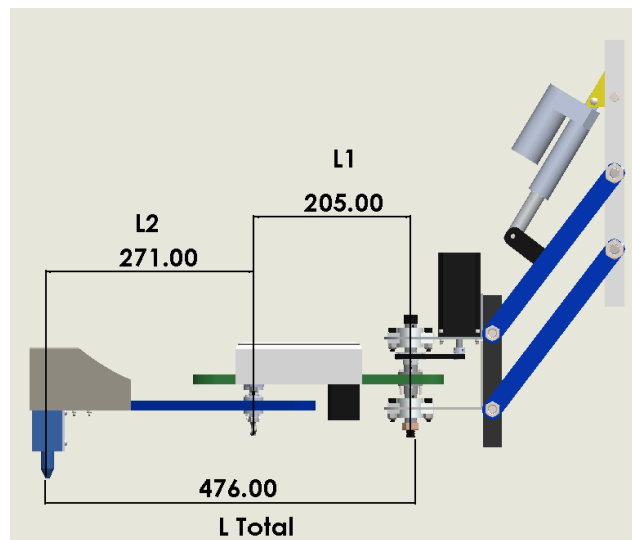


Figura 11. Longitud de los eslabones

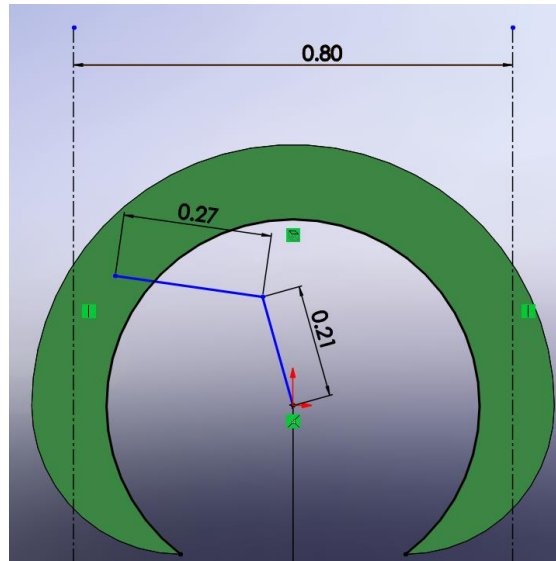


Figura 12. Área de trabajo del brazo SCARA

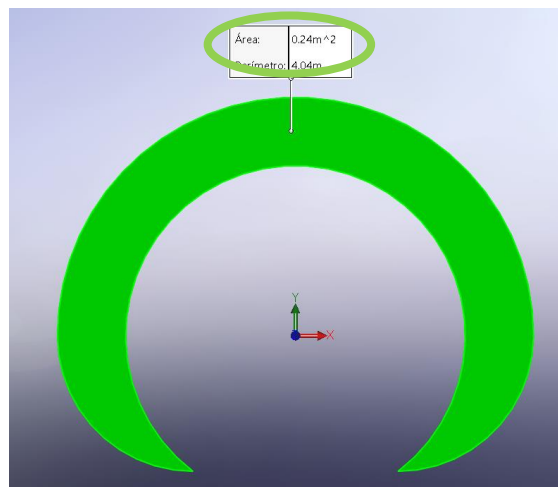


Figura 13. Comprobación de área de trabajo con el software SolidWorks.

3.4.10. Análisis de desplazamiento para el brazo SCARA

A partir del diseño y la construcción del prototipo robótico, se realizó la cinemática inversa con el objetivo de emplearse en la programación para calcular el ángulo que debe girar cada eslabón para alcanzar las coordenadas donde se encuentra la maleza. Las variables utilizadas son q_1 (theta 1) para el eslabón 1 con respecto al origen del eje x, q_2 (theta 2) para el eslabón 2 con respecto al eslabón 1. La longitud de cada eslabón se representa con la letra “L”, esta es tomada del centro

de rotación de eslabón a eslabón y al centro de la herramienta de corte (láser). En la Figura 14 se muestra un esquema de la posición de las variables para la cinemática inversa. Con las variables de longitud obtenidas después de la construcción del prototipo se utilizaron las siguientes Ecuaciones:

$$q_1 = \tan^{-1} y/x - \tan^{-1} \left(\frac{l_2 \sin q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \dots \dots \dots (5)$$

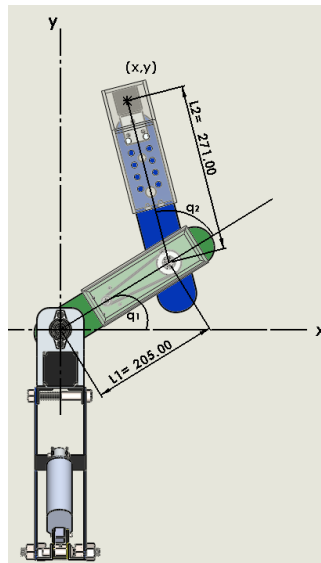


Figura 14. Esquema de las variables para la cinemática inversa.

Donde (x, y) son las coordenadas del punto final a donde debe llegar el actuador final.

3.4.11. Configuración de motores paso a paso.

Los motores a pasos instalados en el brazo robótico tienen un ángulo de paso igual a 1.8°. Para conseguir el número de pasos por revolución se utilizó la siguiente Ecuación:

$$paso \ por \ revolution = \frac{360^\circ}{\text{ángulo de paso}} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \ pasos \dots \dots \dots (6)$$

Una vez obtenidos los pasos para tener una revolución en los motores, se obtuvo la relación del sistema de transmisión para el movimiento de cada eslabón para el eslabón 1.

3.4.12. Transmisión de eslabones

El movimiento de los eslabones está conformado por un juego de poleas y bandas dentadas conectadas a motores a pasos. El eslabón 1 realiza el movimiento correspondiente al motor nema 23 con un par de poleas de 60 dientes cada una y la transmisión del eslabón 2 cuenta con una polea motriz de 20 dientes y una polea impulsada de 40. Para obtener la relación de transmisión de poleas se utilizó la siguiente Ecuación:

$$\text{Relación de poleas} = \frac{\text{número de dientes de la polea motriz}}{\text{número de dientes de la polea impulsada}} \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{Relación de poleas eslabón 1} = \frac{60}{60} = 1 \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{Relación de poleas eslabón 2} = \frac{20}{40} = 0.5 \dots\dots\dots(9)$$

La relación de poleas obtenida permitió identificar el número de vueltas que necesita la polea motriz para que la polea impulsada realice una revolución. En la Figura A5 (véase en el Anexo) se muestra las poleas utilizadas y la banda para la transmisión del eslabón 2.

3.4.13. Configuración del sistema de visión

Para realizar la programación del sistema se utilizó una cámara web de la marca *Logitech* modelo C920 *Full* HD la cual se calibró con un patrón de Cuadros negros y blancos de 2.5cm de lado cada uno. Se tomaron diferentes imágenes con diferentes posiciones y se empleó *OpenCV* como software de calibración, con un

código con el tamaño de del patrón definido para tener como resultado la distancia focal y el centro óptico. A continuación, se muestran los pasos a seguir para la calibración de la cámara (ROS, 2019):

1.- Obtener la distancia focal en píxeles:

La matriz de proyección proporciona la distancia focal en píxeles a lo largo de los ejes X e Y. Estos valores se encuentran en la matriz de proyección:

- Longitud en píxeles (eje X) Distancia focal en píxeles (eje X) = $f_x = 628.619934$
- Longitud en píxeles (eje Y) Distancia focal en píxeles (eje Y) = $f_y = 626.758362$

2.-Cálculo de la relación píxeles a metros:

Para calcular la relación entre píxeles y metros, se utilizó la fórmula:

Relación de Pixel a metro= $(Z \times P) / f$

donde:

Z es la distancia desde la cámara al plano en metros.

P es el tamaño de un píxel en el plano real (en metros).

F es la distancia focal en píxeles.

3.-Relación píxeles a metros en ambos ejes:

Eje X:

Perímetro de pixeles (eje X) = $0.431\text{m} / 628.619934 \text{ px} = 0.000685 \text{ m/px} = 0.0685 \text{ cm/px}$

Eje Y:

Perímetro de pixeles (eje Y) = $0.431\text{m} / 626.758362 \text{ px} = 0.000687 \text{ m/px} = 0.0687 \text{ cm/px}$

En la Figura 15 se muestra la hoja de patrones de ajedrez para la calibración de la cámara.



Figura 15. Calibración de cámara.

3.4.14. Software de visión para computadora

El software utilizado para procesar imágenes fue la biblioteca *OpenCV* (*Open Computer Vision, por sus siglas en inglés*). Para controlar el movimiento del brazo se realizó un programa para Arduino y el software *ROS* (*Robot Operating System, por sus siglas en inglés*) para control de movimiento de los motores. Se utilizó un laptop marca DELL P49G.

Se realizó un código para la segmentación del color verde, convirtiendo la posición de las malezas detectadas en coordenadas.

Para relacionar el espacio de visión con los movimientos del brazo robótico, se implementaron las ecuaciones de cinemática inversa (Ecuaciones 1 y 2 mencionadas previamente) en un código de Arduino, con el objetivo de mover el efector final a las coordenadas deseadas. Para obtener el control del brazo robótico mediante visión, se ejecutaron cuatro códigos. Además, se crearon cinco nodos en la plataforma ROS, los cuales realizan las siguientes tareas:

Nodo 1 Publicación de video; este nodo enciende la cámara y publica el video.

Nodo 2 Segmentación de imágenes; llama al código donde se realiza la segmentación de la maleza.

Nodo 3 Calculo de contornos y centroide; en este nodo se llama al código que realiza un contorno y promedia el centroide de cada maleza.

