

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**Diseño de un sistema automático de control mecánico de
malezas en cultivos de algodón**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que
presenta el bachiller:**

Joel Emmanuel Benavides Hatakeda

ASESOR: Elizabeth Villota Cerna, PhD

Lima, Abril del 2016



© 2015, Joel Benavides Hatakeda

Se autoriza la reproducción total o parcial,
con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.

RESUMEN

El algodón peruano (también llamado “oro blanco”) es considerado como uno de los mejores materiales en la industria textil del mundo. No obstante, en las últimas décadas, nuestro país ha enfrentado una pérdida de competitividad frente a variedades extranjeras y frente a otros cultivos. Una de las razones de este hecho es la escasa tecnología que existe debido a la poca inversión en estas prácticas agrícolas, específicamente en el control de malezas, las cuales pueden afectar hasta en un 90% la cosecha cuando no se efectúa ningún tipo de medida preventiva o correctiva. Dicha tarea es usualmente realizada a través de una labor manual o de un control químico. El primero exige mucho esfuerzo por parte de los trabajadores y demanda, asimismo, mucho tiempo. El segundo es perjudicial para el medio ambiente y requiere que su uso se realice por expertos, aumentando su costo.

Es por ello que en el presente trabajo se planteó el diseño de un sistema mecatrónico con autonomía energética capaz de realizar la tarea de remoción mecánica de malezas en un cultivo con 120 cm de distancia entre surcos y 40 cm de distancia entre plantas. El sistema cuenta con un móvil que se moviliza a través de los surcos del cultivo siguiendo una trayectoria definida por el usuario. El control de seguimiento se logra haciendo uso de un sistema de localización y navegación basado en datos de sensores tipo IMU y GPS. El móvil cuenta con un sistema de suspensión basado en un mecanismo diferencial que permite que las ruedas estén siempre en contacto con el suelo. Finalmente, la detección de plantas, que acciona el removedor de malezas, se logra procesando información de una cámara.

La metodología del diseño empezó con la delimitación del trabajo y búsqueda de información para poder desarrollar conceptos de solución y elegir el vehículo óptimo. Se definieron las funciones, las lógicas de control, los sensores y actuadores y la estructura mecánica para poder cumplir con los requerimientos propuestos. Como resultado, se tiene un móvil con un costo bajo (tomando en cuenta que actualmente no existen productos comerciales similares), que utiliza los componentes necesarios para darle una autonomía energética al sistema de aproximadamente 2 horas. Las estrategias de control planteadas permiten que el móvil se traslade por el cultivo sin la necesidad de la supervisión o intervención de un operador.

TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Título : Diseño de un sistema automático de control mecánico de malezas en cultivos de algodón

Asesor : Elizabeth Villota Cerna, PhD

Alumno : Joel Emmanuel Benavides Hatakeda

Código : 20110927

Tema N° : # 113

Fecha : 11/11/2015



Descripción y Objetivos

Una de las actividades tradicionales y más importantes del Perú es la agricultura. A través de ella se ha logrado exportar diversos productos, ya sean alimenticios o industriales, lo que genera un impacto beneficioso para la economía del país. Entre los productos industriales, se encuentra el algodón (también llamado “oro blanco”), considerado como uno de los mejores materiales en la industria textil del mundo. No obstante, en las últimas décadas, nuestro país ha enfrentado una pérdida de competitividad frente a variedades extranjeras y frente a otros cultivos, lo que se refleja en una presencia no significativa de nuestra fibra en el mercado internacional. Una de las razones de este hecho es la escasa tecnología que existe debido a la poca inversión en estas prácticas agrícolas, específicamente en el control de malezas, las cuales pueden afectar hasta en un 90% la cosecha cuando no se efectúa ningún tipo de medida preventiva o correctiva.

En el presente trabajo se plantea el diseño de un sistema automático capaz de realizar la tarea de remoción mecánica de malezas, siendo este último método una alternativa ecológica y eficiente al permitir al agricultor mayor rapidez en el manejo de plantas indeseables. Para esto, se cuenta con un vehículo que se moviliza a través de los surcos de un cultivo de algodón, sin dañar a las plantas, siguiendo una trayectoria definida por el usuario y con autonomía energética. El control de seguimiento se logra haciendo uso de un sistema de localización y navegación basado en datos de sensores tipo IMU y GPS. Asimismo, el móvil cuenta con un sistema de suspensión basado en un mecanismo diferencial que permite que las ruedas estén siempre en contacto con el suelo. En cuanto a la detección de plantas, que sirve para accionar el removedor de malezas, ésta se logra procesando información de una cámara.

El contenido de la tesis se inicia con la delimitación del trabajo y búsqueda de información (estado del arte). Luego continúa con el diseño conceptual del proyecto, definición de las funciones a realizar y desarrollo de un concepto óptimo. Posteriormente se explica el diseño electrónico, sensores y actuadores a utilizar, así como diagramas de flujo; el diseño mecánico, planos y simulaciones del móvil; y diseño de control, detección de plantas y sistema de navegación. Finalmente se indica el costo de fabricación de un prototipo. Las conclusiones resultantes de la tesis son también mostradas.





A mis padres, Oscar y Elsa, y a mis hermanos, Oscar y Meylen, que en todo momento siempre me han apoyado en cualquier objetivo que me he propuesto.

AGRADECIMIENTOS

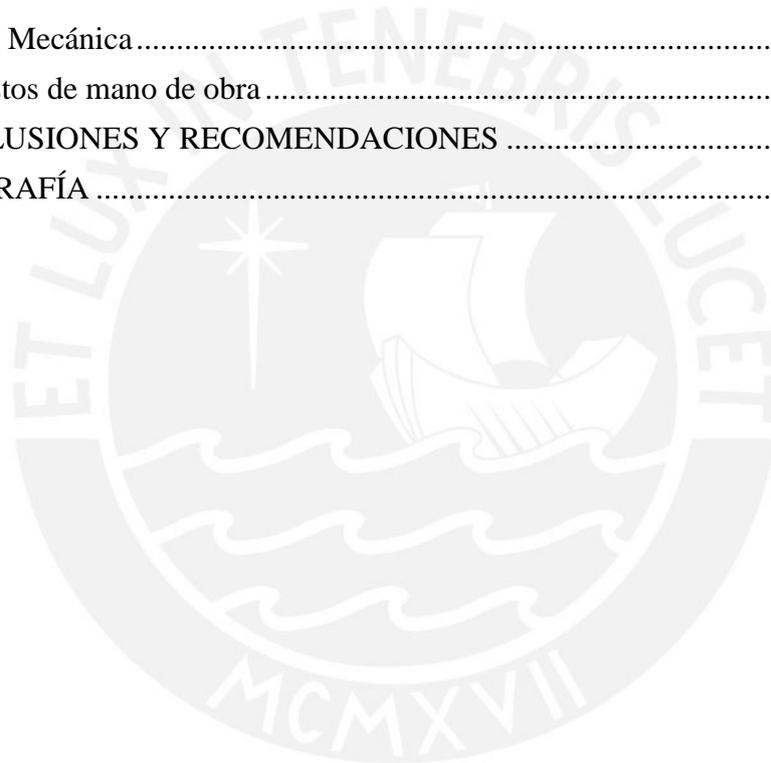
Agradezco a mi asesora, la profesora Elizabeth Villota, por todos los consejos y revisiones que contribuyeron al desarrollo de la tesis; al profesor Salomón Helfgott, por la ayuda en cuanto a la delimitación del tema y por los consejos sobre el control de malezas; al profesor César Lengua, por la colaboración en la revisión de los planos mecánicos del diseño; y a mis compañeros tesisistas, por el apoyo mutuo durante el desarrollo de la tesis.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática	1
1.2. Descripción del trabajo	3
1.2.1. Objetivos	3
1.2.2. Alcances (limitaciones).....	3
1.3. Antecedentes	4
1.3.1. Tecnológico	4
1.3.2. Técnico.....	5
2. DISEÑO CONCEPTUAL	9
2.1. Requerimientos de diseño	9
2.1.1. Requerimientos físicos – mecánicos	9
2.1.2. Requerimientos electrónicos y de control.....	10
2.2. Estructura de funciones.....	11
2.3. Matriz morfológica	14
2.4. Conceptos de solución	16
2.4.1. Concepto de solución 1:.....	16
2.4.2. Concepto de solución 2:.....	17
2.4.3. Concepto de solución 3:.....	18
2.5. Evaluación técnico – económica.....	19
2.5.1. Evaluación técnica	19
2.5.2. Evaluación económica	20
3. DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	21
3.1. Diseño electrónico	21
3.1.1. Diagrama de bloques	21
3.1.2. Componentes electrónicos y otros	22
3.1.3. Diagramas esquemáticos.....	35
3.2. Diseño mecánico.....	38
3.2.1. Planos de ensamble.....	38
3.2.2. Planos de los subsistemas	40
3.2.3. Planos de despiece	43

3.2.4. Simulaciones para verificaciones mecánicas	46
3.3. Diseño de control	55
3.3.1. Diagramas de flujo.....	55
3.3.2. Arquitectura de control	59
3.3.3. Sistema de localización.....	60
3.3.4. Sistema de navegación.....	61
3.3.5. Detección de plantas	63
3.4. Integración del sistema mecatrónico.....	66
4. COSTOS	67
4.1. Costos por componentes	67
4.1.1. Electrónica	67
4.1.2. Mecánica.....	68
4.2. Costos de mano de obra	69
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Matriz morfológica	14
Tabla 3.1. Requerimientos del sensor inercial.....	22
Tabla 3.2. Sensores IMU.....	23
Tabla 3.3. Características adicionales del sensor IMU.....	23
Tabla 3.4. Requerimientos del GPS.....	24
Tabla 3.5. Sensores GPS.....	24
Tabla 3.6. Características adicionales del módulo GPS.....	24
Tabla 3.7. Requerimientos de la cámara.....	25
Tabla 3.8. Cámaras consideradas.....	25
Tabla 3.9. Características adicionales de la cámara.....	26
Tabla 3.10. Requerimientos del motor DC.....	26
Tabla 3.11. Alternativas de motores DC.....	26
Tabla 3.12. Características adicionales del motor DC-100 rpm.....	27
Tabla 3.13. Requerimientos del servomotor.....	27
Tabla 3.14. Alternativas de servomotores.....	27
Tabla 3.15. Características adicionales del servomotor Hitec.....	28
Tabla 3.16. Requerimientos del servomotor.....	28
Tabla 3.17. Alternativas de servomotores.....	28
Tabla 3.18. Características adicionales del servomotor.....	29
Tabla 3.19. Requerimientos del microcontrolador encargado de controlar los actuadores y sensores.....	29
Tabla 3.20. Alternativas de microcontroladores.....	29
Tabla 3.21. Características del microcontrolador.....	30
Tabla 3.22. Requerimientos de los procesadores de video.....	30
Tabla 3.23. Alternativas de procesadores de video.....	30
Tabla 3.24. Características adicionales del PandaBoard.....	31
Tabla 3.25. Alternativas de controladores para los motores DC.....	31
Tabla 3.26. Características adicionales del driver.....	32
Tabla 3.27. Alternativas de módulos de comunicación.....	33
Tabla 3.28. Características adicionales del módulo XBee.....	33
Tabla 3.29. Características de la batería.....	34
Tabla 3.30. Características de la batería.....	34
Tabla 3.31. Alternativas de reguladores.....	35
Tabla 3.32. Lista de componentes principales.....	39
Tabla 3.33. Características de la pieza.....	46
Tabla 3.34. Resultados.....	47
Tabla 3.35. Características de la pieza.....	49
Tabla 3.36. Resultados.....	49
Tabla 3.37. Características de la pieza.....	51
Tabla 3.38. Resultados.....	52
Tabla 4.1. Tabla de componentes electrónicos importados.....	67
Tabla 4.2. Tabla de componentes mecánicos importados.....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Evolución en la superficie cosechada (ha) de algodón en los años 2000-2010.	2
Figura 1.2. Plataforma del robot agrícola.	4
Figura 1.3. Vista lateral del sistema.	5
Figura 1.4. Modelo de la plataforma. La localización del vehículo se logra a través de un sistema GPS, un giroscopio, encoders y una cámara de guía.	6
Figura 1.5. Plataforma robótica en operación.	6
Figura 1.6. Vehículo autónomo en un campo de coliflor.	7
Figura 1.7. Plataforma del robot agrícola.	8
Figura 1.8. E-Bot en el campo de prueba.	8
Figura 2.1. Interacción del usuario con el sistema.	11
Figura 2.2. Bloque de sensores del móvil.	12
Figura 2.3. Bloque de actuadores del móvil.	12
Figura 2.4. Bloque de mecánica del móvil.	13
Figura 2.5. Bloque de control del móvil.	13
Figura 2.6. Concepto de solución 1.	16
Figura 2.7. Concepto de solución 2.	17
Figura 2.8. Concepto de solución 3.	18
Figura 2.9. Obtención del concepto óptimo (C.S.1).	20
Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema mecatrónico.	21
Figura 3.2. Adafruit 9-DOF IMU Breakout.	23
Figura 3.3. Receptor GPS EM-506.	24
Figura 3.4. Logitech HD Pro Webcam C920.	25
Figura 3.5. Motor DC (“37D mm gearmotor with encoder”).	27
Figura 3.6. Servomotor Hitec HS-5485HB.	28
Figura 3.7. Dynamixel AX-12A.	29
Figura 3.8. Arduino Mega 2560.	30
Figura 3.9. PandaBoard.	31
Figura 3.10. Driver Dual MC33926.	32
Figura 3.11. Circuito integrado.	32
Figura 3.12. XBee Pro Series 1.	33
Figura 3.13. Batería Turnigy 5000 mAh 3S 20C Lipo Pack.	34
Figura 3.14. Batería MultiStar LiHV High Capacity 6S 12000 mAh.	34
Figura 3.15. Regulador de voltaje a 3.3 V.	35
Figura 3.16. Regulador de voltaje ajustable a 6 V.	35
Figura 3.17. Conexión de los Dynamixel con el micro-controlador.	36
Figura 3.18. Conexión del micro-controlador con los motores DC.	37
Figura 3.19. Conexión del módulo XBee con el Arduino Mega 2560.	37
Figura 3.20. Vista isométrica del prototipo (sin cubierta).	38
Figura 3.21. Vista horizontal del prototipo.	39
Figura 3.22. Vista frontal del prototipo.	39
Figura 3.23. Subsistema rueda.	40
Figura 3.24. Subsistema removedor.	41
Figura 3.25. Subsistema chasis con mecanismo diferencial.	42
Figura 3.26. Chasis.	43
Figura 3.27. Desarrollo del chasis (placa doblada).	44
Figura 3.28. Placa de unión rueda con servo.	45
Figura 3.29. Placa soporte de disco removedor.	45

Figura 3.30. Fuerzas aplicadas en la pieza.....	46
Figura 3.31. Análisis por Von Mises.	47
Figura 3.32. Análisis de desplazamiento.	48
Figura 3.33. Factor de seguridad.	48
Figura 3.34. Fuerzas aplicadas en la pieza.....	49
Figura 3.35. Análisis por Von Mises.	50
Figura 3.36. Análisis de desplazamiento.	50
Figura 3.37. Factor de seguridad.	51
Figura 3.38. Fuerzas aplicadas en la pieza.....	52
Figura 3.39. Análisis por Von Mises.	53
Figura 3.40. Análisis de desplazamiento.	53
Figura 3.41. Factor de seguridad.	54
Figura 3.42. Diagrama de flujo general.	55
Figura 3.43. Función “Iniciar Sistema”.	56
Figura 3.44. Función “Iniciar Recorrido”.	57
Figura 3.45. Función “Estimar Posición”.	58
Figura 3.46. Función “Determinar Error”.	58
Figura 3.47. Función “Corregir Error”.	59
Figura 3.48. Arquitectura de control.....	59
Figura 3.49. El control consiste en minimizar las distancias d_f y d_r independientemente, cuyos signos indican en qué lado del camino se encuentran los puntos de dirección. x , y , θ representan la posición del vehículo. γ_f , γ_r son las direcciones de los dos puntos a seguir. ICR representa el centro instantáneo de rotación del móvil.	62
Figura 3.50. Zona de trabajo de los servomotores.	63
Figura 3.51. Estructura de la detección de plantas.	63
Figura 3.52. Patrón de posición de las plantas en el cultivo.	64
Figura 3.53. Coordenadas de la cámara sujeta al móvil.....	65
Figura 3.54. Sistema mecatrónico.....	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

La incidencia nociva de las plantas indeseables, también conocidas como malezas o malas hierbas, es uno de los mayores obstáculos a la producción agrícola del mundo, y el Perú no es la excepción. Se llama maleza a toda planta que bajo determinadas condiciones causan daño económico y social al agricultor. Las malezas compiten con los cultivos por los nutrientes, el agua y la luz; sus hojas y raíces liberan sustancias que resultan ser tóxicas a los cultivos; crean un hábitat favorable para la proliferación de otras plagas (artrópodos, ácaros, patógenos y otros); e interfieren con el proceso normal de cosecha, contaminando la producción obtenida [4].