Nodo 4 Convertidor de las coordenadas en pixeles a metros; como su nombre lo dice este código convierte las coordenadas en pixeles de la cámara a metros. Dentro de este código hay una calibración de los orígenes de la cámara y el brazo convirtiendo las coordenadas de la cámara a coordenadas del brazo SCARA.

Nodo 5 Movimiento del brazo robótico con cinemática inversa; este código recibe las coordenadas en metros del nodo anterior y realiza el movimiento hacia el centroide de la maleza detectada. En la Figura 16 se muestra un diagrama de flujo del brazo robótico.

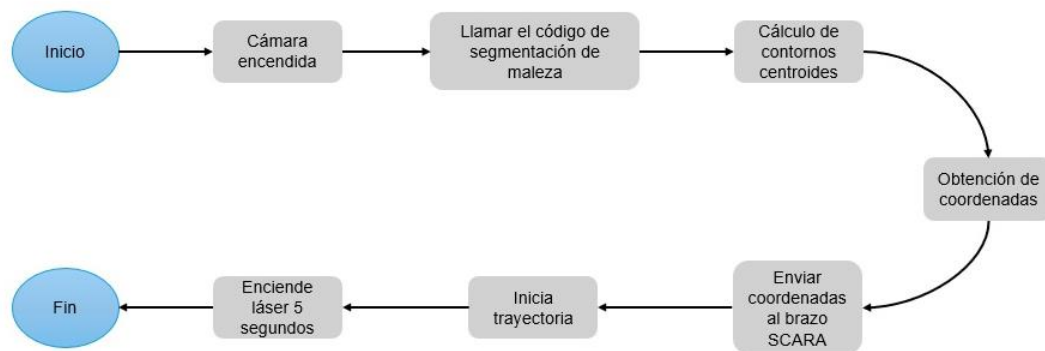


Figura 16. Diagrama de flujo del brazo robótico.

3.4.15. Calibración del brazo SCARA con la cámara

Una vez resuelta la calibración de la cámara y el control del brazo, se procedió con la sincronización del sistema. el primer paso fue realizar un bosquejo en el *software* SolidWorks para visualizar el área de trabajo del brazo robótico dentro del campo de visión de la cámara; dicho bosquejo se muestra en la Figura 17. Para facilitar las mediciones, se colocó papel milimétrico debajo del brazo SCARA, como se observa en la Figura A6 (véase en el Anexo), dónde se muestra el brazo robótico sobre el papel milimétrico.

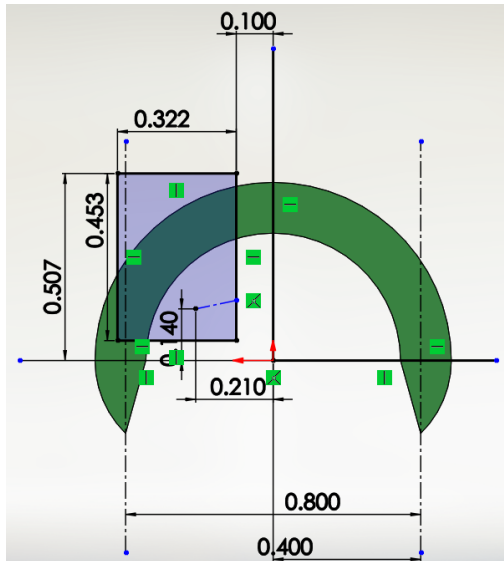


Figura 17. Bosquejo de área de visión en espacio de trabajo.

3.4.16. Organización de movimiento

Una vez incorporados los procesos mencionados, se obtuvo un sistema de lazo cerrado en el cual la visión envía las coordenadas de la maleza al brazo SCARA. Este brazo realiza un movimiento hacia un punto de referencia conocido como “home”, que establece el punto de partida para dirigir el brazo hacia las coordenadas de la maleza, asegurando que las trayectorias más precisas. En esta posición el eslabón 1 se alinea sobre el eje x y el eslabón 2 en un ángulo de 90° con respecto al eslabón 1. En la Figura 18 se muestra el brazo en la posición *home*.

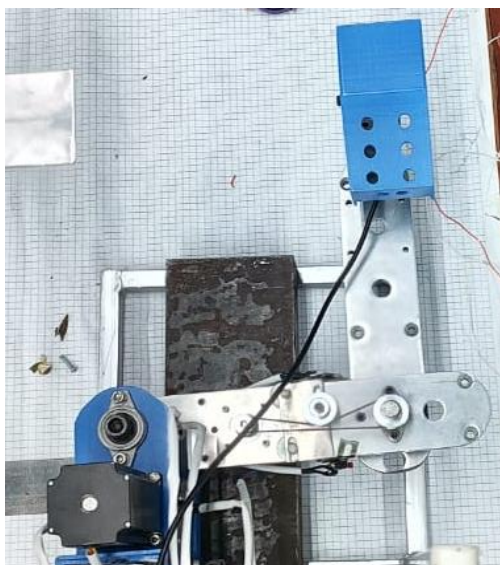


Figura 18. Brazo en posición *Home*.

3.4.17 Evaluación del sistema

Se realizaron experimentos del prototipo en la Universidad Autónoma Chapingo, en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. La primera prueba consistió en cortar la maleza con el láser, utilizando su potencia máxima de 80 watts, controlado con un Arduino mega y una señal PWM. El láser se colocó en un riel que permitía su desplazamiento en un solo eje, como se muestra en la Figura A7 (véase en el Anexo). Las malezas utilizadas en las pruebas tenían edades de 7, 10 y 15 días, con diámetros promedio de 2.3, 3 y 3.4 mm, respectivamente. La altura del láser se ajustó en un rango de 2-150 mm para obtener la altura de corte ideal.

Los primeros ensayos del sistema completo brazo y visión consistieron en realizar una rutina en la que se detectan hojas dentro del área de trabajo del brazo, y el sistema envía al brazo a las coordenadas obtenidas por la visión. En la Figura 19 se muestran dos ventanas: una con las coordenadas obtenidas y otra con el área de visión de la cámara. Al alcanzar el punto se activa el láser por 3 segundos, perforando la hoja. La Figura A8 (véase en el Anexo) muestra como el láser emite el rayo sobre una hoja y la perforación generada en las coordenadas correspondientes. Esta prueba se realizó 10 veces.

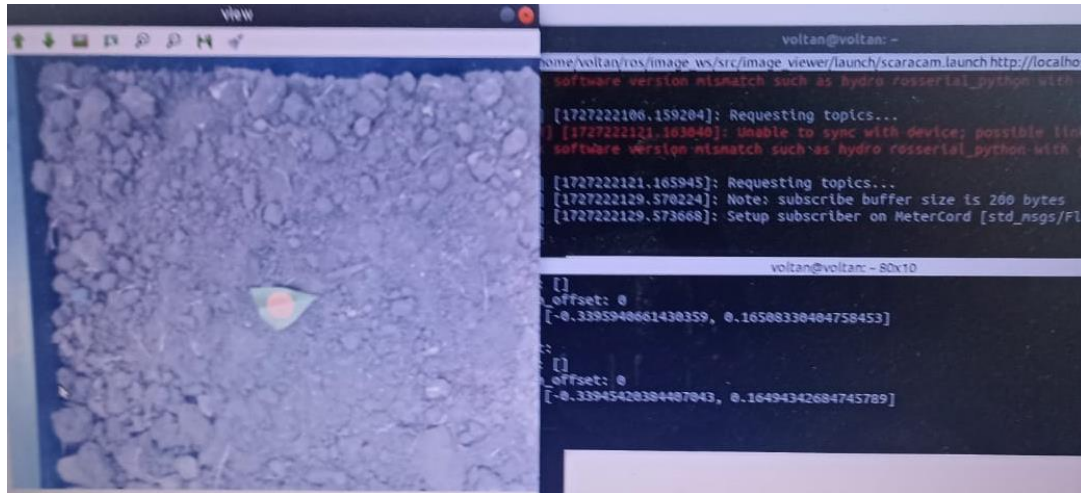


Figura 19. Coordenadas con ventana de localizacion de centroide.

La perforación realizada en la hoja sirve como referencia para realizar mediciones y obtener las coordenadas reales.

3.4.18. Pruebas con láser

Se observó que existe una relación entre la altura y la velocidad de corte: cuanto más cerca está el láser de la maleza, más rápido es el corte. El tiempo promedio para realizar cada corte fue de 4 segundos. En la Figura 20 muestra una fotografía del corte realizado por el láser.



Figura 20. Corte de maleza con láser.

3.5. Resultados

3.5.1. Pruebas del brazo SCARA

Una vez que se midieron los 10 puntos se compararon con las coordenadas objetivo en la Cuadro 2 se muestran los datos resultantes con los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Para el eje "X":

- Error promedio = -58.7 mm;
- Error absoluto medio (MAE) = 58.7 mm y
- Desviación estándar = 5.4 mm.

Para el eje "Y":

- Error promedio = -25 mm:
- Error absoluto medio (MAE) = 37 mm y
- Desviación estándar (σ) = 30.2 mm.

Cuadro 2. Datos pruebas del brazo SCARA

No	Objetivo (m)		Reales (m)		Diferencia de mediciones (m)		Error medio de Vectorial (m)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-0.257	0.172	-0.315	0.144	-0.058	-0.028	-0.0587	-0.046
2	-0.29	0.209	-0.356	0.17	-0.066	-0.039		
3	-0.283	0.11	-0.345	0.07	-0.062	-0.04		
4	-0.22	0.12	-0.271	0.08	-0.051	-0.04		
5	-0.248	0.188	-0.304	0.157	-0.056	-0.031		
6	-0.271	0.159	-0.335	0.131	-0.064	-0.028		
7	-0.257	0.141	-0.313	-0.105	-0.056	-0.246		
8	-0.251	0.156	-0.311	0.119	-0.06	-0.037		
9	-0.333	0.245	-0.397	0.305	-0.064	0.06		
10	-0.225	0.201	-0.275	0.17	-0.05	-0.031		

En las Figuras 21 y 22 se muestran las gráficas de los datos tomados en la primera prueba.

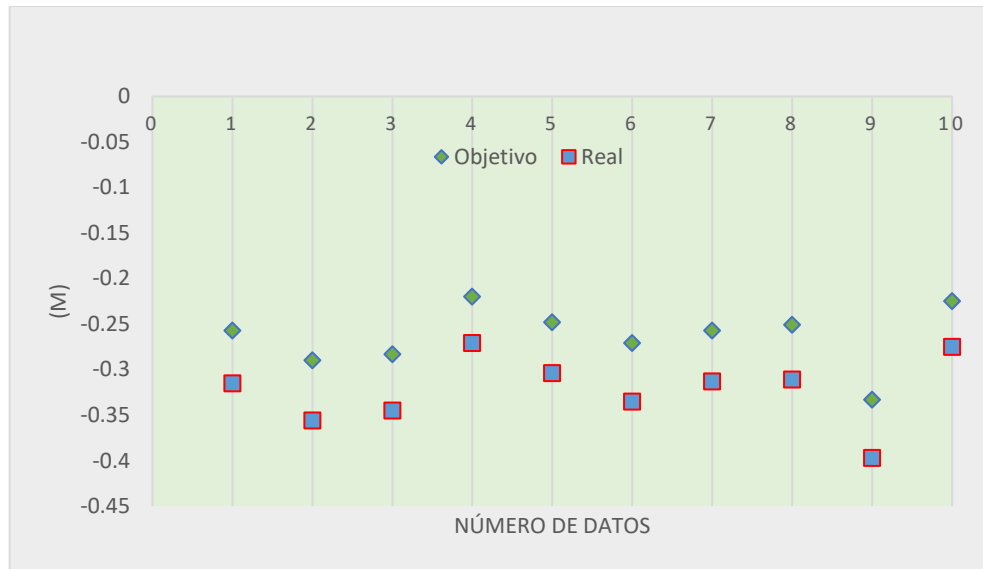


Figura 21. Grafica de diferencia de posicione entre coordenadas “X”.

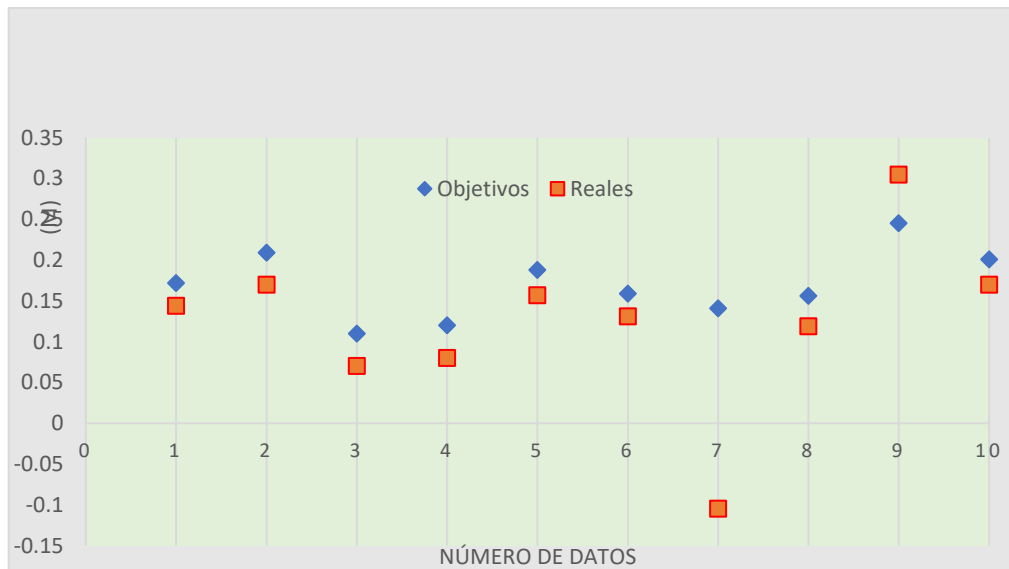


Figura 22. Grafica de diferencia de posicione entre coordenadas “Y”.

El objetivo de esta primera prueba fue comparar las coordenadas obtenidas por la visión y las reales que se midieron en las hojas perforadas por el láser, los resultados obtenidos mostraron que existía un error absoluto medio de 58.7 mm en el eje “X” y de 37 mm en “Y” por lo que se tuvo que realizar calibraciones para reducir el error de manufactura éstas se muestran a continuación.

3.5.2. Primera calibración

Con base en los resultados obtenidos de la primera prueba, se hizo una calibración en el código con nombre “convertidor de las coordenadas en pixeles a metros”, la cual consiste en obtener el error promedio y con base en el signo resultante se suma o resta en el código mencionado. Después con el nuevo resultado se realizó una nueva prueba repitiendo el procedimiento anterior. En el Cuadro A6 (véase en el Anexo) se muestra los datos que se obtuvieron para los siguientes resultados:

En “X”:

- Error promedio 27 mm,
- MAE= 32 mm y
- σ = 19 mm

En “Y”:

- Error promedio 29 mm,
- MAE= 29 mm y
- σ = 34 mm.

En las Figuras 23 y 24 se muestran las gráficas de “X” y “Y”, respectivamente mostrando el desface de las coordenadas objetivo y reales.

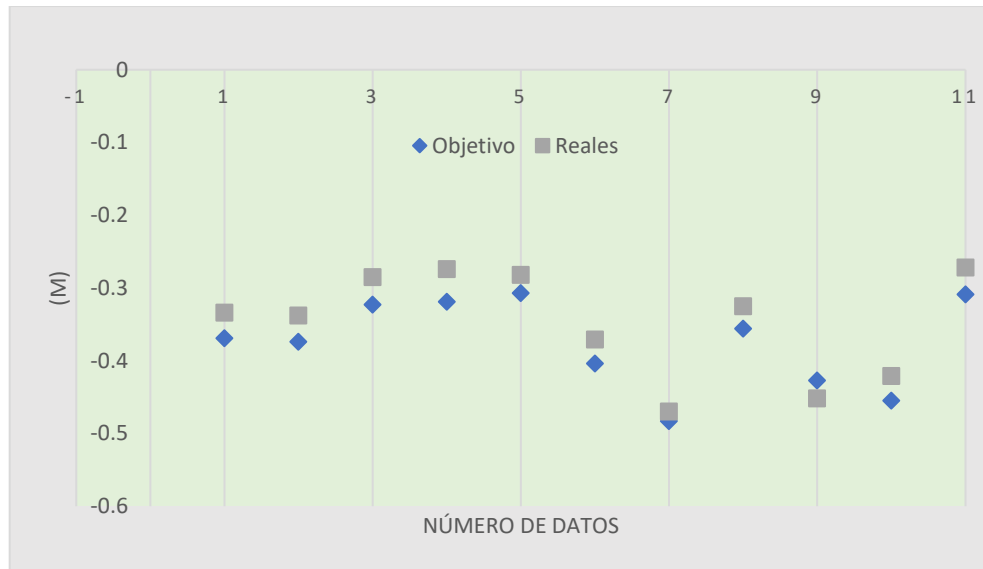


Figura 23. Primera calibración en “X”.

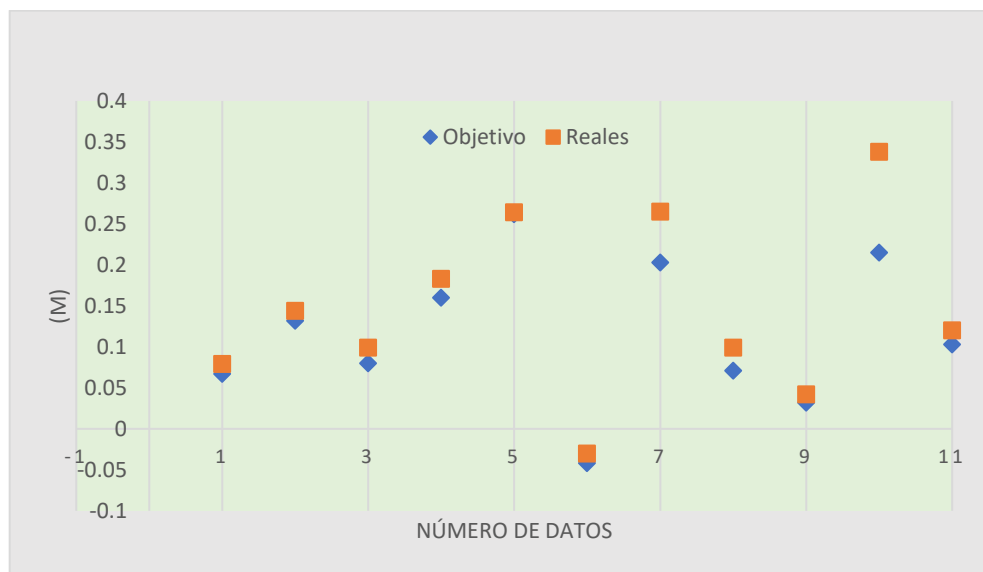


Figura 24. Primera calibración en “Y”.