De acuerdo a reportes internacionales [1], las pérdidas en agricultura se presentan en 9.6% por insectos, 13.6% por erosión, 16.7% por enfermedades en animales, 26.3% por enfermedades en plantas y 33.8% por malezas. En ciertos productos, por ejemplo cultivos de algodón, las malas hierbas pueden afectar la cosecha hasta en un 90% [3] cuando no se efectuó ningún tipo de medida preventiva o correctiva, por lo que el control de las malezas forma parte de la tarea necesaria para la producción eficiente y económica de los cultivos.

Una práctica común es el control químico de las malezas. Se realiza con el empleo de herbicidas, que son sustancias químicas, los cuales, bien aplicadas, pueden ser un arma efectiva. No obstante, su uso debe estar precedido de una capacitación a los técnicos y a los agricultores sobre manipulación segura y uso correcto de las mismas. Además, el uso de herbicidas químicos origina importantes cambios en la flora de plantas indeseables en las áreas agrícolas, tanto en especies que predominan sobre el resto de la vegetación, como en biotipos de otras especies resistentes a los herbicidas químicos en uso. Cuando un herbicida activo en el suelo es utilizado repetidamente por años, también es conveniente conocer sus posibles residuos en el suelo, su lixiviación, y en caso de ésta última ser alta, su presencia en las aguas subterráneas [4].

Otras alternativas al uso de herbicidas son el control manual y mecánico. Sin embargo, en el primero, el agricultor y su familia suelen consumir más de un 40% de su tiempo en faenas de desyerbes manuales para combatir las malezas, lo cual limita la productividad agrícola. También se ha comprobado que los desyerbes manuales no siempre brindan el mejor beneficio al agricultor, ya que con mucha frecuencia se ejecutan fuera del denominado período crítico de malezas, o sea cuando gran parte del daño de las plantas indeseables ya se presentó [4]. Es por eso que la opción del control mecánico resalta como una alternativa ecológica, al no utilizar ningún tipo de químicos que dañen o modifiquen el medio ambiente, y eficiente, al permitir al agricultor mayor rapidez en el manejo de malezas.

En el Perú, los productos agrícolas en los que más se usa el control por herbicida son el arroz, la caña de azúcar, el maíz y el algodón, siendo el cultivo de este último una importante alternativa para el desarrollo de la agricultura peruana. El algodón peruano es considerado uno de los mejores materiales en la industria textil del mundo. Su fina calidad y especial textura ha originado que sea una de las materias primas más exportadas del Perú en el siglo XX y que cuente con altos niveles de ingresos de divisas. Su importancia socioeconómica se traduce en el número de mano de obra que genera en el proceso de

producción e industrialización de la fibra (hilados, tejidos, teñidos, confecciones y comercialización) [2].

No obstante, el panorama favorable para el crecimiento del cultivo del algodón en el Perú fue tornándose paulatinamente adverso, sobre todo en las dos últimas décadas (ver figura 1.1). Actualmente el algodón peruano enfrenta una pérdida de competitividad frente a variedades extranjeras y frente a otros cultivos, que se refleja en una presencia no significativa de nuestra fibra en el mercado internacional (el Perú al año 2000 tuvo una participación en la producción mundial de algodón rama de sólo 0.3% y una participación de 0.02% en las exportaciones globales en el año 1999). Este deficiente desempeño del algodón, se ha reflejado en la disminución de cosecha en diferentes sectores del Perú [8].

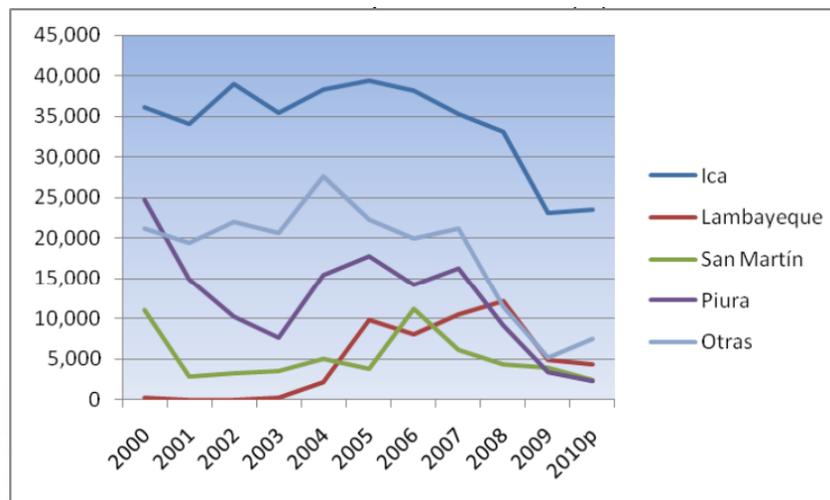


Figura 1.1. Evolución en la superficie cosechada (ha) de algodón en los años 2000-2010.
Fuente: MINAG – OEE. Elaboración MINAG – DIA

El funcionario del Ministerio de Agricultura, Augusto Aponte, explicó que esta situación es consecuencia de la escasa tecnología en los valles por la poca inversión en las prácticas agrícolas, en maquinaria, abonos y capacitación. Asimismo expresó que, por otro lado, la falta de calidad de la fibra, los bajos rendimientos y precios ocasiona el poco interés de los productores en el cuidado del algodón desde la fase de la cosecha [5]. Por todo esto, plantearse el objetivo de incrementar la productividad y mantener la calidad de fibra a través de tecnología es importante para que este material por excelencia (conocido como “oro blanco”) tenga mayor participación internacional. El presente trabajo se centra en resolver el problema de malezas en los cultivos de esta planta, presentando una alternativa diferente al control químico o manual.

1.2. Descripción del trabajo

A continuación, se presentará el objetivo general y los objetivos específicos que el sistema debe cumplir. Asimismo, se presentan las restricciones o limitaciones que tendrá el diseño del sistema.

1.2.1. Objetivos

1.2.1.1. Objetivo general

Diseñar un sistema automático que pueda realizar un control mecánico de malezas en un cultivo de algodón sin que éste se vea perjudicado para su futura cosecha.

1.2.1.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica (estado del arte) que permita definir los requerimientos del diseño del sistema y todo lo concerniente al diseño conceptual.
- Desarrollar un concepto de solución óptimo considerando los requerimientos, funciones, aspectos mecánicos, eléctricos y de control definidos.
- Realizar el diseño electrónico pertinente a través de la selección de componentes electrónicos que permitan sensar la posición del móvil y tener una autonomía energética, así como la definición de las estrategias de control necesarias.
- Diseñar el sistema mecánico que permita recorrer el cultivo de algodón y remover las malezas, sin que se presenten volcaduras o desviaciones en la trayectoria (sistema de suspensión).
- Contar con un sistema de detección de las plantas del cultivo para poder accionar el removedor de malezas.
- Definir un sistema de navegación que permita al móvil desplazarse por el cultivo de forma automática.
- Estimar un costo de fabricación de un prototipo a partir de los componentes seleccionados.

1.2.2. Alcances (limitaciones)

El presente informe se enfoca exclusivamente en el diseño, mas no en la fabricación de un prototipo, por lo que la comprobación de qué tan preciso es el sistema de navegación y detección de plantas no será presentado. Lo que se va a plantear será solo lógicas de control que permitan alcanzar los objetivos propuestos.

Asimismo, el diseño del sistema se centra en cultivos de algodón que tengan 120 cm de distancia entre surcos y 40 cm de distancia entre plantas, por lo que otro tipo de configuraciones no serán tomadas en cuenta. Finalmente, la forma en que el usuario interactúa con el sistema (ingreso/recepción de datos) no se trabajará, solo describirá las funciones generales que involucren dicha interacción.

1.3. Antecedentes

En cuanto a trabajos similares anteriores, construidos o diseñados, se buscó información a través de patentes, productos, prototipos (agrupados como información tecnológica) y artículos técnicos, tesis (agrupados como información técnica).

1.3.1. Tecnológico

1.3.1.1. Robot para control de malezas de alta eficiencia [6]

(“High-efficiency weeding robot”)

El sistema, apropiado para plantaciones de maíz o algodón, está compuesto por un pequeño carro direccional (plataforma, ver figura 1.2), una cámara de navegación automática e identificación de malezas y un sistema de control; asimismo, presenta un dispositivo de extracción de malezas mecánico (a través de cuchillas accionadas eléctricamente) entre plantas, acoplado debajo de la plataforma del vehículo, y entre surcos, acoplado al costado del vehículo. Dichos mecanismos se accionan a través de cilindros y vástagos horizontales y verticales ubicados en la parte posterior del vehículo, para las malezas que se encuentran entre surcos, y en la parte frontal, para las malezas entre plantas. La invención puede eliminar las malas hierbas en las líneas y entre líneas con una alta velocidad de trabajo y alta eficiencia.

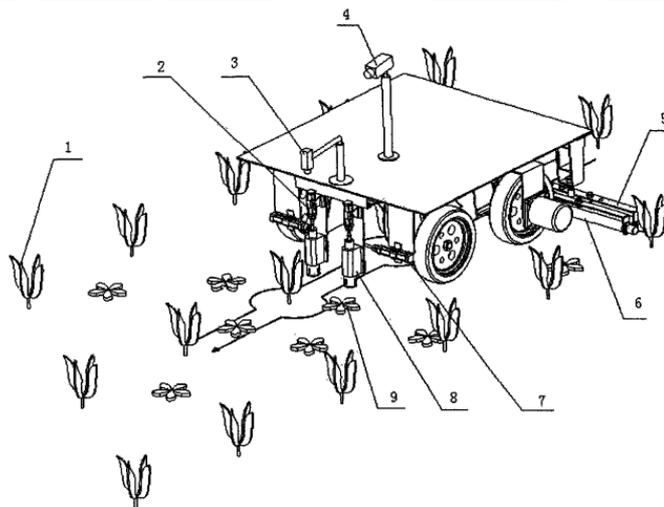


Figura 1.2. Plataforma del robot agrícola.

Fuente: [6].

1.3.1.2. Extractora eléctrica de maleza a control remoto [7]

(“Remote control electric weed extractor”)

El sistema (figura 1.3) consiste en una plataforma con una rueda delantera y dos ruedas traseras que se fijan en el marco. La rueda delantera está conectada con un controlador de dirección para recibir una señal de control remoto, las ruedas traseras son accionadas con una batería; el marco está acoplado de forma móvil con una rueda con cuchillas, la cual a su vez está conectada a las ruedas traseras, que servirá para la extracción de la maleza. El vehículo es controlado por un operador a través de un mando a distancia. La intensidad de trabajo es baja, la eficiencia es alta, el consumo de energía es bajo y el costo es bajo.

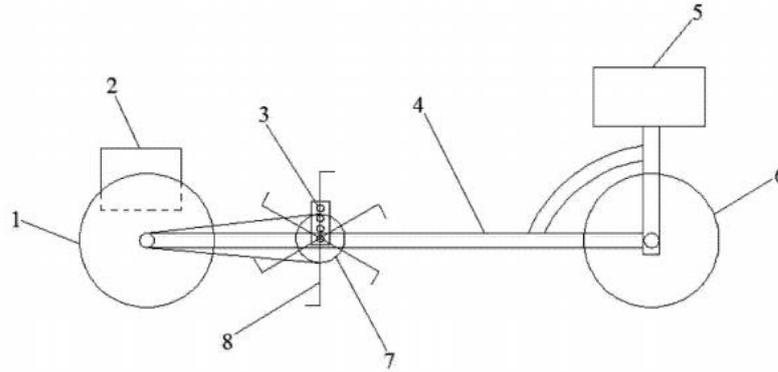


Figura 1.3. Vista lateral del sistema.
Fuente: [7].

1.3.2. Técnico

1.3.2.1. Plataforma robótica agrícola con cuatro ruedas direccionales para la detección de malezas [10]

(“Agricultural Robotic Platform with Four Wheel Steering for Weed Detection”)

El vehículo (cuyo chasis de aluminio presenta dimensiones de 1.2 m x 1 m, ver figura 1.4) está adaptado para operar en cultivos de hileras de 0.25 m x 0.5 m y está equipado con cámaras para guiarse por el cultivo y para detectar la maleza a una velocidad en el rango de 2 a 6 km/h. Tiene un enfoque modular a través de cuatro módulos de ruedas idénticos, permitiendo direccionamiento (logrado por un servomotor montado encima de la rueda) y propulsión de la plataforma (mediante motores eléctricos sin escobillas con su respectivo amplificador y micro-controlador), creando así un mecanismo de 2 grados de libertad. El resultado es una movilidad mejorada que permite desplazamiento paralelo del vehículo durante giros. El control de la plataforma se proporciona a través de una electrónica y un sistema de control basado en controladores embebidos y protocolos de comunicación estándar (CAN, RS232). La computadora de la plataforma se encarga del control del vehículo en tiempo real, la integración de los sensores y la comunicación. El diseño del controlador obliga a la parte delantera y trasera del vehículo a seguir una ruta predeterminada y permite que el vehículo pueda mantener una orientación fija con respecto a la trayectoria.

En base a experimentos (ver figura 1.5), los cuales consistían en caminos predefinidos a través de líneas rectas, se mostró una desviación estándar de 1 a 1.6 cm a una velocidad frontal de 0.2 m/s. Para un camino similar, a una velocidad de 1.6 m/s el error se incrementó y se encontraba en un rango de 7.9 a 10.7 cm, lo cual muestra las limitaciones del sistema en cuanto a respuesta en el tiempo.

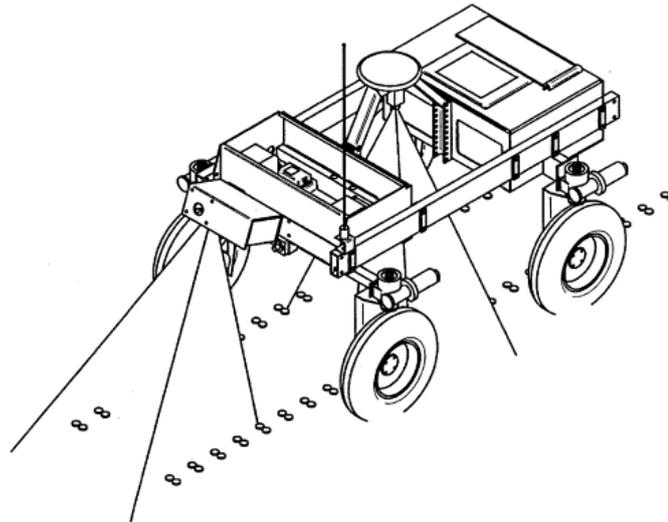


Figura 1.4. Modelo de la plataforma. La localización del vehículo se logra a través de un sistema GPS, un giroscopio, encoders y una cámara de guía.

Fuente: [10].