3.5.3. Segunda Calibración

Para obtener un mejor resultado se realizó un mayor número de repeticiones corroborando las variables de posición. Estos nuevos resultados arrojaron:

Valores de “X”:

- Error promedio de 1.5 mm.
- MAE= 2.0 mm y
- $\sigma= 2.6$ mm

Valores de “Y”:

- Error promedio= -1.6 mm,
- MAE= 2.1 mm y
- $\sigma= 2.3$ m.

En las Figuras 25 y 26 se observan las gráficas correspondientes a la calibración en los ejes “X” y “Y”, en las cuales se observa que el desfase entre los puntos objetivo y reales se redujo.

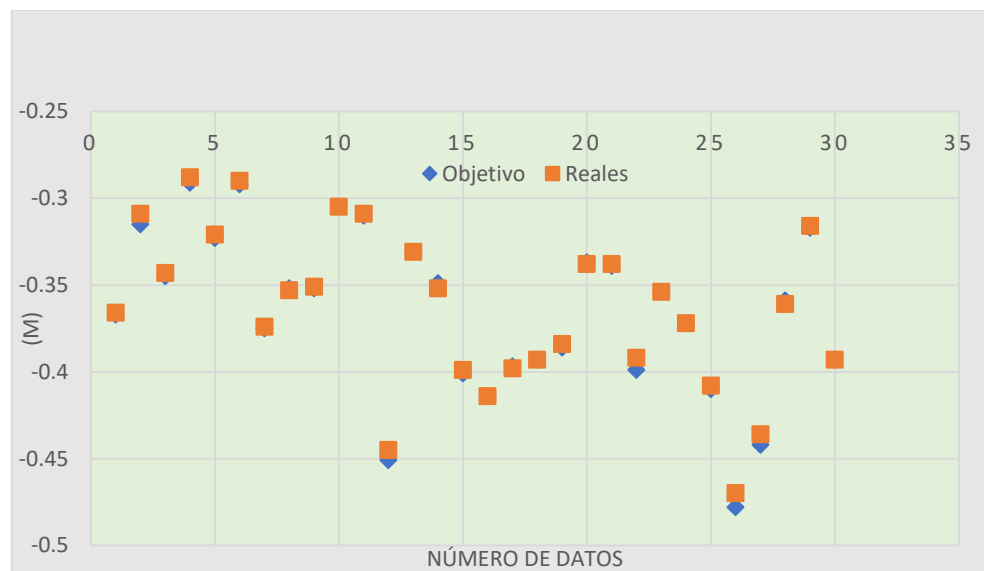


Figura 25. Segunda calibración en X.

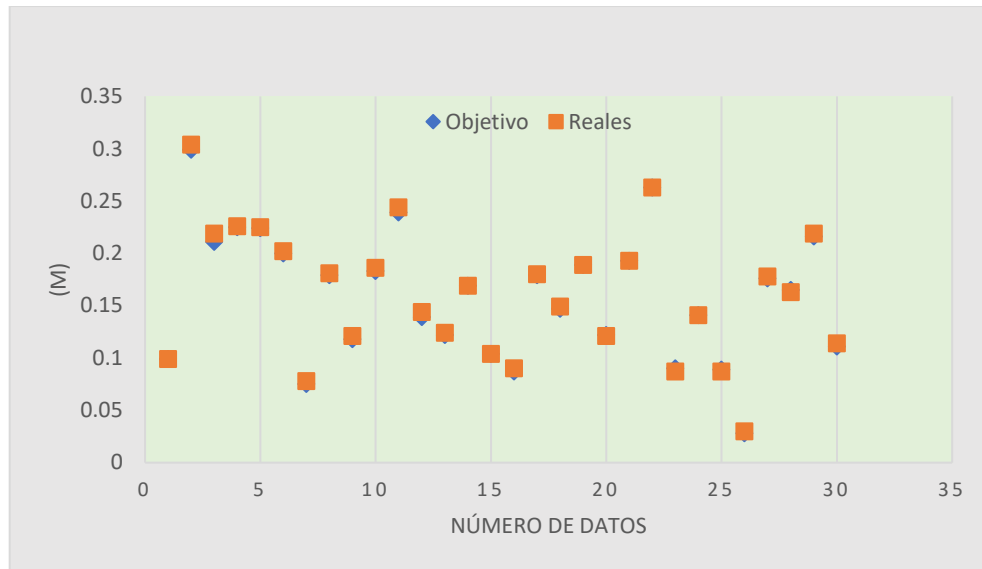


Figura 26. Segunda calibración en Y.

3.5.4. Resultados de calibración

Finalmente, se realizaron 50 repeticiones donde se observó una mejora significativa, donde el desfase es mínimo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Error promedio:** X= -0.251 mm, Y= -0.26 mm;
- **MAE:** X= 0.584 mm, Y= 1.41 mm;
- **σ :** X= 0.79 mm, Y= 1.1 mm.

Las gráficas correspondientes a la diferencia entre las coordenadas reales y el objetivo se muestran en las Figuras 27 y 28.

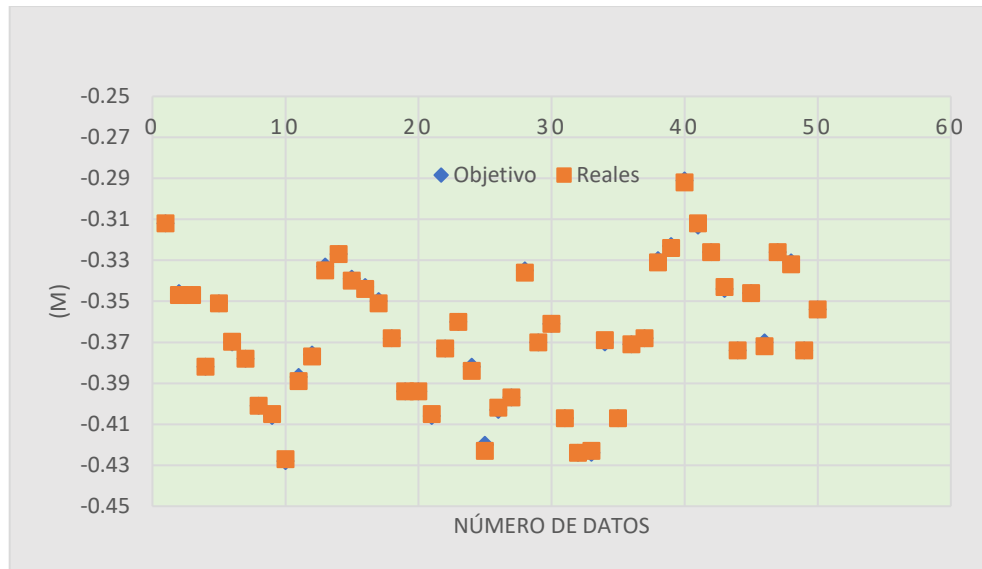


Figura 27. Resultados en X.

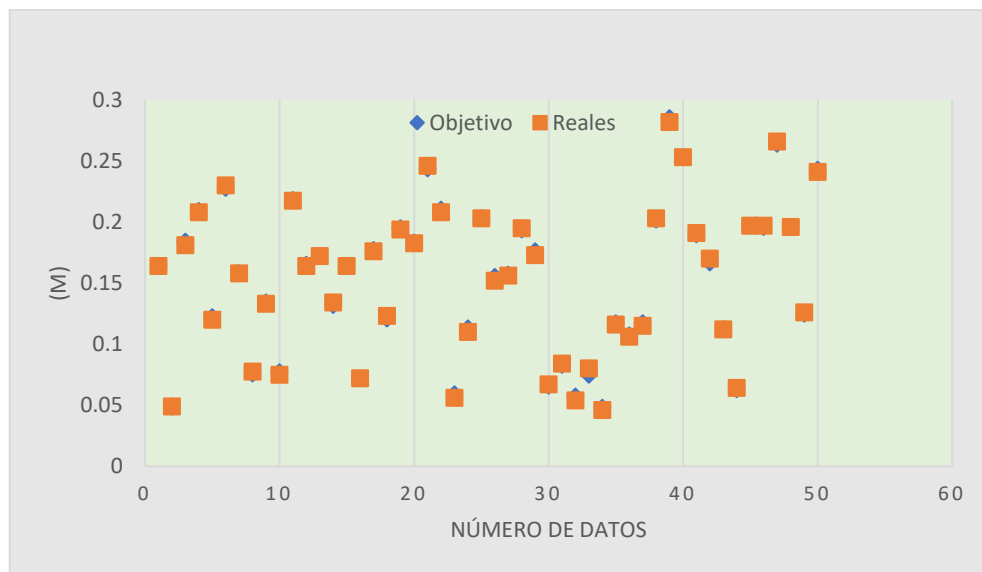


Figura 28. Resultados en Y.

Se graficaron los resultados del error absoluto de cada prueba realizada; comparando la primera con la segunda y la tercera con la cuarta. Se observa que, con cada calibración, el error se fue acercando al 0. En las Figuras 29 y 30 se muestran las gráficas en “x” y “y” de la comparación del error absoluto en la primera y segunda prueba, mientras que en las Figuras 31 y 32 se muestran las gráficas de la tercera y cuarta prueba.

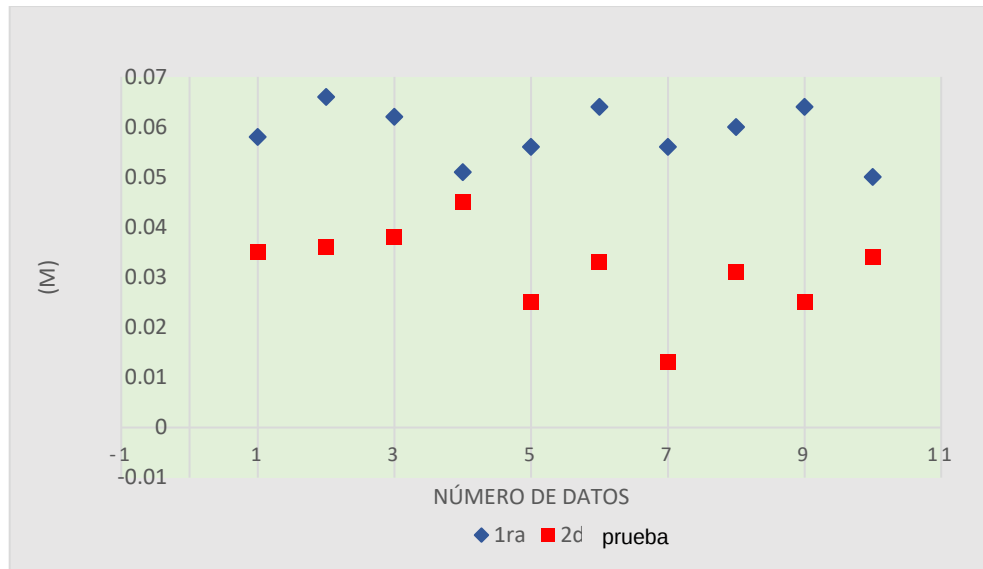


Figura 29. Comparación de la primera y segunda prueba del error absoluto en el eje "X".

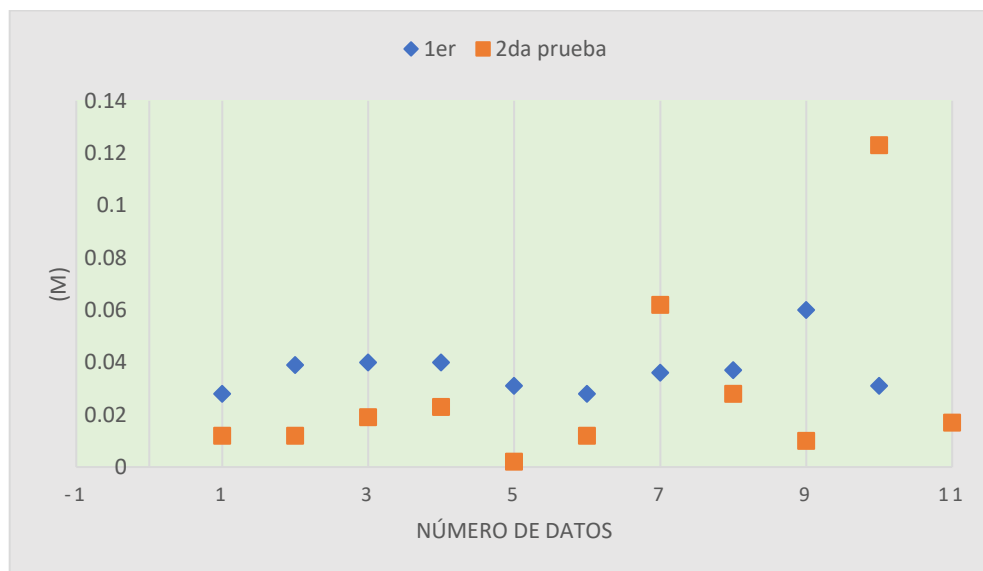


Figura 30. Comparación de la primera y segunda prueba del error absoluto en el eje "Y".

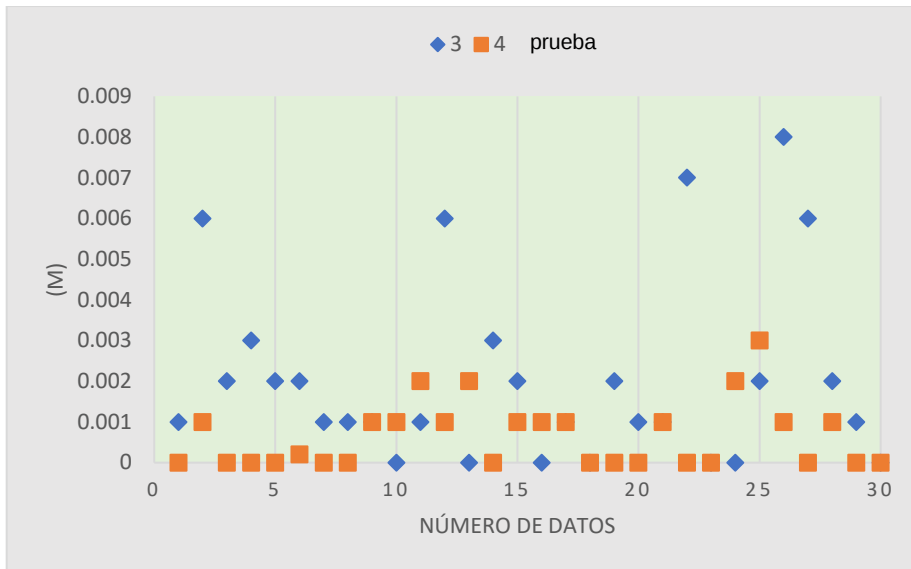


Figura 31. Comparación de tercera y segunda prueba del error absoluto en el eje “X”.

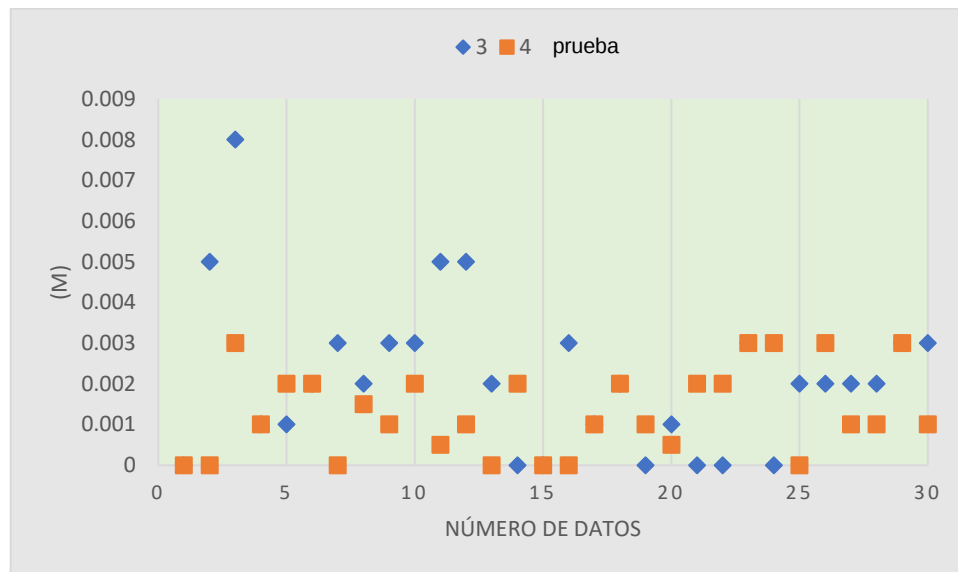


Figura 32. Comparación de la primera y segunda prueba del error absoluto en el eje “Y”.

3.6. Conclusiones

Para la construcción del implemento para la eliminación de maleza se emplearon materiales ligeros a fin de obtener un peso bajo (5.3 kg). El sistema fue controlado con un Arduino Mega y utilizó procesamiento de visión por computadora. El brazo SCARA mostró precisión para cortar maleza dentro del margen de error

establecido. Los resultados mostraron que el prototipo es capaz de seguir las trayectorias enviadas por el sistema de visión y dirigir el láser hacia la maleza detectada. En las pruebas de corte en maleza con un tiempo de crecimiento de 7 a 15 días, el láser de 80 watts logró cortar y cauterizar las plantas induciendo su eliminación.

El brazo robótico podría tener futuras mejoras para reducir los erros encontrados, aunque estos ya se consideran bajos. La incorporación de más sensores que ajusten la ruta del láser podría compensar errores dinámicos.

La integración de un brazo robótico tipo SCARA con láser demuestra un enfoque innovador para el control de malezas en los cultivos. Esta tecnología, ofrece una alternativa para la reducción en el uso de herbicidas y mejorar la sostenibilidad en la agricultura.

3.7. Literatura citada.

- Chauvel, B., Gauvrit, C., & Guillemin, J. P. (2022). From sea salt to glyphosate salt: a history of herbicide use in France. *Advances in Weed Science*, 40(spe 1), e020220015.
- Diaz, J. F. A., Dutra, M. S., & Diaz, C. J. (2007, November). Design and construction of a manipulator type SCARA, implementing a control system. In *Proceedings of COBEM, 19th International Congress of Mechanical Engineering* (pp. 5-9).
- Frasca, G. E., & Bruno, D. R. (2021). AUTOMAÇÃO: introdução a robótica industrial. *Revista Interface Tecnológica*, 18(2), 639-651.
- González-Moscoso, M., Meza-Figueroa, D., Martínez-Villegas, NV y Pedroza-Montero, MR (2023). IMPACTO DEL GLIFOSATO en la salud humana y el medio ambiente: Alternativas sustentables para reemplazarlo en México. *Quimiosfera*, 139810.
- Kumar, P. y Ashok, G. (2020). Diseño y fabricación del robot inteligente de siembra de semillas Mater. Hoy Proc. <https://doi.org/10.1016/j.matpr> , 432.
- Landrigan, P. J., & Belpoggi, F. (2018). The need for independent research on the health effects of glyphosate-based herbicides. *Environmental Health*, 17, 1-4.
- Molina, D. P., & Peña, J. G. (2019). Diseño y análisis del funcionamiento estructural de un brazo robótico de nivel industrial de cuatro grados de libertad. # ashtag, (15), 11-33.