Figura 1.5. Plataforma robótica en operación.

Fuente: [10]

1.3.2.2. Seguimiento de precisión de un vehículo agrícola autónomo de visión guiada [11]

(“Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle”)

El vehículo en cuestión está basado en un vehículo portaherramientas comercial destinado a ser utilizado en parcelas hortícolas, fue adaptado para tener un control automático (ver figura 1.6). Un motor a gasolina se encarga del movimiento de las dos ruedas delanteras a través de unidades de transmisión hidrostática independientes, mientras que el control automático se realiza con servomotores que establecen las relaciones de transmisión de las dos unidades hidrostáticas. Encoders incrementales rotacionales permiten una medición odométrica del movimiento de las ruedas con una resolución de 1792 cuentas por revolución. El sistema de ordenador a bordo se compone de una 486 PC portátil con una interfaz a una red “transputer”. La PC ofrece la interfaz de usuario. Todas las funciones de control y de detección (incluyendo el análisis de imágenes) son llevadas a cabo utilizando la Inmos T800 transputers/T805. Las velocidades de las ruedas son medidas usando cuentas odométricas y son mantenidas en determinados valores con un control de retroalimentación.

Dos fuentes de información son usadas para lograr un estimado de la posición del vehículo. El sistema de análisis de imagen provee una medida de la distancia y dirección relativa hacia los surcos. Los odómetros, usados en conjunto con un modelo cinemático

del vehículo, dan una medida del movimiento de éste. Estas dos fuentes de información son combinadas usando un Filtro Kalman Extendido (EKF). Se hizo uso de la transformación de Hough como método robusto para encontrar la estructura del surco en la imagen, integrando información de anteriores surcos analizados con los nuevos e incrementando así la robustez del sistema. A través de experimentos realizados a una velocidad de 0.7 m/s y en distintos escenarios, se mostraron desviaciones estándar de 19, 24, 16 y 20 mm.



Figura 1.6. Vehículo autónomo en un campo de coliflor.
Fuente: [11].

1.3.2.3. Robot agrícola autónomo y su orientación de fila [9] (“Autonomous Agricultural Robot and Its Row Guidance”)

El diseño de este sistema se realizó en base al concepto de una arquitectura abierta, lo que significa un diseño del sistema que permite reemplazar diferentes actuadores que se adapten a distintas tareas (control químico de malezas usando pesticidas y labores de riego usando agua, control mecánico de malezas, cosecha del producto, etc.) e incrementar o reducir el número de sensores a usarse. En la figura 1.7, se muestra la plataforma del robot agrícola en base al diseño mencionado anteriormente. Tiene una longitud de 1200 mm de largo, 600 mm de ancho, una altura de 550 mm medida desde el piso hasta el marco, una distancia de 510 mm entre las dos ruedas frontales y 740 mm entre la rueda frontal y posterior.

La fuente de alimentación, la PC portátil, los controladores de los motores y otros dispositivos de control están ubicados en la cabina frontal junto con una cámara CCD que servirá como guía de camino para el vehículo. La cabina posterior funciona como un pequeño almacén para pesticidas, fertilizantes, insecticidas y agua. Para la movilización del sistema, se incluyen motores DC, un mecanismo de engranaje con sprocket y las ruedas. Finalmente, los encoders se encargan de medir la velocidad de las ruedas.

Experimentos, a una velocidad de 0.2 m/s y en un campo controlado con plantas de similar forma y tamaño, plantadas a lo largo de surcos, mostraron una precisión de ± 35 mm.

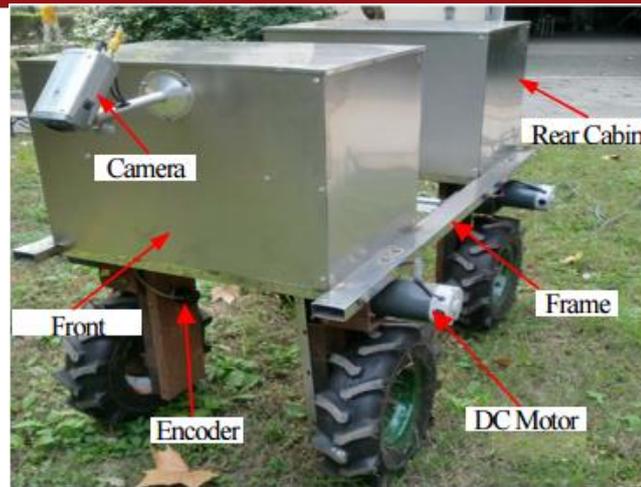


Figura 1.7. Plataforma del robot agrícola.

Fuente: [9].

1.3.2.4. Solar E-Bot para agricultura [12] ("Solar E-Bot for Agriculture")

El E-Bot (figura 1.8) consiste principalmente en una unidad RF, una unidad para la aplicación de pesticidas (pulverizador), una unidad para la extracción de malezas, un sistema de ruedas y una transmisión inalámbrica de video.

El robot presenta motores DC de 12 V, 200 rpm (los cuales pueden entregar un torque de 32 kg.cm gracias a su caja reductora), un motor DC de 9 V y 500 rpm para las cuchillas que se encargan del control de las malezas y una cámara que transmite el video en un rango de 100 a 150 cm de distancia. El sistema opera en base a energía solar, la cual se almacena en una batería DC. Todas las unidades y procesos ya mencionados son controlados por un microcontrolador MSP 430, además, el robot puede funcionar en dos modos: manual y automático.

No obstante, el sistema solo puede ser usado en determinados campos donde cada planta esté separada por una distancia de 30 cm (plantación de tomates, berenjenas, etc.).



Figura 1.8. E-Bot en el campo de prueba.

Fuente: [12].

2. DISEÑO CONCEPTUAL

2.1. Requerimientos de diseño

En esta parte se presenta la lista de exigencias (ver Anexo A1) que se deben cumplir para poder satisfacer los objetivos trazados. Para esto, se dividieron dichos requerimientos en dos grupos (físico-mecánico y electrónico-control). Asimismo, se presentan deseos (representados con el símbolo “D”) para que el sistema mecatrónico pueda perfeccionar su funcionamiento; sin embargo, estos no son obligatorios en el presente trabajo.

2.1.1. Requerimientos físicos – mecánicos

En este grupo, se toman en cuenta requerimientos relacionados con la función principal, geometría, cinemática, seguridad, fabricación, ensamblaje, fuerzas, operación, mantenimiento y ergonomía del sistema.

- El sistema realizará un control mecánico de malezas entre plantas sin que éstas se vean perjudicadas por el móvil o sus actuadores mecánicos y sin la ayuda de un operario.
- El sistema tendrá un ancho máximo de 1.20 m (distancia entre surcos en los cultivos), un largo máximo de 1.00 m (distancia prudencial para la distribución de actuadores y sensores) y una altura mínima de 0.15 m desde el suelo hasta la plataforma (distancia prudencial para la protección del cultivo).
- Los actuadores mecánicos de remoción a usarse tendrán la facilidad de trabajar para distintas distancias entre plantas (operación flexible). (“D”)
- El sistema se moverá a lo largo de cada surco a una velocidad promedio máxima de 2 km/h. Asimismo, deberá pesar como máximo 20 kg, por lo que el material de la plataforma deberá ser de aluminio.
- Las piezas mecánicas necesarias en el diseño deberán ser adquiridas a través del mercado local para evitar costos de importación. (“D”)
- Los actuadores mecánicos (especialmente si son cuchillas) tendrán que estar aislados del usuario por seguridad. (“D”)
- El sistema podrá ser desmontado en 2 módulos para facilitar su transporte hacia distintos cultivos. (“D”)
- El dispositivo deberá ser capaz de completar su recorrido en cultivos de 5 hectáreas (superficie cosechada mayormente por agricultores independientes) antes de necesitar cualquier tipo de mantenimiento. (“D”)
- El sistema deberá poder movilizarse por el cultivo sin importar el tipo de obstáculos (piedras) que pueda encontrarse en el camino. (“D”)
- El diseño del móvil deberá ser estético. Asimismo, bastará tan solo una persona para transportar el móvil. (“D”)

2.1.2. Requerimientos electrónicos y de control

En este grupo se toman en cuenta requerimientos relacionados con la energía, electrónica y control del sistema.

- El sistema deberá contar con una fuente de energía móvil (baterías recargables mediante una típica conexión doméstica) que permita que la operación del dispositivo sea autónoma y dure hasta 1.5 horas (equivalente a realizar la remoción de malezas en un área de 0.35 ha). Además, dicha fuente deberá tener un circuito de protección.
- La fuente móvil de energía se recargará a través de energía solar para evitar que el sistema tenga paradas cada cierto tiempo. (“D”)
- Los circuitos de potencia y de control deberán estar aislados como medida de seguridad. (“D”)
- El móvil deberá ser capaz de seguir una trayectoria definida por las hileras del cultivo, así como deberá poseer una lógica de control que evite que el sistema se salga de su camino.
- El móvil tendrá un sistema de alarma de emergencia en caso las plantas del cultivo se encuentren en peligro. (“D”)
- El dispositivo deberá poder recorrer todo el cultivo sin la necesidad de un operario (deberá poder girar paralelamente para poder acceder al siguiente surco).
- Se usará un sistema GPS para mantener un constante control de la posición exacta del vehículo en todo momento.
- El sistema deberá poder reconocer las plantas del cultivo a través de un sensor de visión (cámara) y diferenciarlas de las malezas.
- El usuario podrá interactuar con el presente sistema en todo momento para monitorear su trayectoria o definir nuevas. (“D”)

2.2. Estructura de funciones

Conforme a lo establecido anteriormente sobre los requerimientos del sistema a diseñar, se describe a continuación la estructura de funciones (ver Anexo A2 para mayores detalles) que realizará el móvil para poder cumplir con las exigencias formuladas.

Cada etapa a describir es energizada por baterías a través de un regulador de voltaje por lo que no será necesario mostrar dicha entrada de energía en cada gráfico.

Interacción con el usuario/comunicación

Debido a que el móvil debe recorrer cualquier tipo de cultivo de algodón, el usuario tendrá la posibilidad de determinar la trayectoria que el móvil debe seguir, por lo que el recorrido predefinido (el cual se mostrará en una pantalla en una estación cerca al cultivo) quedará guardado en la memoria del sistema. Asimismo, el usuario podrá visualizar el recorrido real que seguirá el móvil y, de esa manera, comparar la trayectoria definida con la trayectoria realizada (ver figura 2.1). Cabe resaltar que, como ya se mencionó anteriormente, estas funciones son solo descritas, mas no incluidas en el diseño final (no se desarrolló la inclusión de una interfaz).

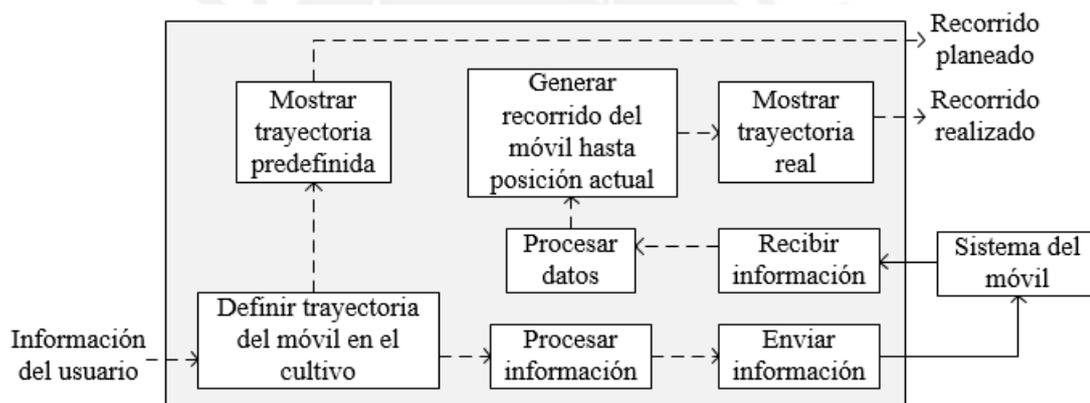


Figura 2.1. Interacción del usuario con el sistema.
Fuente: Elaboración propia.

Sensores

Como se puede apreciar en la figura 2.2, los principales sensores del sistema constan de un sensor de posición inercial y uno de posición global del vehículo. Ambos sensores captan la información del bloque de mecánica (estructura/carcaza del móvil) para poder tener una posición referencial del móvil, esta información se envía al bloque de control para determinar la posición real del móvil y realizar las acciones de control pertinentes. También existe otro sensor encargado de detectar la presencia de plantas en los surcos del cultivo. Dicha información sirve para que en el bloque de control se pueda desarrollar la lógica de accionamiento de los removedores mecánicos.

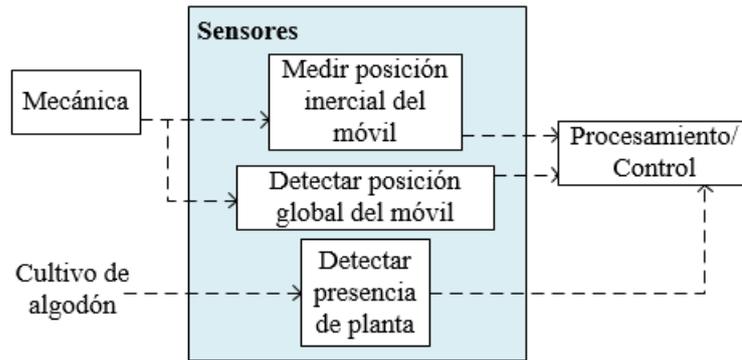


Figura 2.2. Bloque de sensores del móvil.
Fuente: Elaboración propia.

Actuadores

La parte de actuadores, como se puede observar en la figura 2.3, se divide en dos grupos. Uno se relaciona con todos los actuadores involucrados en el desplazamiento del móvil, con previa acción de control por parte del bloque de Procesamiento/Control. El otro involucra los actuadores relacionados con la acción de remoción de maleza, también con previa acción de control por parte del bloque de Procesamiento/Control. Ambos grupos repercuten en el bloque de mecánica (referidos a la parte de transmisión de potencia y movimiento).

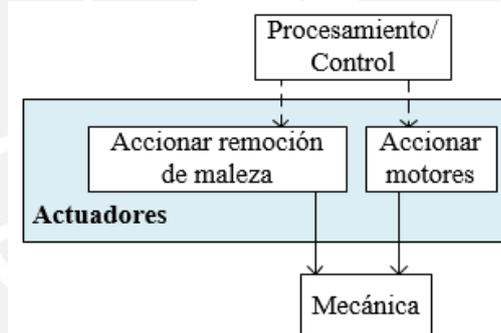


Figura 2.3. Bloque de actuadores del móvil.
Fuente: Elaboración propia.

Mecánica

En el bloque de mecánica (ver figura 2.4), se considera la función de soporte de todos los otros bloques. Asimismo, se toma en cuenta como entrada al sistema la maleza del cultivo y como salida la maleza removida, así como ruido y vibraciones generados por todos los movimientos realizados. El bloque de actuadores permite accionar (a través de una transmisión de potencia mecánica) las funciones respectivas al movimiento del móvil (“Desplazar plataforma del móvil”) y al removedor de malezas (“Desplegar removedor de maleza” y “Remover maleza”).