- Moshayedi, A. J., Khan, A. S., Yang, Y., Hu, J., & Kolahdooz, A. (2024). Robots in Agriculture: Revolutionizing Farming Practices. *EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics*, 3.
- Rai, A. K., Kumar, N., Katiyar, D., Singh, O., Sreekumar, G., & Verma, P. (2023). Unlocking productivity potential: the promising role of agricultural robots in enhancing farming efficiency. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 624-633.
- Raja, R., Nguyen, TT, Slaughter, DC y Fennimore, SA (2020). Sistema robótico de control de malezas en tiempo real para tomate y lechuga basado en la apariencia geométrica de las etiquetas de las plantas. *Ingeniería de Biosistemas* , 194 , 152-164.
- ROS (2019). Cómo calibrar una cámara monocular. Recuperado de http://wiki.ros.org/camera_calibration/Tutorials/MonocularCalibration
- Stevanović, I., Ilić, U. y Rodić, A. (mayo de 2023). Prototipado de Robot Cosechador para Corrales de Ciruela – Diseño Mecánico. En *Conferencia internacional sobre robótica en la región del Danubio de Alpe-Adria* (págs. 470-477). Cham: Springer Nature Suiza.
- Tewari, V. K., Kumar, A. A., Nare, B., Prakash, S., & Tyagi, A. (2014). Microcontroller based roller contact type herbicide applicator for weed control under row crops. *Computers and electronics in agriculture*, 104, 40-45.

4. ANEXOS

4.1 Cuadros de descripción

Cuadro A1 Sub-ensambles.

Sub-ensamble	Descripción	Cantidad de elementos
1	Sistema de paralelogramo	5
2	Eslabón 1	19
3	Eslabón 2	4

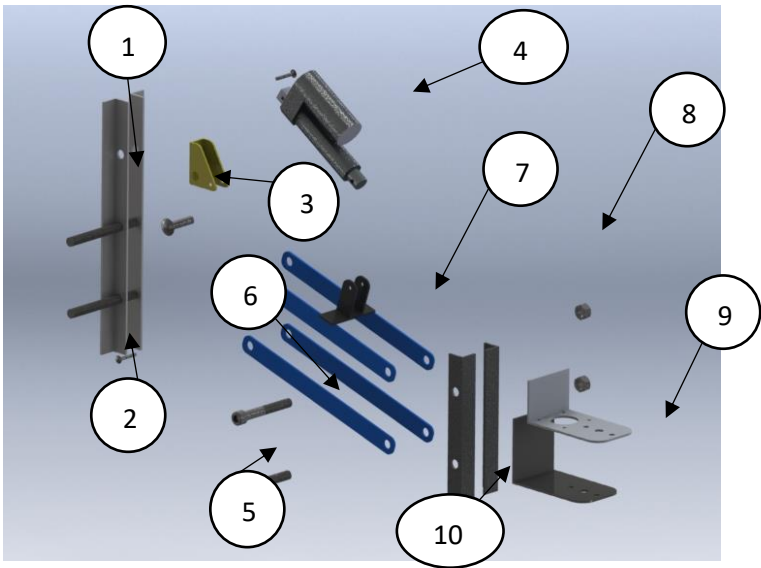


Figura A1. Explosionado del sistema de paralelogramo.

Cuadro A2. Explosionado del sistema de paralelogramo.

Numero de pieza	Descripción	Cantidad de elementos
1	Ángulos soportes	2
2	Ejes	2
3	Soporte pistón	1

4	Pistón	1
5	Tornillos	2
6	Brazos sistema de enganche	4
7	Soporte pistón de brazos	1
8	Tuercas para tornillo	2
9	Bases para brazo	2
10	Ángulos para bases de brazo	2

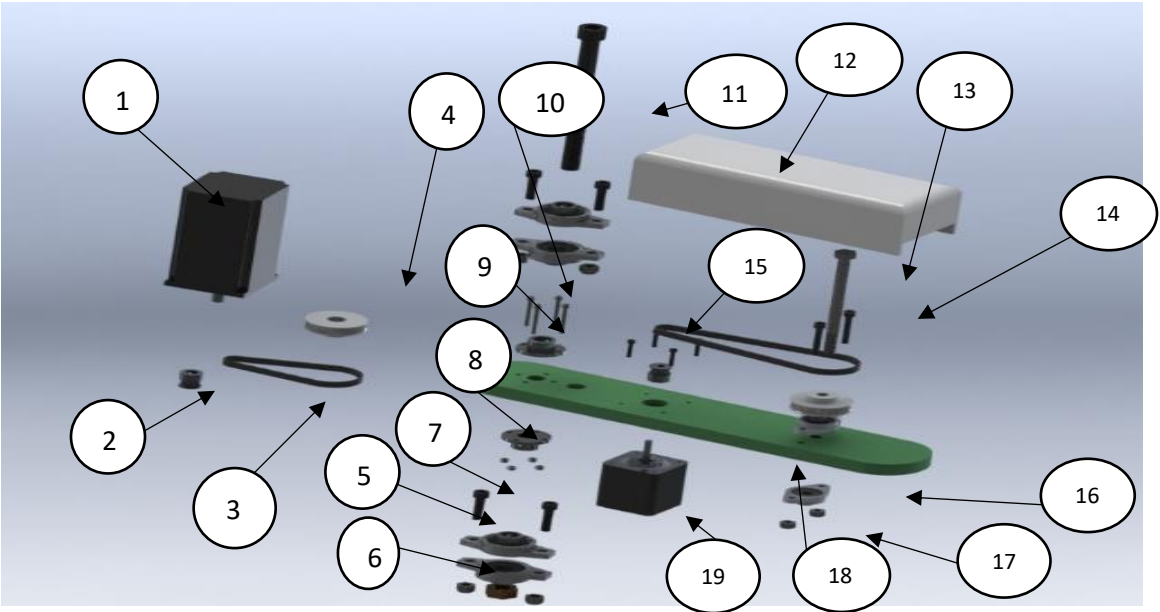


Figura A2. Explosionado eslabón 1.

Cuadro A3. Explosionado eslabón 1.

Numero de pieza	Descripción	Cantidad de elementos
1	Motor nema 23	1
2	Polea 20T 8mm	1
3	Banda dentada	2

4	Polea 60T 12mm	2
5	Chumacera 12mm	4
6	Tuercas 0.25in	4
7	Tornillos 0.25in	4
8	Tuercas 3mm	4
9	Coples 12mm	2
10	Tornillos 3mm	4
11	Tornillo 12mm	1
12	Tolva	1
13	Tornillo 8mm	1
14	Tornillo 6mm	2
15	Tornillo 4mm	4
16	Chumacera 8mm	2
17	Tuercas 4mm	2
18	Eslabón 2	1
19	Motor nema 17	1

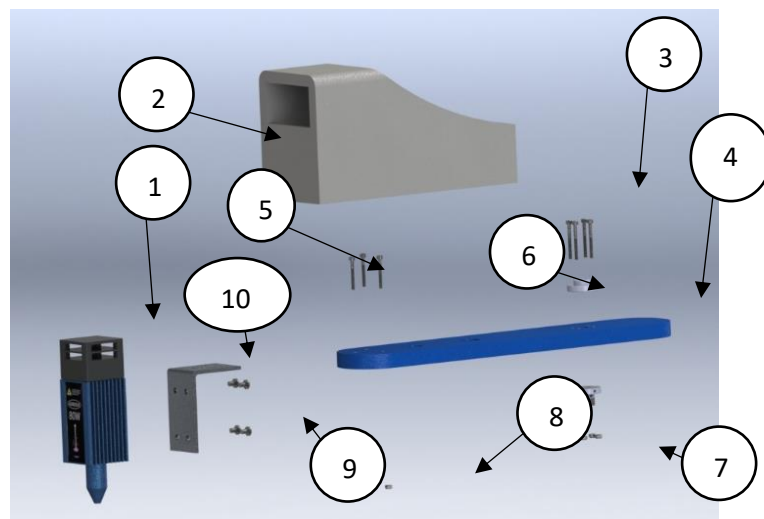


Figura A3. Explosionado eslabón 2.

Cuadro A4. Elementos del eslabón 2.

Numero de pieza	Descripción	Cantidad de elementos
1	Láser	1
2	Tolva	1
3	Tornillo 3mm	4
4	Eslabón 2	1
5	Tornillos 4mm	3
6	Cooples 8mm	2
7	Tuercas 3mm	4
8	Tuercas 4mm	3
9	Tornillos 3mm	4
10	Base láser	1



Figura A4. IBT_2 y Arduino.

Cuadro A5. Elementos electrónicos del brazo SCARA.

Elemento	Característica
Cámara Logitech C920	<i>Full HD</i>
Laptop	<i>Dell P49G</i>
Motor a pasos	Nema 23 200 pasos
Motor a pasos	Nema17

	200 pasos
Arduino Mega 2560	5 y 20mA de salida y entrada
Controlador H IBT_2	Frecuencia PWM
Batería	12 V, 7Ah
Sensor fin de carrera	0-110V, 5A



Figura A5. Relación de poleas del eslabón 2.