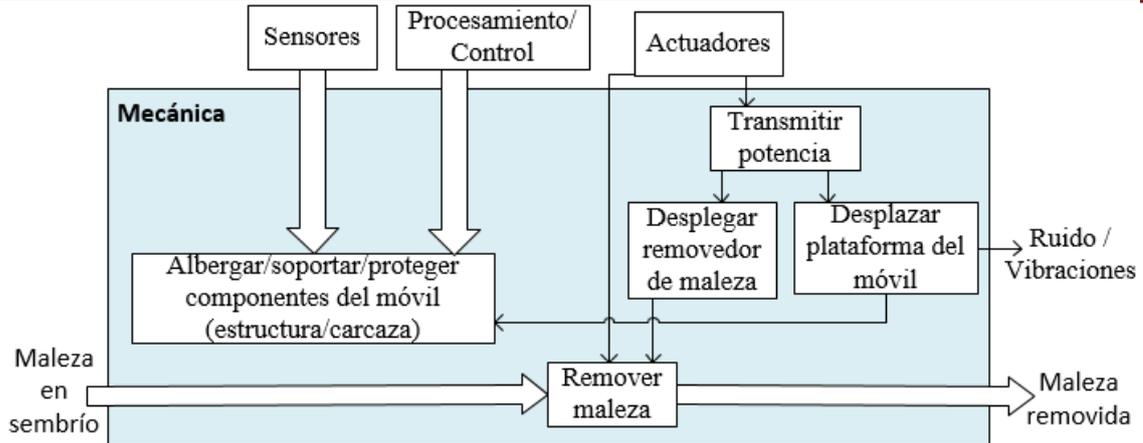


Figura 2.4. Bloque de mecánica del móvil.
Fuente: Elaboración propia.

Control

Con la información proveniente del usuario respecto a qué trayectoria seguir, se da inicio al sistema y a la lógica de seguimiento de la trayectoria. Para evitar cualquier desviación, se controla en todo momento la posición global e inercial del móvil (información proveniente de los sensores), lo que permitirá tener su localización real y corregir sus movimientos con el algoritmo de control requerido. Dichas funciones son necesarias antes de que se mande la orden de accionar los motores del sistema y así desplazar el móvil y desplegar su dispositivo removedor de maleza (ver figura 2.5). Cabe resaltar que cuando se estima la posición real del móvil, se envía esta información al usuario a través del bloque de comunicación para que éste pueda visualizar la trayectoria real del móvil.

Durante el camino, también se tiene un control de la ubicación de las plantas (algodón) del cultivo. En base a esta información, la cual se determina con la localización real del móvil, se puede calcular el accionamiento del dispositivo removedor de malezas y así no afectar al cultivo.

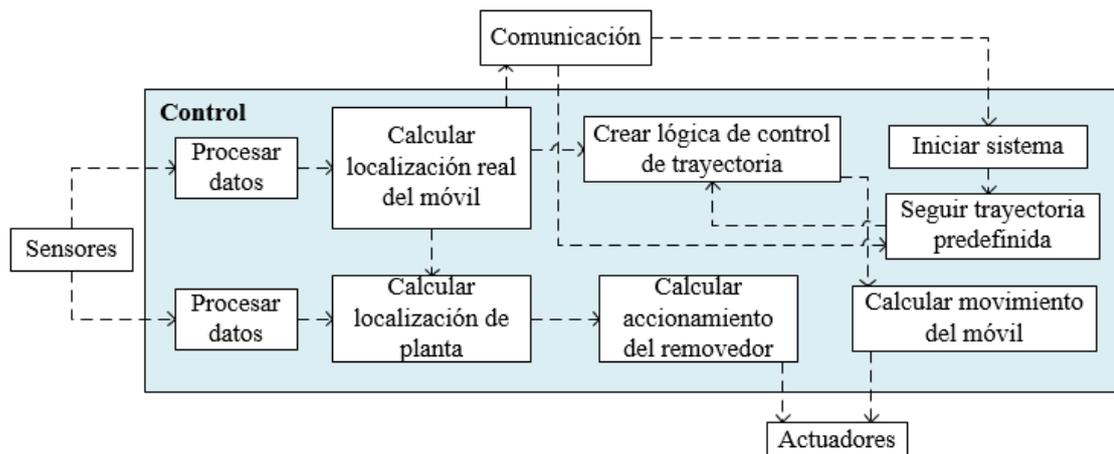
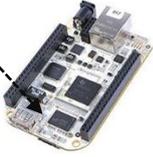


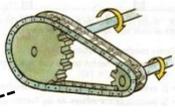
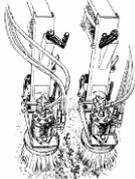
Figura 2.5. Bloque de control del móvil.
Fuente: Elaboración propia.

2.3. Matriz morfológica

Se desarrollaron distintas alternativas para las funciones principales del sistema mecatrónico vistas en la estructura de funciones; de esta manera, se elaboraron 3 secuencias o rutas provenientes de las opciones disponibles.

Tabla 2.1. Matriz morfológica

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Iniciar sistema	Interruptor 	Control remoto 	Inicio por PC 	
Detectar posición global	Receptor GPS 	Sensor ultrasónico 	Localización vía GSM 	
Detectar posición inercial	Magnetómetro 	Sensor de inercia 6 grados de libertad 	IMU 	
Detectar planta	Sensor ultrasónico 	Sensor de color 	Cámara RGBD 	
Controlador	Arduino 	Raspberry Pi 	BeagleBone Black 	
Controlador (adicional en caso se use cámara)	PandaBoard 	TI AM3517 	PC 	

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Accionar movimientos	Motor DC 	Servomotor 	Motor a pasos 	Actuador lineal 
Transmitir Potencia	Transmisión por engranaje 	Tornillo sin fin 	Transmisión por cadena 	
Desplazar plataforma del vehículo	Movimiento tipo oruga 	Ruedas 		
Desplegar actuadores	Biela manivela corredera 	Guías lineales 	Piñón cremallera 	Mecanismo de plegado 
Remover maleza	Tipo "finger" 	Tipo torsión 	Tipo escobilla 	Tipo cuchilla 
Concepto Solución 1				
Concepto Solución 2				
Concepto Solución 3				

2.4. Conceptos de solución

Con los resultados de la matriz morfológica, se desarrollaron 3 conceptos de solución que serán comparados posteriormente para poder elegir uno y optimizarlo para cumplir con los requerimientos propuestos.

2.4.1. Concepto de solución 1:

Esta solución (ver figura 2.6) se basa en un sistema de suspensión tipo mecanismo diferencial [17], el cual permite que el móvil siempre esté en contacto con el terreno sin importar que haya pequeños obstáculos; el mecanismo utiliza engranajes cónicos diferenciales para lograr dicho resultado. La estructura del móvil tiene la forma de un paralelepípedo, lo cual hace que cuente con espacio para una cámara en la parte frontal, la cual apunta siempre hacia abajo para que detecte las plantas del surco. En la parte posterior (debajo de la estructura), se encuentra un mecanismo de plegado que consta de bielas accionadas por servomotores, dichas bielas a su vez soportan el dispositivo removedor de maleza (en este caso, el “finger weeder”) que tiene la posibilidad de elevarse convenientemente cuando se acerque a una planta. En cuanto al desplazamiento, la plataforma se sostiene sobre cuatro ruedas, las cuales son capaces de moverse independientemente de las otras gracias a que cada una tiene acoplado dos motores (mediante transmisión por engranajes), uno para movimientos lineales y el otro para movimientos rotacionales. El sistema de navegación consiste en un receptor GPS y, como método secundario, un módulo IMU (9 grados de libertad) para detectar su posición inercial. Finalmente, el inicio del móvil se logra a través de un interruptor.

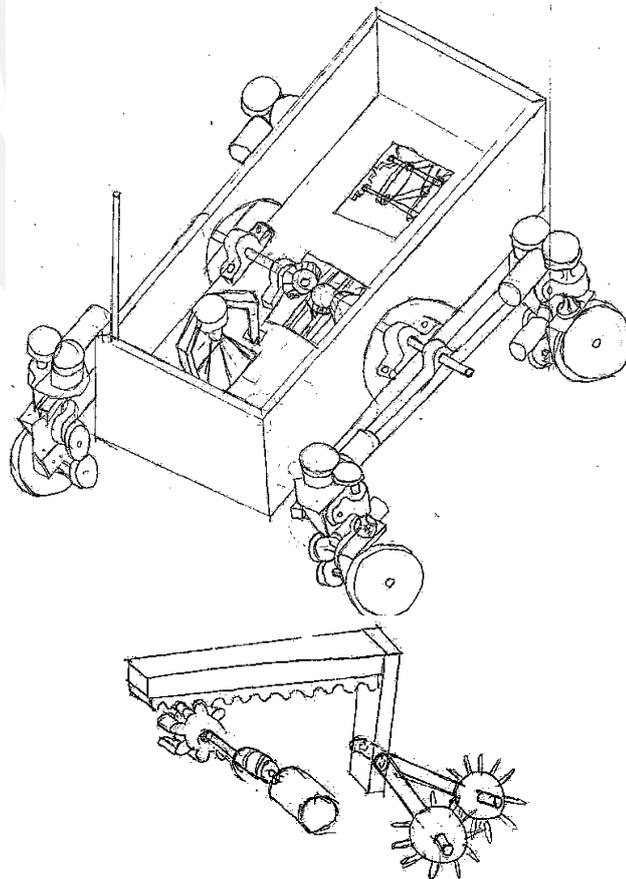


Figura 2.6. Concepto de solución 1.
Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Concepto de solución 2:

Esta solución (ver figura 2.7) consiste en un sistema de suspensión tipo “3 puntos”, que asegura que el móvil se encuentra en contacto con el suelo. La estructura consiste en un marco rectangular, el cual cuenta con un compartimiento en la parte frontal y otro en la parte posterior para almacenar las baterías, dispositivos de control y navegación, etc. En el medio, se encuentra un sensor de ultrasonido apuntando hacia abajo, detectando en todo momento cualquier variación sustancial de distancia hacia el terreno (presencia de una planta). Asimismo, también presenta el removedor de maleza (en base a cepillos giratorios) en la parte posterior, pero no tiene un sistema de plegado que le permita protegerse con la estructura; no obstante, consta de guías lineales para que pueda desplazarse perpendicularmente a los surcos del cultivo y, de esa manera, evitar las plantas que aparezcan (algodón). Su desplazamiento también consiste en cuatro ruedas independientes con dos motores cada una; sin embargo, el módulo es más compacto a comparación con el anterior concepto de solución. El sistema de navegación consiste en sensores de ultrasonido en cada rueda que miden la distancia hacia los surcos que se encuentran al costado y de esa forma permanecer siempre en el centro del surco. También tiene como dispositivo secundario un sensor de posición inercial de 6 grados de libertad (acelerómetro y giroscopio). El inicio del sistema se da a través de un sistema de control remoto.

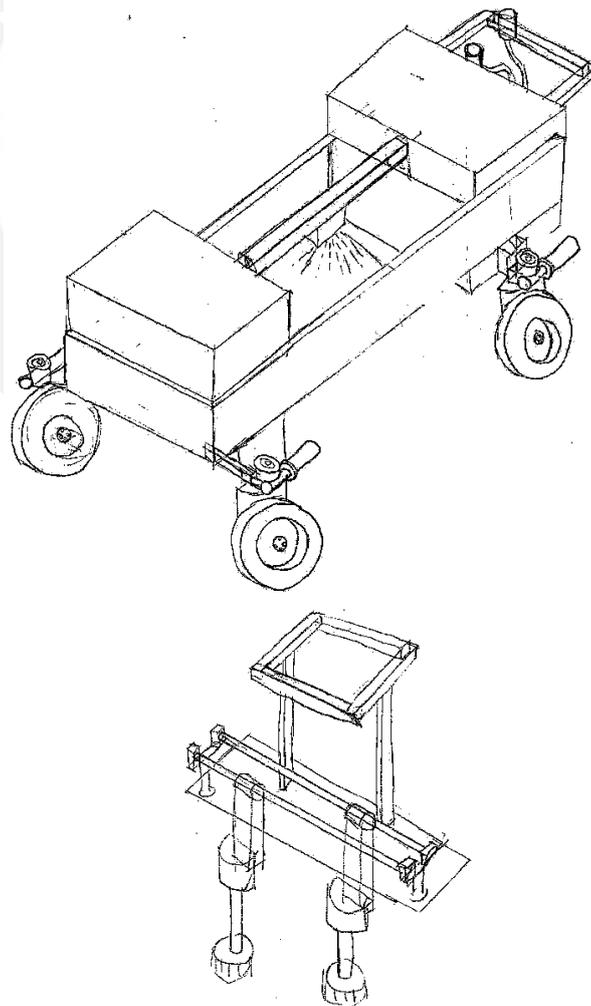


Figura 2.7. Concepto de solución 2.
Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Concepto de solución 3:

La última opción (ver figura 2.8) no presenta un sistema de suspensión que se asegure que esté siempre en contacto con el terreno y no sufra volcaduras. Su desplazamiento se logra gracias un mecanismo tipo “oruga”. Presenta una plataforma rectangular sobre la que descansan todos los dispositivos. Tiene un sensor de color apuntando hacia abajo para detectar las plantas en el surco. El removedor de maleza (se usan cuchillas) tiene un sistema de plegado convencional. La navegación se logra mediante una triangulación de señales provenientes de estaciones alrededor del cultivo (localización vía GSM) que se acompañan de un magnetómetro (3 grados de libertad) como método secundario. Por último, el inicio del sistema se logra a través de una computadora vía conexión inalámbrica.

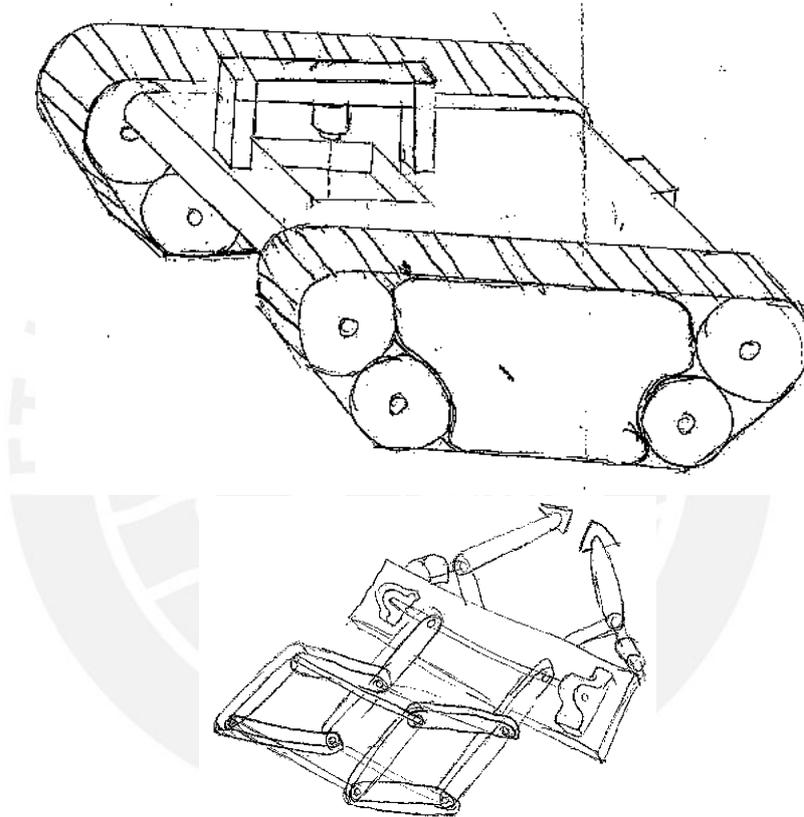


Figura 2.8. Concepto de solución 3.
Fuente: Elaboración propia.

2.5. Evaluación técnico – económica

Esta evaluación se realiza bajo la recomendación VDI 2225, donde se califican los conceptos bajo ciertos criterios, tanto técnicos como económicos (para más detalles ver Anexo A3).

2.5.1. Evaluación técnica

Los criterios para el análisis son los siguientes:

- Función Principal
- Operación
- Control
- Energía
- Seguridad

El valor de importancia para los criterios va desde 1 hasta 4 (siendo el más importante el 4 y 1 el menos importante). Así resultan las siguientes valoraciones:

- La función principal (todo el funcionamiento del móvil), la operación (autonomía del vehículo y desplazamiento sobre el terreno) y la seguridad (del sistema, con el usuario y con el cultivo) son los criterios principales, por lo que tienen un peso de 4.
- El control (recorrido paralelo a los surcos, navegación) tiene un peso de 3.
- Por último, la energía (fuente de alimentación) tiene peso 2.

Para calificar el cumplimiento de cada criterio, se tomarán niveles de 0 a 4 (siendo 4 el cumplimiento ideal, 3 un buen cumplimiento, 2 uno suficiente, 1 uno apenas aceptable y 0 uno que no satisface).

Concepto de solución 1:

El primer concepto cumple idealmente con la función principal, realiza todas las funciones requeridas.

Tiene un buen cumplimiento en cuanto a la seguridad, el usuario y cultivo no se ven afectados en el funcionamiento; el control, presenta un buen sistema de navegación, y su operación, el sistema es automático y puede desplazarse en terrenos irregulares.

Finalmente, satisface de manera suficiente la energía, utiliza varios motores para el movimiento de ruedas.

Concepto de solución 2:

El segundo concepto cumple idealmente con la función principal, realiza todas las funciones requeridas.

Tiene un buen cumplimiento en cuanto al control, presenta un buen sistema de navegación, y su operación, el sistema es automático y puede desplazarse en terrenos irregulares, aunque con un sistema de suspensión ligeramente inferior al primer concepto. Finalmente, satisface de manera suficiente la energía, utiliza varios motores para el movimiento de ruedas, y la seguridad, el removedor de maleza se encuentra expuesto al usuario en todo momento.

Concepto de solución 3:

El tercer concepto tiene un buen cumplimiento con la función principal, realiza todas las funciones requeridas pero de manera menos eficiente a comparación con los otros

conceptos; la energía, no utiliza muchos motores debido a que su movimiento es más simples, y la seguridad, el removedor de maleza se encuentra escondido inicialmente debajo del sistema. Finalmente, satisface de manera suficiente el control, el sistema navegación carece de un método secundario de control con varios grados de libertad, y la operación, el sistema es automático pero no puede desplazarse en terrenos irregulares sin que haya peligro de volcadura o similares accidentes.

2.5.2. Evaluación económica

El criterio para el análisis es el siguiente:

- Costo

Valorando el costo, resulta con un peso de 3.

Para calificar el cumplimiento de cada criterio, se tomarán niveles de 0 a 4 (siendo 4 el cumplimiento ideal, 3 un buen cumplimiento, 2 uno suficiente, 1 uno apenas aceptable y 0 uno que no satisface).

Concepto de solución 1:

El primer concepto tiene un buen cumplimiento con el costo debido a que presenta un mecanismo de desplazamiento simple en cuanto a movimiento y a su sistema de suspensión.

Concepto de solución 2:

El segundo concepto también tiene un buen cumplimiento con el costo debido a que presenta un mecanismo de desplazamiento simple en cuanto a movimiento y a su sistema de suspensión.

Concepto de solución 3:

El tercer concepto cumple de manera suficiente con el costo debido a que necesita varios complementos para su movimiento tipo oruga y necesita de una plataforma especial que no esté tan cerca del cultivo en crecimiento.

En la figura 2.9, se observan los resultados obtenidos del análisis. Solo se consideran las soluciones con valores mayores a 0.6 (ver Anexos A3 para ver la obtención de dichos valores), es decir, soluciones que no se encuentren en el recuadro amarillo. La solución más cercana a la recta trazada será la solución óptima debido a que presenta un mejor balance a nivel técnico y económico.

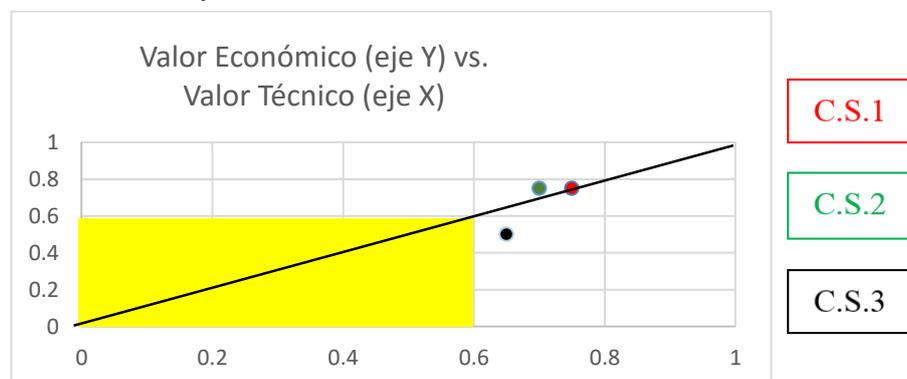


Figura 2.9. Obtención del concepto óptimo (C.S.1).
Fuente: Elaboración propia.

3. DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

3.1. Diseño electrónico

3.1.1. Diagrama de bloques

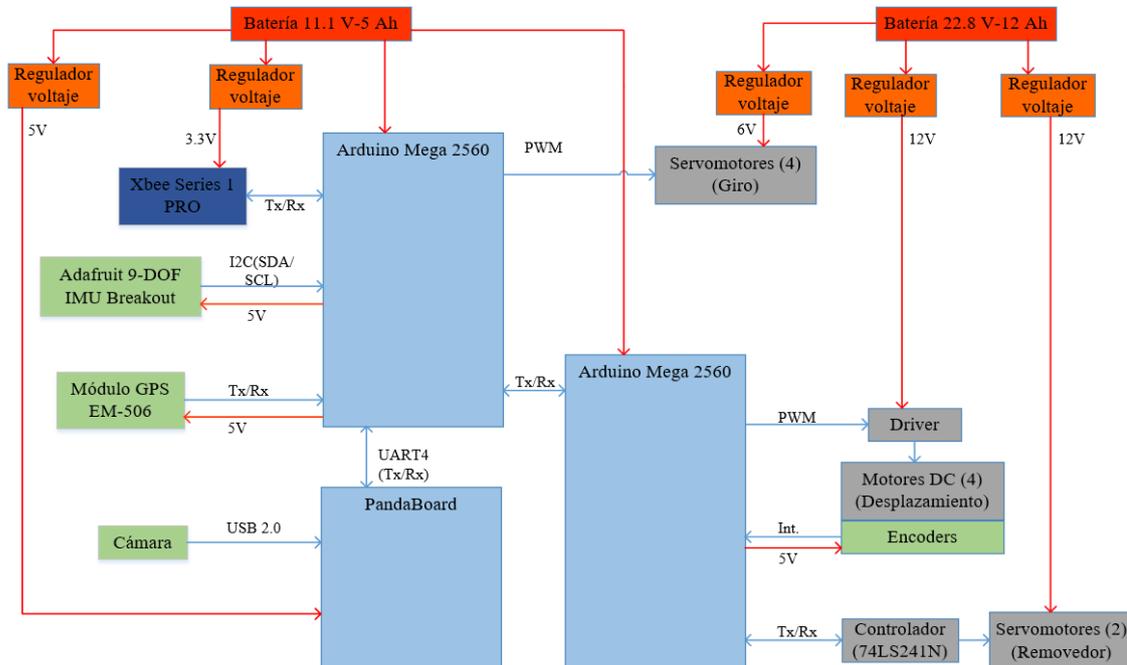


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema mecatrónico.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.1 se aprecia la conexión de los diferentes componentes electrónicos. Se tiene a disposición dos Arduino Mega (si bien uno tiene la cantidad suficiente de pines para manejar los diferentes componentes electrónicos, se escoge dos para disminuir la carga de procesamiento). Uno se encarga de la comunicación con los sensores de posición (GPS e IMU), con el módulo XBee, con el PandaBoard y con los servomotores de giro (se referirá a este microcontrolador como Arduino Mega 1). El otro (Arduino Mega 2) se comunica con los motores DC con sus respectivos encoders y con los servomotores del removedor. Ambos microcontroladores se comunican a través de pines Tx y Rx.

El sensor IMU se comunica usando el protocolo I^2C con los pines SDA y SCL del Arduino Mega 1, el módulo GPS se comunica con pines Tx y Rx. Esta interacción se da para que el microcontrolador pueda realizar la lógica de control de estimación de posición real del vehículo y, de esta manera, enviar las señales de control respectivas a los servomotores de giro (con señales PWM) y órdenes al Arduino Mega 2 para que este realice la lógica de control en los motores DC. El control de los motores se realiza a través de un driver, en el caso de los servomotores del removedor se realiza a través de un circuito integrado.

En cuanto a la alimentación, la batería de 11.1 V alimenta a los Arduinos directamente, al PandaBoard (5 V) y al módulo XBee (3.3 V) a través de reguladores de voltaje. Los sensores IMU y GPS son alimentados por el mismo Arduino Mega 1 (5 V) ya que no requieren mucha corriente. La batería de 22.8 V alimenta a los actuadores a través de

reguladores de voltaje (motores DC -12 V, servomotores del removedor - 12 V, servomotores de giro - 6V).

La cámara de detección de plantas se comunica con el procesador de imágenes (PandaBoard) a través de una entrada USB 2.0 (que también sirve como alimentación) y este a su vez se comunica con el Arduino Mega 1 a través de pines Tx y Rx para indicarle la presencia del cultivo en el surco. Posteriormente, el Arduino Mega 2 recibirá la orden de realizar la lógica de control para accionar el removedor de malezas (a través de servomotores).

Finalmente, el módulo XBee se conecta con el Arduino Mega 1 para encargarse del envío y recepción de datos entre el usuario y el vehículo.

3.1.2. Componentes electrónicos y otros

El criterio de selección de todos los componentes mostrados en el diagrama de bloques del diseño electrónico se explicará a continuación. Asimismo, se presentarán otras alternativas que se tomaron en cuenta pero que no cumplieron con los requerimientos propuestos.

Sensores:

Unidad de medición inercial (IMU)

Una unidad de medición inercial es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. En este caso, el sensor cuenta también con un compás para detectar las fuerzas magnéticas del campo en el que se encuentra.

La IMU es el componente principal de sistemas de navegación inercial usados en aviones, naves espaciales, buques y misiles guiados entre otros. En este uso, los datos recolectados por los sensores de una IMU permiten a un computador seguir la posición del aparato, usando un método conocido como navegación por estima. Es por eso que se decidió usarlo para el sistema de navegación del móvil. En la tabla 3.1 se presenta los requerimientos de este sensor (se recuerda que el móvil debe movilizarse a 2 km/h por lo que el sensor debe tener rangos de trabajo apropiados para esa velocidad).

Tabla 3.1. Requerimientos del sensor inercial.
Fuente: https://www.sparkfun.com/pages/accel_gyro_guide.

Criterio	Valor
Número de variables de medición	9
Rango del acelerómetro	$\pm 2g$
Rango del giroscopio	± 180 grados por segundo

En la tabla 3.2 se presentan las alternativas (3) que se tuvieron en consideración.

Tabla 3.2. Sensores IMU.
Fuente: <https://www.adafruit.com>.
Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Sensor	Número de variables	Rango del acelerómetro	Rango del giroscopio (grados por segundo)	Rango del magnetómetro (gauss)	Precio
Adafruit 9-DOF IMU	9	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	$\pm 250, \pm 500, \pm 2000$	$\pm 1.3, \pm 8.1$	\$19.95
Adafruit 10-DOF IMU	10	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	$\pm 250, \pm 500, \pm 2000$	$\pm 1.3, \pm 8.1$	\$29.95
Razor IMU	9	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	± 2000	$\pm 1, \pm 8.1$	\$74.95

Los sensores que cumplen con los requerimientos son los Adafruit de 9 y 10 DOF. En este caso, la décima variable de medición no influye ya que se trata de un barómetro. Por lo que la elección recae en el sensor más barato. El sensor escogido es el Adafruit 9-DOF IMU Breakout (ver figura 3.2), el cual es un modelo que combina el giroscopio del L3DG20H con el acelerómetro/compás del LSM303DLHC en un solo módulo. Al presentar 9 variables de medición, se puede tener un mejor control de la posición inercial del vehículo. Características adicionales se muestran en la tabla 3.3.



Figura 3.2. Adafruit 9-DOF IMU Breakout.
Fuente: <https://www.adafruit.com>.

Tabla 3.3. Características adicionales del sensor IMU.
Fuente: <https://www.adafruit.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de alimentación	3 – 5 V.
Comunicación	I^2C .
Masa	2.8 g.
Dimensiones	38 mm x 23 mm.

Sistema de posicionamiento global (GPS)

El sistema de posicionamiento global es un sistema que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto (en este caso un móvil) con una precisión de hasta centímetros, aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. Son comúnmente incorporados en sistemas de navegación, por lo que se decidió usarlo en conjunto con el sensor IMU mencionado anteriormente.

Los requerimientos a considerar se muestran en la tabla 3.4. Debido a la baja velocidad del móvil (2 km/h), la frecuencia de actualización no requiere ser muy alta. Asimismo, la precisión puede ser alta (2.5 m) pero con la ayuda del sensor IMU y la baja velocidad del

móvil se logra una mejor navegación. En cuanto a los canales, la inicialización de GPS requiere analizar cuántos satélites están disponibles o accesibles, por lo que mientras más frecuencias se puedan analizar (a través de los canales) más rápida será la inicialización, 14 canales permite un buen rastreo de los satélites.

Tabla 3.4. Requerimientos del GPS.
Fuente: https://www.sparkfun.com/pages/GPS_Guide.

Criterio	Valor
Frecuencia de actualización	1 Hz.
Número de canales	Mayor o igual a 14.
Precisión	Menor o igual a 2.5 m.

En la tabla 3.5 se muestran las alternativas consideradas (3).

Tabla 3.5. Sensores GPS.
Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

GPS	Frecuencia	Número de canales	Precisión	Sensibilidad	Precio
EM-506	1 Hz	48	2.5 m.	-163 dBm	\$39.95
Copernicus II	1 Hz	12	Menor a 2.5 m.	-160 dBm	\$44.95
Venus GPS Logger	1 Hz (20 máximo)	14	2.5 m.	-148 dBm	\$59.95

Se escogió el receptor GPS EM-506 (ver figura 3.3) debido a que cumple con los requisitos propuestos, además, presenta una alta sensibilidad (-163 dBm) y presenta una buena demostración de trabajo en diversos ambientes. Además, ofrece un tiempo de encendido de menos de 15 segundos en condiciones normales sin necesidad de ayuda en red gracias a su tecnología SiRF CGEE (“Client Generated Extended Ephemeris), presenta un regulador de voltaje incorporado por lo que puede ser operado con 5 V y un indicador LED sobre el status en el que se encuentra el módulo. Características adicionales se muestran en la tabla 3.6.



Figura 3.3. Receptor GPS EM-506.
Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Tabla 3.6. Características adicionales del módulo GPS.
Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de alimentación:	4.5 – 6.5 V.
Corriente de trabajo:	33 – 38 mA.
Frecuencia de operación:	1.575 GHz.
Precisión de velocidad:	Menor a 0.01 m/s, menor a 0.01 grados.
Masa:	16 g.
Dimensiones:	30 mm x 20 mm x 10.7 mm.

Cámara

Para la detección de plantas se decidió usar una cámara a la que se puede adaptar un filtro infrarrojo para realizar el control necesario que se explicará más adelante, por lo que los requerimientos para este sensor (tabla 3.7) recaen principalmente en la presencia de un filtro infrarrojo y la calidad de la imagen (resolución).

Tabla 3.7. Requerimientos de la cámara.

Criterio	Valor
Resolución	Full HD
Filtro infrarrojo	Sí

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Cámaras consideradas.
Fuente: <http://www.logitech.com>.

Cámara	Resolución	Filtro Infrarrojo	Precio
Logitech C920	Full HD (1920 x 1080 pixeles)	Sí	\$49.99
Logitech C250	HD (1280 x 720 pixeles)	Sí	\$39.99
Logitech Pro 9000	1600 x 1200 pixeles	Sí	\$79.99

Se escogió la cámara Logitech C920 (ver figura 3.4) debido a su bajo costo (en comparación con la Logitech Pro 9000) y a que cumple con los requerimientos. Características adicionales se muestran en la tabla 3.9.



Figura 3.4. Logitech HD Pro Webcam C920.
Fuente: <http://www.logitech.com>.