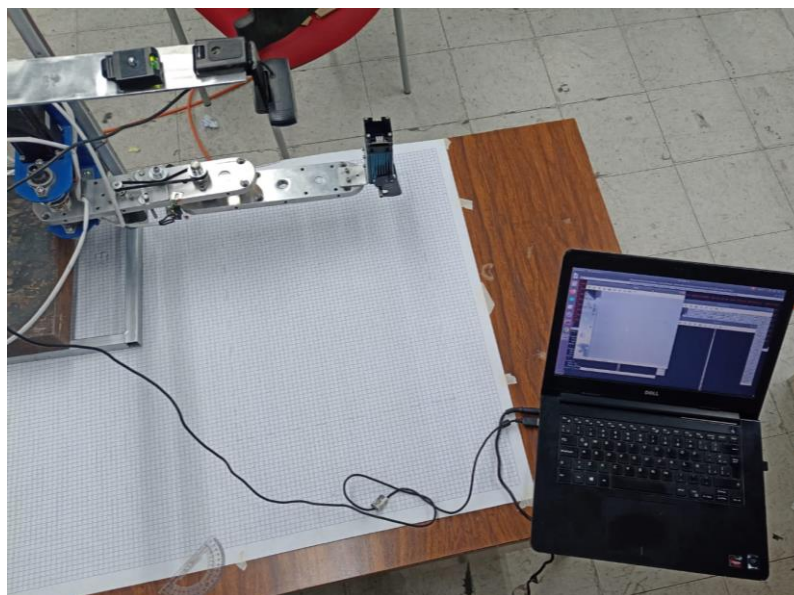


Figura A6. Foto de brazo SCARA sobre papel milimétrico.



Figura A7. Disparo de láser y hoja perforada.



Figura A8. Láser en riel.

4.2. Desarrollo del prototipo

En las siguientes secciones se especifica la fabricación y construcción del brazo robótico por medio de sub-ensambles. En la Figura A9 se muestra el brazo robótico ensamblado completamente.

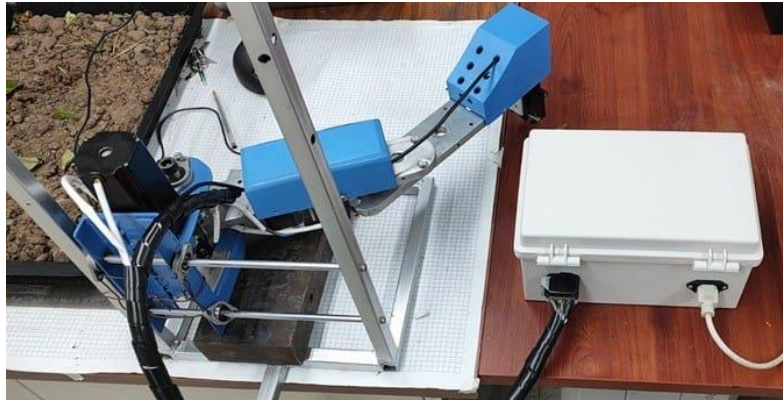


Figura A9. Brazo robótico ensamblado completamente.

4.2. Sistema de paralelogramo

El sub-ensamble del sistema de paralelogramo (Figura A10) está diseñado para mantener constantemente la dirección del láser paralela al suelo (Figura A22), con el objetivo de prevenir posibles accidentes al operador. En este sistema se coloca un motor a pasos nema 23 el cual realiza el movimiento del primer eslabón.

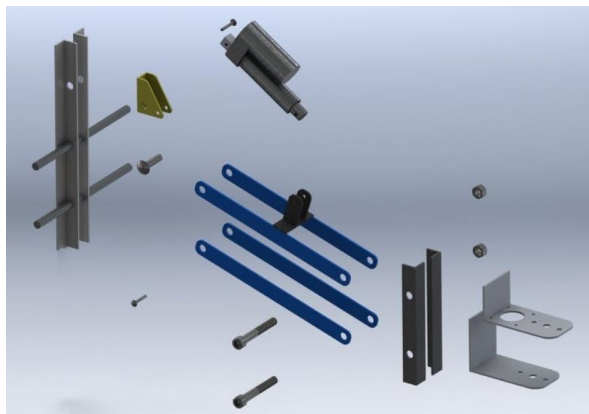


Figura A10. Sub-ensamble del sistema de paralelogramo.

4.3. Eslabón 1

El brazo robótico está integrado con dos eslabones, el primero de ellos es el que hace la conexión principal entre el sistema de paralelogramo con el conjunto del brazo por medio de un tornillo de alta resistencia de 12mm de diámetro por 15cm de largo, con una serie de chumaceras para el libre movimiento entre los dos elementos. En la Figura A11 se muestra el eslabón con sus componentes

mientras que en la Figura A12 se encuentra una foto del eslabón 1 en su fase de ensamble.

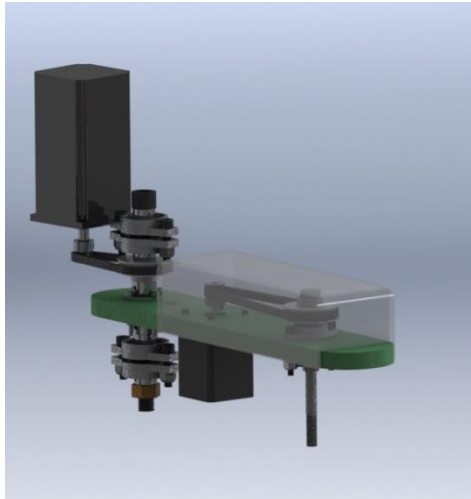


Figura A11. Eslabón 1.



Figura A12. Foto del eslabón 1.

4.4. Eslabón 2

La segunda parte que conforma el brazo robótico es el eslabón 2 con el propósito de obtener un segundo grado de libertad con una movilidad de 180 grados, en este sistema cuenta con una tolva elaborada en una impresora 3D; la finalidad de esta pieza es proteger el láser instalado en este eslabón del polvo y posibles golpes. En la Figura A13 se muestra un renderizado del eslabón 2 con sus elementos y en la Figura A14 se visualiza una foto con la instalación previa de un

par de acopladores que forman parte de este sistema; éstos cumplen con la función de transmitir el movimiento del eje al eslabón 2.

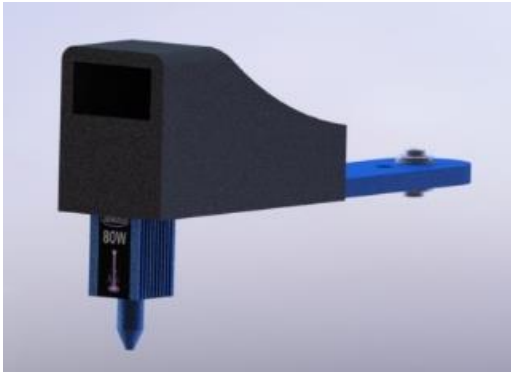


Figura A13. Eslabón 2.



Figura A14. Eslabón 2 con acopladores instalados.

4.5. LÁSER

En el extremo final del eslabón 2 se encuentra instalado un láser tipo semiconductor de 80 watts de potencia; éste se activa con un puente H IBT_2 alimentado por una batería de 12 volts. Este láser es el encargado de eliminar la maleza. En la Figura A15 se muestra una foto del láser tipo semiconductor.



Figura A15. Láser.

La instalación del láser fue realizada por medio de un soporte de aluminio tipo “L” y tornillos de 3mm de diámetro por 4mm de longitud, cada tornillo lleva una rondana de presión asegurando un mejor ajuste (A16). En la Figura A17 se presenta una foto del soporte para láser y en la Figura A18 se muestra una foto de la instalación de los elementos.



Figura A16. Tornillos M3.

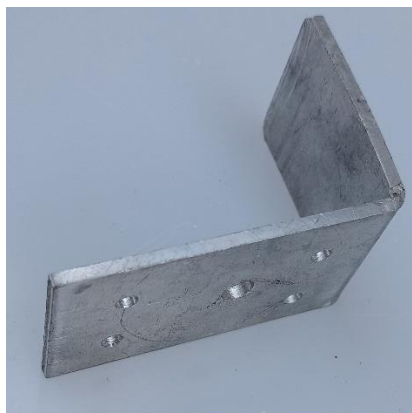


Figura A17. Soporte.



Figura A18. Soporte instalado en el láser.

Una vez que cada eslabón está completo con sus respectivos elementos, se procedió a unir los componentes utilizando un tornillo de acero inoxidable de 8 mm de diámetro, que cumple dos funciones cruciales. La primera es servir como eje y transmitir el movimiento desde un motor a pasos NEMA 17. La segunda, y principal función, es asegurar una conexión más estable y fuerte. Unidos todos los elementos, se forma una cadena cinemática de 50 cm de longitud, diseñada para cubrir surcos con una separación de 80 cm. La Figura A19 muestra una fotografía del ensamble entre dos eslabones, mientras que la Figura A20 presenta el ensamble final de todos los elementos.



Figura A19. Unión de eslabones.



Figura A20. Ensamble brazo SCARA.

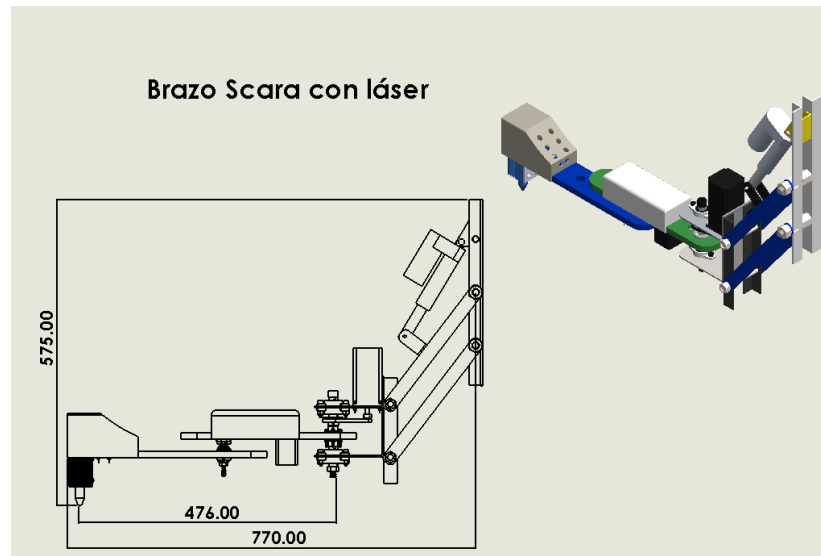


Figura A21. Dimensiones principales del brazo SCARA.