Tabla 3.9. Características adicionales de la cámara.

Fuente: <http://www.logitech.com>.

Características Adicionales	
Corrección automática de iluminación escasa	Sí.
Captura de video y fotos	Sí.
Controles de panorámico, inclinación y zoom	Sí.
Detección de movimiento	Sí.
Dimensiones	2.8" x 7.5" x 8.9" (71.1 mm x 190.5 mm x 226 mm)

Actuadores:**Motor DC para desplazamiento del móvil**

Con los cálculos realizados sobre potencia y velocidad (ver Anexo B.1.4), se determinó que se necesitaba un motor de 1 Nm y 70 rpm (ver tabla 3.10).

Tabla 3.10. Requerimientos del motor DC.

Criterio	Valor
Torque	1 Nm. (mínimo)
Velocidad angular	70 rpm.

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Alternativas de motores DC.

Fuente: <http://www.servocity.com>.Fuente: <http://www.pololu.com>.

Motor DC	Torque	Velocidad angular	Encoder	Corriente máxima
45 RPM precision gear motor	1.96 Nm	45 rpm	No	1 A
37D mm gearmotor with encoder	1.6 Nm	100 rpm	Sí	5 A
37D mm gearmotor without encoder	1.6 Nm	100 rpm	No	5 A

El motor seleccionado (ver figura 3.5) cuenta con 1.6 Nm y 100 RPM, tomando en cuenta el factor de seguridad en los cálculos se decidió que este motor sería adecuado para el sistema. Además, al tener un encoder acoplado, facilita el control de velocidad que se requiere realizar. Características adicionales se muestran en la tabla 3.12.



Figura 3.5. Motor DC (“37D mm gearmotor with encoder”).
Fuente: <https://www.pololu.com>.

Tabla 3.12. Características adicionales del motor DC-100 rpm.
Fuente: <https://www.pololu.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de operación	12 V.
Resolución del encoder	64 cpr. en el eje del motor
Dimensiones	37 mm (diámetro) y 140.6 mm (largo)

Servomotor para giro de ruedas

En los requerimientos del diseño, se tuvo en cuenta que el móvil debería ser capaz de corregir su trayectoria, para esto se decidió utilizar servomotores que puedan encargarse del giro de las ruedas (dirección del móvil). Con los cálculos realizados sobre potencia y velocidad (ver Anexo B.1.5), se determinó que se necesitaba un servomotor de 0.22 Nm. En la tabla 3.13 se muestran los demás requerimientos.

Tabla 3.13. Requerimientos del servomotor.

Criterio	Valor
Torque	0.22 Nm. (mínimo)
Corriente Máxima	0.5 A.

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Alternativas de servomotores.
Fuente: <http://www.servocity.com>.

Servomotor	Torque	Corriente máxima	Precio
Hitec HS-5485HB	0.62 Nm	0.5 A	\$19.99
Hitec HS-430BH	0.50 Nm	0.5 A	\$22.99
Futaba S3010	0.64 Nm	0.5 A	\$22.99

Se escogió el servomotor Hitec HS-5485HB (ver figura 3.6) debido a que tenía un menor precio comparado con las otras dos opciones. Características adicionales se muestran en la tabla 3.15.



Figura 3.6. Servomotor Hitec HS-5485HB.
Fuente: <https://www.servocity.com>.

Tabla 3.15. Características adicionales del servomotor Hitec.
Fuente: <https://www.servocity.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de Operación	4.8 – 6 V.
Masa	1.59 oz (45 g).
Dimensiones	1.57" x 0.78" x 1.49" (39.8 mm x 19.8 mm x 38 mm).

Servomotor para removedor

Con los cálculos del torque necesario en el removedor (ver Anexo B.1.6), se determinó que se necesitaba de un servomotor con 1.16 Nm de torque. En este caso, el torque es más primordial que el precio debido a la función que va a permitir el servomotor (remoción de la tierra).

En la tabla 3.16 se muestran los demás requerimientos.

Tabla 3.16. Requerimientos del servomotor.

Criterio	Valor
Torque	1.16 Nm. (mínimo)
Corriente Máxima	0.65 A.

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Alternativas de servomotores.

Fuente: <http://www.servocity.com>.

Fuente: <http://www.trossenrobotics.com>.

Servomotor	Torque	Corriente máxima
Dynamixel AX-12A	1.53 Nm	0.9 A
Hitec HSB-9465SH	1.32 Nm	0.6 A
Futaba S9155	1.35 Nm	0.6 A

Se decidió usar dos Dynamixel (ver figura 3.7) ya que además de poseer un circuito de protección contra sobre-corriente o sobre-carga, existe la posibilidad de poder conectarlos mediante un solo cable (en cadena) y aun así poder controlarlos de forma independiente. Características adicionales se muestran en la tabla 3.18.



Figura 3.7. Dynamixel AX-12A.
Fuente: <http://www.trossenrobotics.com>.

Tabla 3.18. Características adicionales del servomotor.
Fuente: <http://www.trossenrobotics.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de operación	9 - 12 V.
Velocidad sin carga	59 rpm.
Masa	55 g.
Dimensiones	32 mm x 50 mm x 40 mm.
Resolución	0.29°.
Relación de reducción	1:254.
Ángulo de operación	300° o Giro Continuo
Protocolo	TTL Half Duplex Serial Asíncrono.

Procesadores:

Microcontrolador

El procesador encargado de realizar la lógica de control deberá ser capaz de controlar satisfactoriamente todos los motores (4 motores DC, 4 servomotores y 2 Dynamixel) y sensores escogidos (GPS, IMU y el módulo Xbee que será explicado más adelante), así como ser capaz de procesar información usando el filtro de Kalman. En la tabla 3.19 se muestran estos requerimientos.

Tabla 3.19. Requerimientos del microcontrolador encargado de controlar los actuadores y sensores.

Criterio	Valor
Número mínimo de pines digitales	30
Número mínimo de pines analógicos	7
Comunicación I2C y UART	Sí
Librería para filtro de Kalman	Sí

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.20.

Tabla 3.20. Alternativas de microcontroladores.

Microcontrolador	Comunicación I2C y UART	Pines digitales	Pines analógicos	Filtro Kalman	Precio
Arduino Mega 2560	Sí	54	16	Sí	\$45.95
Raspberry Pi 2	Sí	40	7	No	\$49.99
Beaglebone Black A8	Sí	65	7	No	\$54.95

Si bien el Beaglebone Black tiene una mayor cantidad de pines digitales a disposición, no presenta librerías implementadas para el uso de los sensores ya descritos y el desarrollo del filtro de Kalman. Dichos requerimientos son cubiertos por el Arduino Mega 2560 (ver figura 3.8), el cual presenta diversas librerías para distintas aplicaciones y una gran variedad de pines para distintos propósitos (digitales, analógicos, PWM, I2C, UARTs, etc.). Características adicionales se muestran en la tabla 3.21.



Figura 3.8. Arduino Mega 2560.
Fuente: <https://www.arduino.cc>.

Tabla 3.21. Características del microcontrolador.
Fuente: <https://www.arduino.cc>.

Características Adicionales	
Voltaje de entrada	7 – 12 V.
Frecuencia de reloj	16 MHz.
Microcontrolador	ATmega2560.
Corriente por cada pin E/S	20 mA.
Masa	37 g.
Dimensiones	101.52 mm x 53.3 mm.

Procesador de video

La tarjeta o procesador de video debe ser rápida para poder detectar las plantas y malezas, realizar todos los algoritmos necesarios y comunicarse con el Arduino para indicarle la presencia de una planta (un procesador ARM permite estas exigencias y también es el que menor consume energético tiene, a diferencia del x86). En la tabla 3.22 se muestran estos requerimientos.

Tabla 3.22. Requerimientos de los procesadores de video.

Criterio	Valor
Resolución	Full HD
Comandos de video	ARM

Las alternativas consideradas (3) se observan en la tabla 3.23.

Tabla 3.23. Alternativas de procesadores de video.

Opciones	Resolución	Procesador	Velocidad
PandaBoard OMAP4430	Full HD	ARM	1.2 GHz
TI AM3517	HD	ARM	600 MHz
TI AM3505	HD	ARM	600 MHz

Se escogió el PandaBoard (ver figura 3.9), el cual es una tarjeta basada en el sistema OMAP4430 de Texas Instruments, ya que cumple con los requerimientos propuestos. Asimismo, presenta la mayor velocidad de procesamiento y tiene facilidad para comunicarse con microcontroladores como el arduino. Características adicionales se muestran en la tabla 3.24.



Figura 3.9. PandaBoard.
Fuente: <http://www.digikey.com>.

Tabla 3.24. Características adicionales del PandaBoard.
Fuente: <http://www.digikey.com>.

Características Adicionales	
Memoria	1 GB DDR2 RAM.
Interfaz	USB 2.0 HS OTR port, USB 2.0 HS Host ports (2), RS-232 DB-9 UART.
Audio	3.5" Stereo Audio in/out, HDMI Audio out.
Dimensiones	114.3 mm x 101.6 mm.
Masa	81.5 g.
Procesador	Dual-core 1.2 GHz ARM@Cortex-A9MPCore.

Excitadores:

Driver motores DC

Para el control de los 4 motores de las ruedas, es necesario un controlador que envíe las señales de control pertinentes provenientes de microcontrolador (Arduino Mega 2560) y que soporte los voltajes y corrientes correspondientes (se recuerda que los motores seleccionados operan a 12 V y tienen una corriente pico de 5A y 0.763 A de trabajo). En la tabla 3.25 se muestran las alternativas consideradas.⁸⁸

Tabla 3.25. Alternativas de controladores para los motores DC.

Controlador	Voltaje de operación	Corriente pico	Corriente de salida	Precio
Dual MC33926	5 – 28 V	5 A	3 A	\$29.95
Dual TB6612FNG	4.5 – 13.5 V	3 A	1 A	\$14.99
Dual VNH5019	5.5 – 24 V	30 A	12 A	\$49.95

El Dual TB6612FNG es el más barato pero no cumple la corriente pico. Si bien el Dual VNH5019 soporta mayor corriente para los motores, se recuerda que en el cálculo de los torques para escoger los motores se tomó un factor de seguridad de 1.5 en la carga, por lo que se escoge el driver Dual MC33926 (ver figura 3.10), el cual puede controlar hasta dos motores a la vez, cumple con los requerimientos y es más barato en comparación. Características adicionales se muestran en la tabla 3.26.

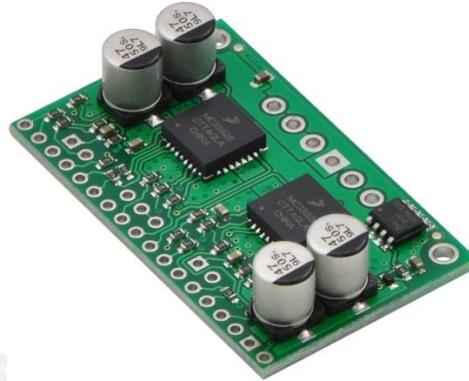


Figura 3.10. Driver Dual MC33926.
Fuente: <https://www.pololu.com>.

Tabla 3.26. Características adicionales del driver.
Fuente: <https://www.pololu.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de operación	5 – 28 V.
Canales	2.
Máxima frecuencia PWM	20 kHz.
Masa	0.25 oz.
Dimensiones	1.8 in x 1.10 in.

74LS241N

Si bien un Dynamixel puede conectarse directamente con el Arduino, cuando se desea usar más de uno (caso del presente trabajo), existe dificultad por el tipo de comunicación, por lo que se necesita de circuitos integrados entre el Arduino y el Dynamixel. Es así que se escoge el integrado 74LS241N (ver figura 3.11).

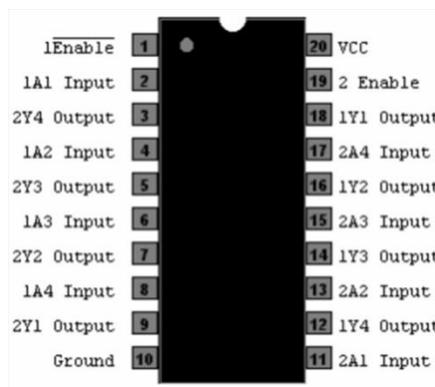


Figura 3.11. Circuito integrado.
Fuente: <https://www.ez-robot.com>.

Las características (datasheet) del integrado se encuentran en el anexo B4.

Módulo de comunicación inalámbrica:

De acuerdo a la estructura de funciones ya explicada, el sistema deberá ser capaz de enviar información sobre la posición del móvil, así como recibir la trayectoria a seguir por parte del usuario. Dado que el sistema es automático, el envío de datos debe darse de forma inalámbrica. Entre las distintas alternativas a disposición se tiene:

Tabla 3.27. Alternativas de módulos de comunicación.

Fuente: <http://www.ingeniosolido.com/blog/2010/06/zigbee-vs-bluetooth-vs-wi-fi-parte-1/>.

Módulos	Rango	Tasa de transmisión
XBee (Pro Series 1)	1500 m.	256 Kbps
Wifi (RN-131C)	100 m.	1 Mbps
Bluetooth (RN-42)	20 m.	3 Mbps

Debido a que la interacción entre el usuario y el sistema no se toma en cuenta en el diseño final, el rango será la característica primordial para seleccionar un módulo. Para esto se eligió el módulo XBee Pro Series 1 (ver figura 3.12), el cual es un módulo basado en soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Estos módulos utilizan el protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 (Zigbee). Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. Los Series 1 son los más fáciles de trabajar debido a que no necesitan ser configurados. Los PRO se diferencian de los regulares en un mayor alcance (1.6 km línea vista) pero debido a eso consumen más potencia. Características adicionales se muestran en la tabla 3.28.



Figura 3.12. XBee Pro Series 1.

Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Tabla 3.28. Características adicionales del módulo XBee.

Fuente: <https://www.sparkfun.com>.

Características Adicionales	
Voltaje de Alimentación	3.3 V.
Corriente de Operación	215 mA.
Pines digitales E/S	8.
Antena	Whip Antenna.

Baterías:

Con los cálculos respectivos (ver anexo B.2.1), se determinó escoger dos baterías, una para la parte de control y otra para la parte de actuación (potencia). La de control deberá proveer una corriente de 2.515 A durante 1.5 horas, mientras que la potencia deberá proveer una corriente de 5.473 A durante 1.5 horas.

Batería para la parte de control:

En la figura 3.13, se observa la batería escogida, la cual es recargable y cumple con los requerimientos mencionados (la capacidad de esta batería permite una duración de 2 horas). Sus características se muestran en la tabla 3.29.



Figura 3.13. Batería Turnigy 5000 mAh 3S 20C Lipo Pack.
Fuente: <http://www.hobbyking.com>.

Tabla 3.29. Características de la batería.
Fuente: <http://www.hobbyking.com>.

Características Principales	
Capacidad	5000 mAh.
Configuración	3S1P / 11.1 V / 3 Cell.
Descarga	20C (constante).
Masa	412 g.
Dimensiones	145 mm x 49 mm x 26 mm.
Carga	JST-XH.

Batería para la parte de potencia:

En la figura 3.14, se observa la batería escogida, la cual es recargable y cumple con los requerimientos mencionados (la capacidad de esta batería permite una duración de 2.19 horas). Sus características se muestran en la tabla 3.30.



Figura 3.14. Batería MultiStar LiHV High Capacity 6S 12000 mAh.
Fuente: <http://www.hobbyking.com>.

Tabla 3.30. Características de la batería.
Fuente: <http://www.hobbyking.com>.

Características Principales	
Capacidad	12000 mAh.
Configuración	6S1P / 22.8 V / 6 Cell.
Descarga	10C (constante).
Masa	1300 g.
Dimensiones	165 mm x 68 mm x 59 mm.
Carga	JST-XH.

3.1.3. Diagramas esquemáticos

Los diagramas eléctricos generales se encuentran en la lista de planos (ver anexo B3). La presente subsección se enfoca en conexiones específicas de algunos componentes, así como los reguladores de voltaje. Los cálculos de los componentes en algunos circuitos se encuentran en el anexo B2.

Regulador de voltaje

En el presente trabajo se necesita 0.763 A por cada motor DC y 1.5 A para el PandaBoard (casos críticos), por lo que los requerimientos se centran en la corriente de salida. Los reguladores considerados se tienen en la tabla 3.31:

Tabla 3.31. Alternativas de reguladores.

Reguladores	Corriente de salida
LM7805	1.5 A.
LM317	1.5 A.
LM2575	1 A.
LM2576	3 A.

El 7805 y el 317 tienen poca eficiencia pero soportan 1.5 A. El 2575 es más eficiente pero solo soporta 1 A, por lo que se decidió el integrado LM2576 que presenta mejor eficiencia, soporta mayor corriente (3 A) y requiere una menor cantidad de componentes externos. Este integrado será necesario para regular a voltajes de 3.3 V (ver figura 3.15), 5 V, 6 V (ver figura 3.16) y 12 V.

Según los cálculos realizados en el anexo B.2.7, los reguladores de 5V, 6V y 12V van a requerir de disipadores de potencia, los cuales son de baja potencia y asequibles. (Fuente: http://www.disipadores.com/baja_potencia.php)

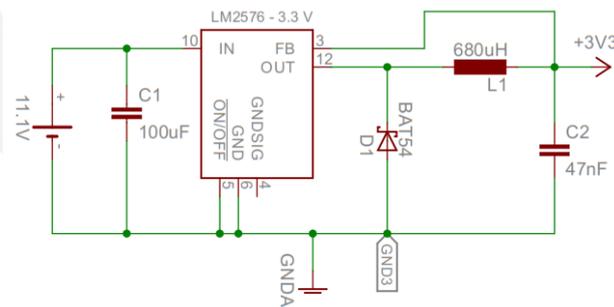


Figura 3.15. Regulador de voltaje a 3.3 V.
Fuente: Elaboración propia.

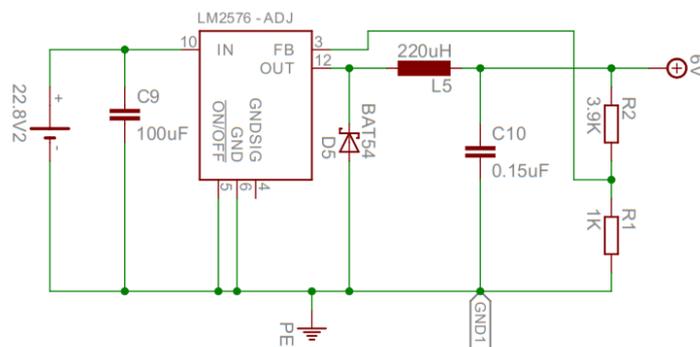


Figura 3.16. Regulador de voltaje ajustable a 6 V.
Fuente: Elaboración propia.

Conexión Arduino – Dynamixel

En la figura 3.17, se observa cómo se conectan los Dynamixel con el microcontrolador. Como en el presente trabajo se usan dos Dynamixel para elevar o descender el removedor de malezas, es necesario el uso de un integrado (74LS241N) para evitar los problemas de comunicación que pueda haber y así poder controlar los dos servomotores en cadena y al mismo tiempo.

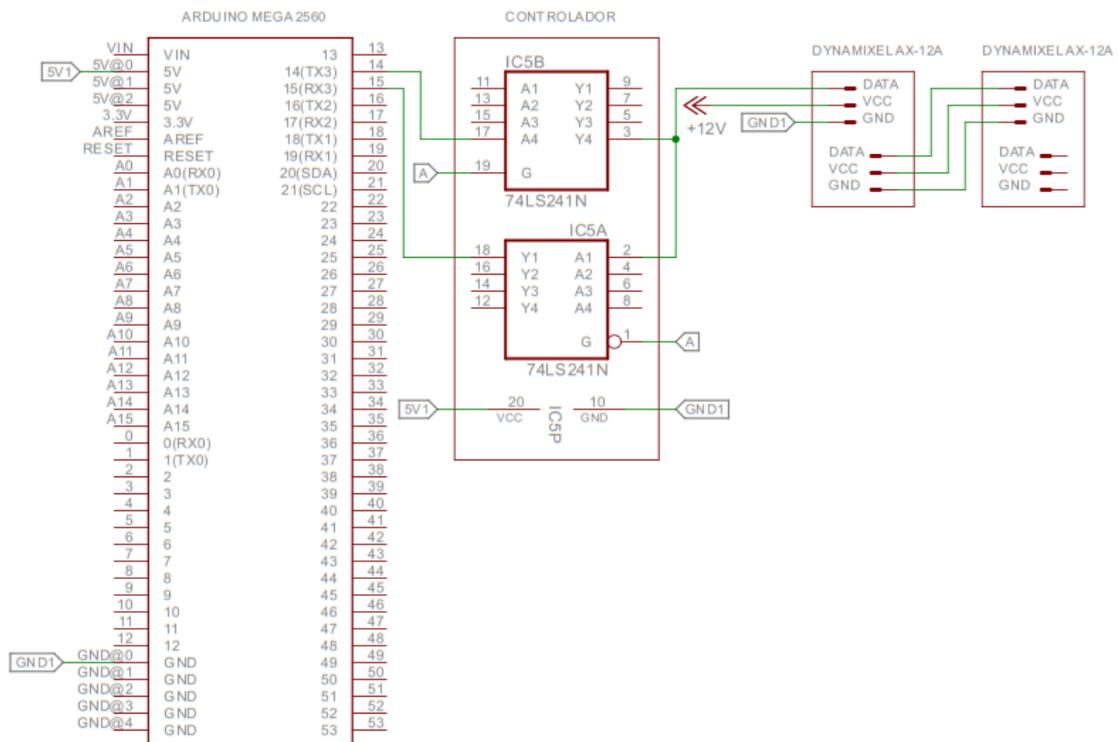


Figura 3.17. Conexión de los Dynamixel con el micro-controlador.
Fuente: Elaboración propia.

Conexión Arduino – motores DC

A continuación se presenta el uso del driver para controlar los motores DC (12 V) encargados del desplazamiento del móvil (ver figura 3.18). Cada driver solo controla 2 motores, por lo que el siguiente diagrama solo muestra a un par de motores, la conexión con los otros dos es similar. A pesar que se muestran 2 tierras en el driver, éstas se encuentran juntas. La hoja técnica del integrado del driver se encuentra en el anexo B4. Los encoders de los motores son alimentados por el mismo Arduino y se comunican con el microcontrolador a través de pines de interrupción (el Arduino posee 6). Solo se usará un canal de los encoders ya que el sistema sabrá el sentido de los motores desde un inicio.

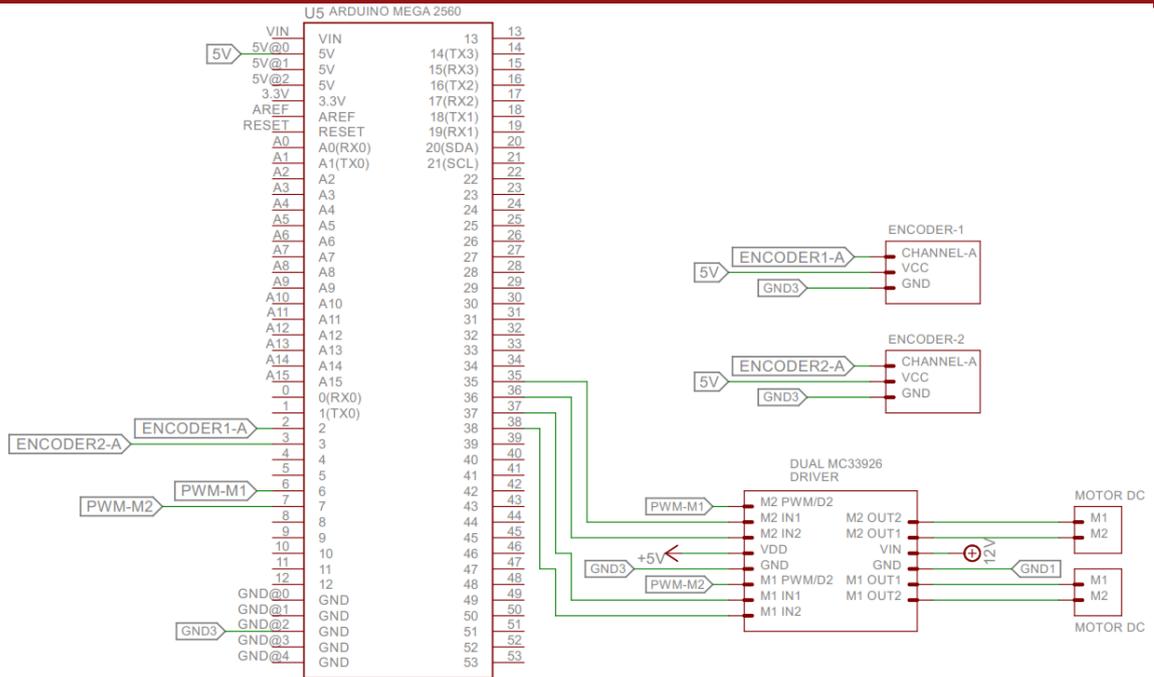


Figura 3.18. Conexión del micro-controlador con los motores DC.
Fuente: Elaboración propia.

Módulo XBee

Debido a que el módulo XBee necesita 215 mA, éste no se alimenta del Arduino, sino de la batería de 11.1 V a través de un regulador de voltaje. Como ya se mencionó anteriormente, en el presente trabajo no se hace énfasis en el tipo de comunicación e interfaz con el usuario que tendrá el móvil, por lo que se usará un circuito básico de conexión.

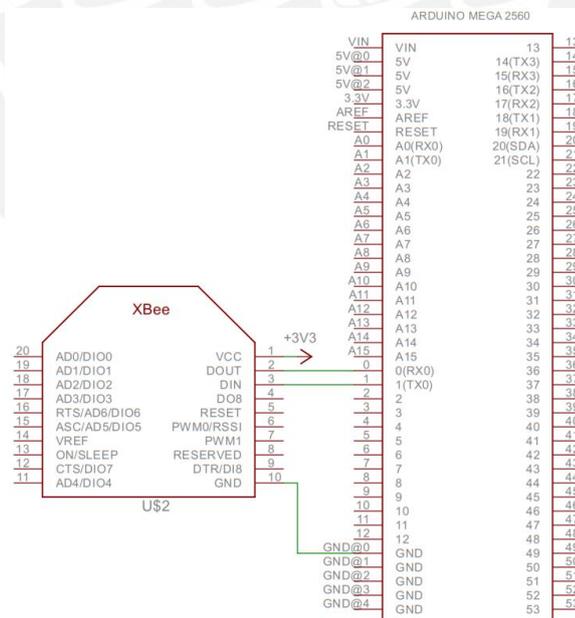


Figura 3.19. Conexión del módulo XBee con el Arduino Mega 2560.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño mecánico

En este subcapítulo se describirá los principales planos de ensamble y despiece del sistema, así como vistas del prototipo. También se mostrará las simulaciones de las piezas críticas que soportan el mayor peso de la estructura y las reacciones del suelo durante la remoción.

3.2.1. Planos de ensamble

Antes de mostrar los planos de ensamble, se muestra la vista isométrica del sistema diseñado (ver figura 3.20), el cual presenta dimensiones de 40 cm de ancho (distancia prudencial para asegurar el bienestar del cultivo), 50 cm de largo (distancia necesaria para almacenar todos los componentes necesarios) y 30 cm de alto (20 cm desde el chasis al suelo como medida prudencial para asegurar el bienestar del cultivo).

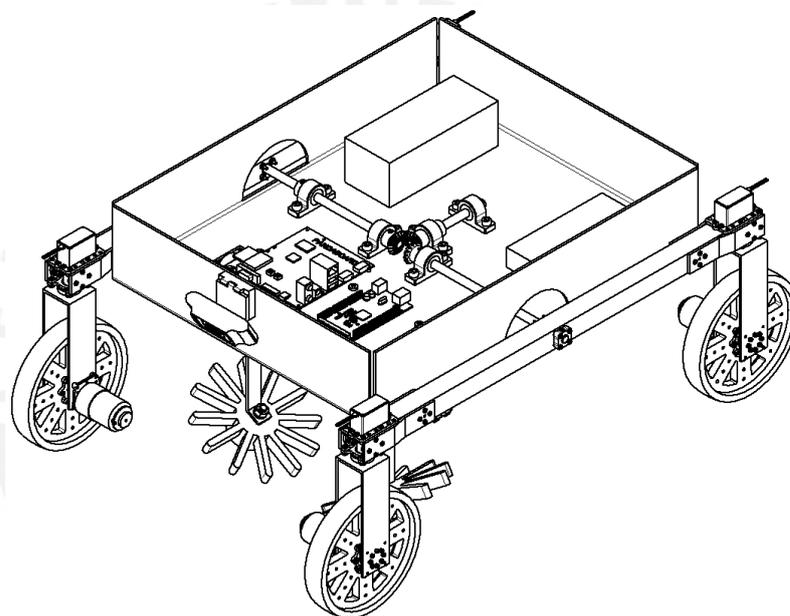


Figura 3.20. Vista isométrica del prototipo (sin cubierta).
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.21 se muestra la vista horizontal del prototipo, donde se puede apreciar el chasis, las tarjetas Arduino y PandaBoard, las baterías a usar y la cámara seleccionada. En la figura 3.22 se muestra la vista frontal del prototipo, donde se aprecia las ruedas con sus respectivos servomotores y motores DC para permitir el desplazamiento del vehículo. Se encuentra señalado con el número 2 el subsistema de la rueda que será mostrado más adelante y con el número 3 el subsistema del removedor completo (cuyos discos se encuentran separados 7 cm para asegurar un buen control mecánico de malezas) que también será mostrado más adelante. Finalmente en la tabla 3.32, se muestra la lista de componentes principales del ensamble general del sistema, se puede apreciar que el diseño está compuesto por 3 subsistemas (el tercer subsistema sería el chasis con el mecanismo diferencial), por lo que un diseño modular se tuvo en cuenta durante el desarrollo de la tesis.