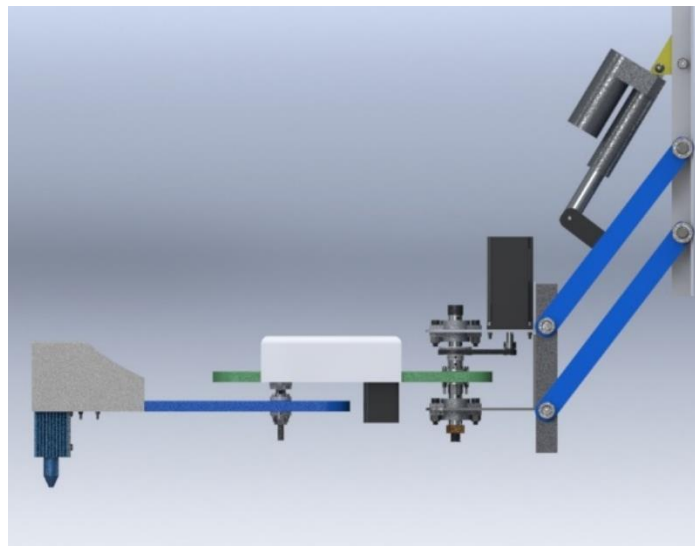


Figura A22. Posición paralela al suelo.

4.6. Cuadros de datos recolectados para obtención de resultados

Cuadro A6. Datos primer prueba

No	Objetivo		Reales		Diferencia de mediciones		Error medio Vectorial	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-0.369	0.067	-0.334	0.079	0.035	0.012	0.027	0.029
2	-0.374	0.132	-0.338	0.144	0.036	0.012		
3	-0.323	0.08	-0.285	0.099	0.038	0.019		
4	-0.319	0.16	-0.274	0.183	0.045	0.023		
5	-0.307	0.262	-0.282	0.264	0.025	0.002		
6	-0.404	-0.042	-0.371	-0.03	0.033	0.012		
7	-0.483	0.203	-0.47	0.265	0.013	0.062		
8	-0.356	0.071	-0.325	0.099	0.031	0.028		
9	-0.427	0.032	-0.452	0.042	-0.025	0.01		
10	-0.455	0.215	-0.421	0.338	0.034	0.123		
11	-0.309	0.103	-0.272	0.128	0.037	0.017		

Cuadro A7. Datos de segunda prueba.

No.	Objetivo (m)		Reales (m)		Diferencia de mediciones (m)		Error medio Vectorial (m)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-0.367	0.099	-0.366	0.099	0.001	0	0.00153	-0.0016
2	-0.315	0.299	-0.309	0.304	0.006	-0.005		
3	-0.345	0.211	-0.343	0.219	0.002	-0.008		
4	-0.291	0.225	-0.288	0.226	0.003	-0.001		
5	-0.323	0.224	-0.321	0.225	0.002	-0.001		

6	-	0.2	-0.29	0.202	0.002	-
	0.292					0.002
7	-	0.075	-	0.078	0.001	-
	0.375		0.374			0.003
8	-	0.179	-	0.181	-	-
	0.352		0.353		0.001	0.002
9	-	0.118	-	0.121	0.001	-
	0.352		0.351			0.003
10	-	0.183	-	0.186	0	-
	0.305		0.305			0.003
11	-0.31	0.239	-	0.244	0.001	-
			0.309			0.005
12	-	0.139	-	0.144	0.006	-
	0.451		0.445			0.005
13	-	0.122	-	0.124	0	-
	0.331		0.331			0.002
14	-	0.169	-	0.169	-	0
	0.349		0.352		0.003	
15	-	0.104	-	0.104	0.002	0
	0.401		0.399			
16	-	0.087	-	0.09	0	-
	0.414		0.414			0.003
17	-	0.179	-	0.18	-	-
	0.397		0.398		0.001	0.001
18	-	0.147	-	0.149	0	-
	0.393		0.393			0.002
19	-	0.189	-	0.189	0.002	0
	0.386		0.384			
20	-	0.122	-	0.121	-	0.001
	0.337		0.338		0.001	
21	-	0.193	-	0.193	0.001	0
	0.339		0.338			
22	-	0.263	-	0.263	0.007	0
	0.399		0.392			
23	-	0.09	-	0.087	0	0.003
	0.354		0.354			
24	-	0.141	-	0.141	0	0
	0.372		0.372			
25	-0.41	0.089	-	0.087	0.002	0.002
			0.408			
26	-	0.028	-0.47	0.03	0.008	-
	0.478					0.002
27	-	0.176	-	0.178	0.006	-
	0.442		0.436			0.002
28	-	0.165	-	0.163	-	0.002
	0.359		0.361		0.002	

29	-	0.216	-	0.219	0.001	-
	0.317		0.316			0.003
30	-	0.111	-	0.114	0	-
	0.393		0.393			0.003

Cuadro A8. Datos de tercera prueba

No	Objetivo (m)		Reales (m)		Diferencia (m)		Error medio Vectorial (m)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-	0.164	-	0.164	0	0	-	-
	0.312		0.312				0.000251	0.00026
2	-	0.049	-	0.049	-0.001	0		
	0.346		0.347					
3	-	0.184	-	0.181	0	-0.003		
	0.347		0.347					
4	-	0.209	-	0.208	0	-0.001		
	0.382		0.382					
5	-	0.122	-	0.12	0	-0.002		
	0.351		0.351					
6	-0.37	0.228	-	0.23	0.0002	0.002		
			0.369					
7	-	0.158	-	0.158	0	0		
	0.378		0.378					
8	-	0.076	-	0.0775	0	0.0015		
	0.401		0.401					
9	-	0.134	-	0.133	0.001	-0.001		
	0.406		0.405					
10	-	0.077	-	0.075	0.001	-0.002		
	0.428		0.427					
11	-	0.218	-	0.2175	-0.002	-		
	0.387		0.389			0.0005		
12	-	0.165	-	0.164	-0.001	-0.001		
	0.376		0.377					
13	-	0.172	-	0.172	-0.002	0		
	0.333		0.335					
14	-	0.132	-	0.134	0	0.002		
	0.327		0.327					
15	-	0.164	-0.34	0.164	-0.001	0		
	0.339							
16	-	0.072	-	0.072	-0.001	0		
	0.343		0.344					
17	-0.35	0.177	-	0.176	-0.001	-0.001		
			0.351					
18	-	0.121	-	0.123	0	0.002		
	0.368		0.368					

19	-	0.195	-	0.194	0	-0.001
	0.394		0.394			
20	-	0.183	-	0.1825	0	-
	0.394		0.394			0.0005
21	-	0.244	-	0.246	0.001	0.002
	0.406		0.405			
22	-	0.21	-	0.208	0	-0.002
	0.373		0.373			
23	-0.36	0.059	-0.36	0.056	0	-0.003
24	-	0.113	-	0.11	-0.002	-0.003
	0.382		0.384			
25	-0.42	0.203	-	0.203	-0.003	0
			0.423			
26	-	0.155	-	0.152	0.001	-0.003
	0.403		0.402			
27	-	0.157	-	0.156	0	-0.001
	0.397		0.397			
28	-	0.194	-	0.195	-0.001	0.001
	0.335		0.336			
29	-0.37	0.176	-0.37	0.173	0	-0.003
30	-	0.066	-	0.067	0	0.001
	0.361		0.361			
31	-	0.083	-	0.084	0	0.001
	0.407		0.407			
32	-	0.057	-	0.054	0	-0.003
	0.424		0.424			
33	-	0.075	-	0.08	0.001	0.005
	0.424		0.423			
34	-0.37	0.048	-	0.046	0.001	-0.002
			0.369			
35	-	0.117	-	0.116	0	-0.001
	0.407		0.407			
36	-	0.107	-	0.106	0	-0.001
	0.371		0.371			
37	-	0.117	-	0.115	0	-0.002
	0.368		0.368			
38	-0.33	0.202	-	0.203	-0.001	0.001
			0.331			
39	-	0.285	-	0.282	-0.001	-0.003
	0.323		0.324			
40	-	0.253	-	0.253	-0.001	0
	0.291		0.292			
41	-	0.19	-	0.191	0.001	0.001
	0.313		0.312			
42	-	0.167	-	0.17	0	0.003
	0.326		0.326			

43	-	0.112	-	0.112	0.001	0
	0.344		0.343			
44	-	0.063	-	0.064	0	0.001
	0.374		0.374			
45	-	0.197	-	0.197	0	0
	0.346		0.346			
46	-0.37	0.196	-	0.197	-0.002	0.001
			0.372			
47	-	0.264	-	0.266	0	0.002
	0.326		0.326			
48	-	0.196	-	0.196	-0.001	0
	0.331		0.332			
49	-	0.125	-	0.126	0	0.001
	0.374		0.374			
50	-	0.243	-	0.241	0	-0.002
	0.354		0.354			
51	-	0.136	-	0.137	0	0.001
	0.366		0.366			