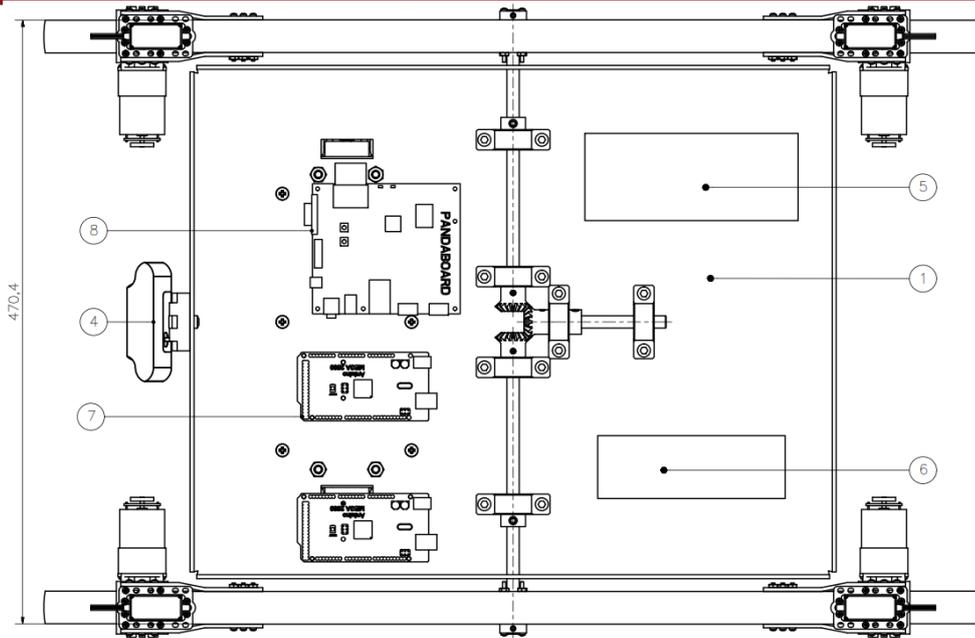


Figura 3.21. Vista horizontal del prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

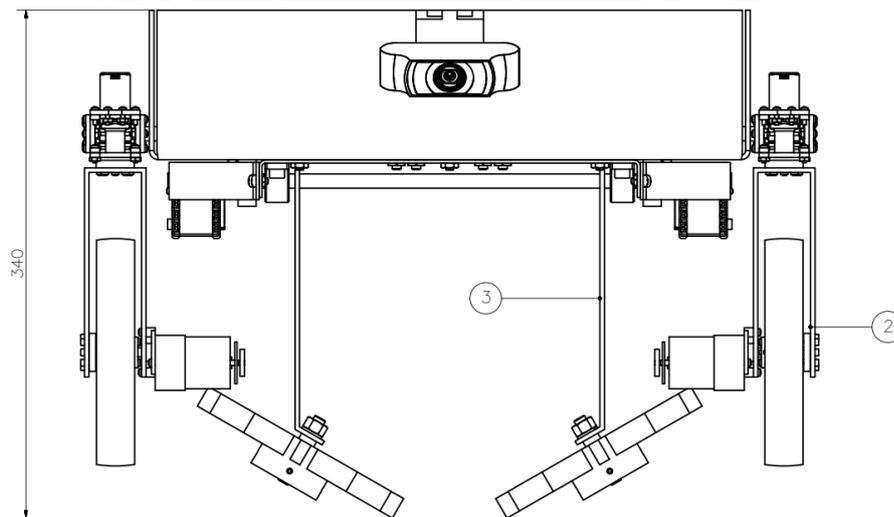


Figura 3.22. Vista frontal del prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.32. Lista de componentes principales.
Fuente: Elaboración propia.

8	1	PANDABOARD OMAP4430			DIGIKEY
7	2	ARDUINO MEGA 2560			SPARKFUN
6	1	BATERÍA 5Ah			HOBBYKING
5	1	BATERÍA 12Ah			HOBBYKING
4	1	LOGITECH HD PRO WEBCAM C920			AMAZON
3	1	REMOVEDOR COMPLETO			VER LÁMINA L4
2	4	SUBSISTEMA RUEDA			VER LÁMINA L3
1	1	BASE CON MECANISMO DIFERENCIAL			VER LÁMINA L2
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

3.2.2. Planos de los subsistemas

Subsistema rueda:

En la figura 3.23, se muestra el subsistema rueda que se repite para las otras tres ruedas. Las uniones consisten exclusivamente en uniones atornilladas, por lo que cualquier cambio de pieza se puede hacer con facilidad. La mayoría de los elementos son comprados y hechos de aluminio. Asimismo, se usó una configuración que se asegure que los ejes del motor y servomotor no soporten ninguna carga y solo cumplan la función de transmitir movimiento. En cuanto a la selección de la rueda, se consideró el peso del móvil (el cual es de aproximadamente 10 kg, a diferencia de los prototipos en el estado del arte que sobrepasaban los 100 kg y, por ende, necesitaban ruedas más grandes y resistentes), la altura mínima de 15 cm desde el suelo hasta la plataforma que se estableció en los requerimientos físicos – mecánicos (la rueda escogida es de 6 pulgadas o 15.24 cm) y la facilidad que presenta la rueda para acoplarse con los demás elementos y fijaciones (todos estos componentes se compran del mismo proveedor por lo que la configuración escogida es propia de las características de la rueda). Por último, si bien una rueda lisa ejerce menos tracción al contacto con el suelo, se toma en consideración el poco peso del móvil, la baja velocidad (2 km/h) de trabajo, la presencia de motores en cada rueda y el suelo compacto (húmedo) para establecer que el peligro de deslizamiento de la rueda es bajo. Asimismo, ruedas similares son usadas en aplicaciones concernientes a la agricultura [48]. Para mayor detalle, ver los planos anexados donde se indican todos los elementos.

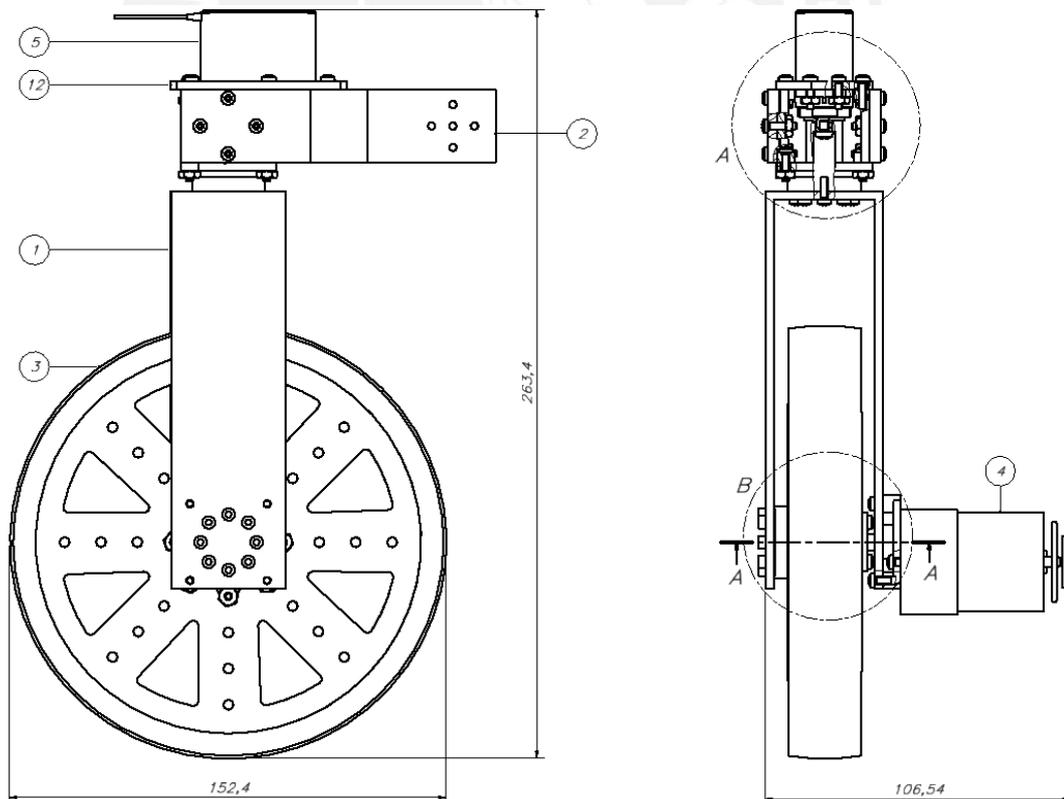


Figura 3.23. Subsistema rueda.
 Fuente: Elaboración propia.

Subsistema removedor completo:

Los discos (hechos en impresión 3D y señalados con el número 1) se unen a bielas de acero (que de ahora en adelante se llamará “placa soporte de disco removedor”) a través de un eje roscado, dichas bielas están soldadas al eje principal ya que se definió que la distancia entre ellas sea fija. Los discos fueron diseñados en base a modelos del removedor tipo “finger weeder” [47], el cual es un removedor que no necesita de cuchillas o de un material resistente (pueden ser de goma) debido a las bajas velocidades con las que se trabaja (2 km/h). Tomando en cuenta que la zona de trabajo de las extremidades del disco (“fingers”) es de 2 a 4 cm, se diseñaron con una longitud de 5 cm (siendo el disco de 15 cm de diámetro total). La parte central del disco se diseñó para que este pueda girar libremente al contacto con el suelo mientras el móvil se encuentre en movimiento, por lo que se dejó el espacio suficiente para todos los componentes que permitan dicha acción (rodamientos, prisioneros, anillo de retención axial, etc.). En cuanto al grosor y cantidad de los “fingers”, se escogió con referencia a modelos existentes y a las características de la maleza con que se trabaja (pequeño tamaño y de fácil remoción) [47]. En la figura 3.24 se observa también los Dynamixel (señalados con el número 8) que se encargan de desplegar y replegar el removedor. Como factor de seguridad, se asumió que el removedor tipo disco cumpla la función de surcado, por lo que los elementos soportan la carga de trabajo satisfactoriamente. Para mayor detalle, ver los planos anexados donde se indican todos los elementos.

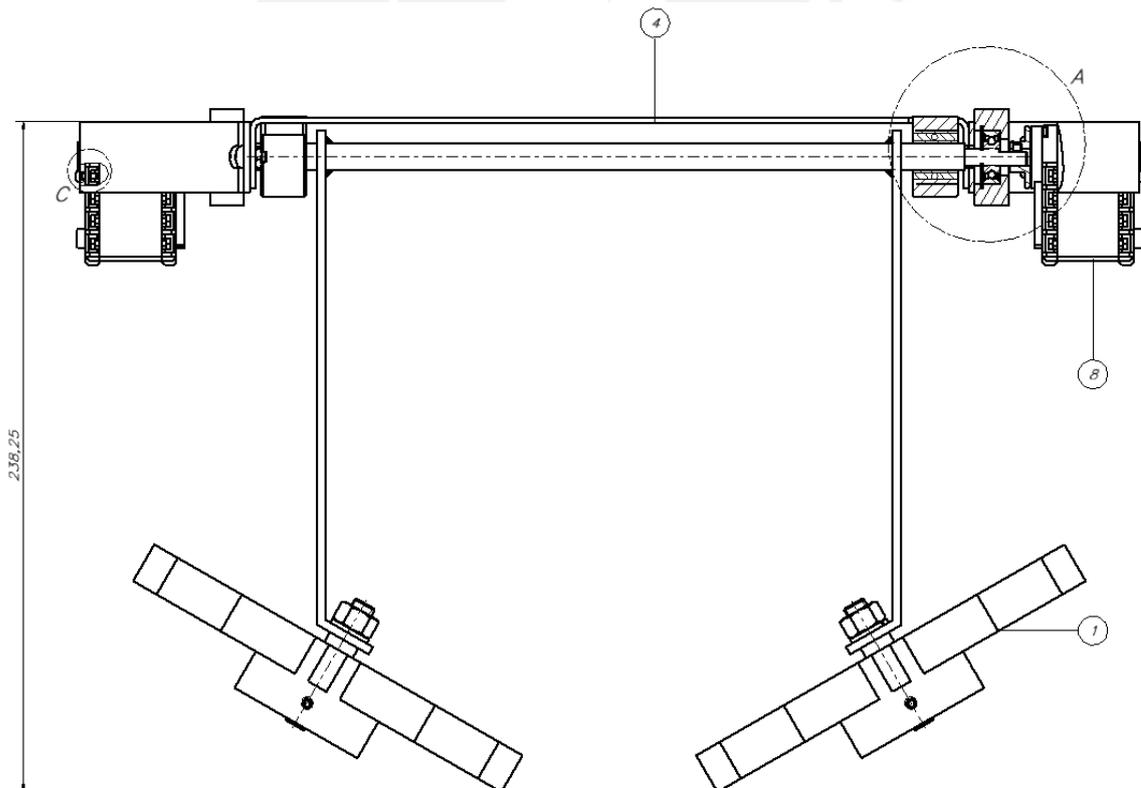


Figura 3.24. Subsistema removedor.
 Fuente: Elaboración propia.

Subsistema chasis con mecanismo diferencial:

Este subsistema (ver figura 3.25) contiene el chasis (placa doblada) que alberga los componentes electrónicos ya mencionados. Es de aluminio y tiene un espesor de 3 mm. Se usan collarines (señalados con el número 7) para evitar que los ejes se desplacen axialmente. Señalado con el número 2, se tiene una pieza, que llamaremos de ahora en adelante “viga”, cuya finalidad es la de mantener sujetas las 4 ruedas independientes al vehículo. También se pueden observar los engranajes cónicos (señalados con el número 5) que forman parte del mecanismo diferencial que permite que el vehículo se encuentre siempre en contacto con el suelo. Su diseño se basó en un móvil, con características similares al diseñado en este trabajo en cuanto a peso y tamaño, con un sistema diferencial simplificado del “Mars Rover” [45] [46], el cual permite la estabilidad del chasis al transmitir un giro contrario de una viga a la otra (la transmisión tiene relación 1:1). El cálculo de los engranajes no se toma en cuenta debido a que estos se obtienen de un proveedor (no se fabrican), además, las características del terreno son favorables para el diseño (el terreno no presenta grandes obstáculos, por ejemplo rocas, que el móvil deba superar). No obstante, si bien los engranajes pueden ser de nylon ya que el móvil se traslada a bajas velocidades (2 km/h) y no existen grandes cargas, se escogen de acero como medida de precaución y de esa forma alargar su vida de trabajo. El tamaño de los engranajes cónicos se selecciona de acuerdo al tamaño de los ejes (su diámetro se verifica en el anexo B.1.2).

Para mayor detalle, ver los planos anexados donde se indican todos los elementos.

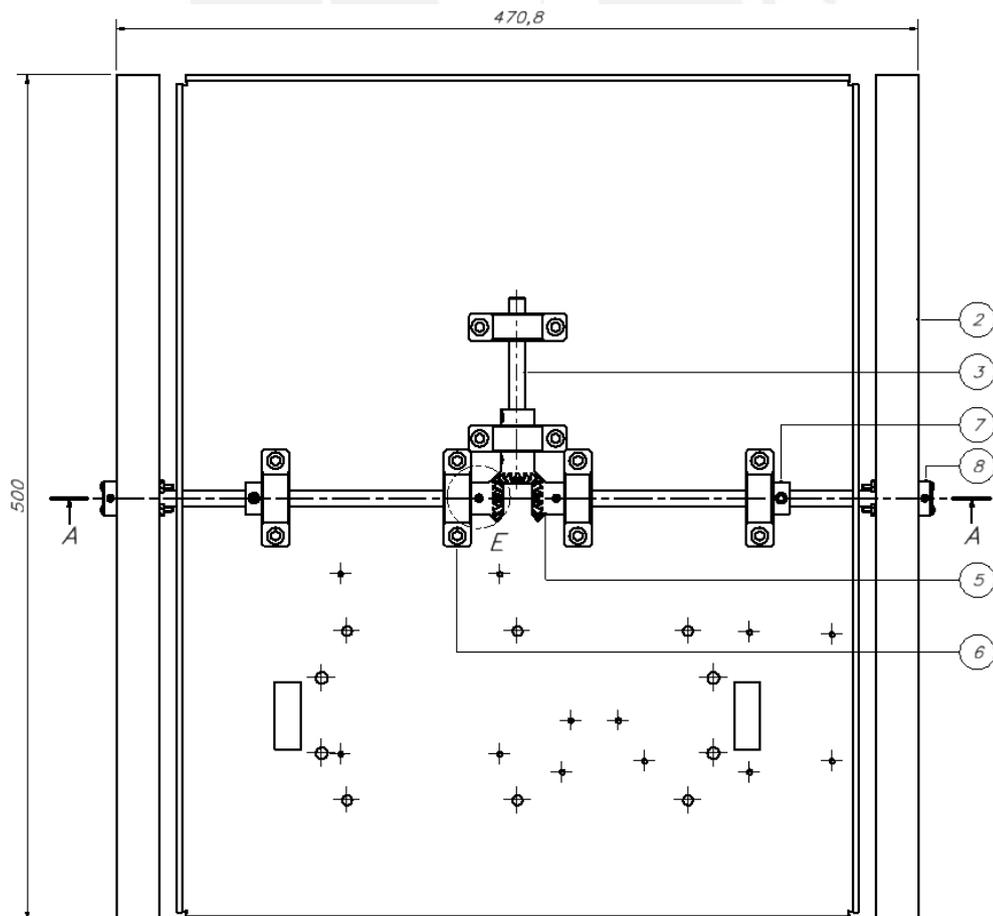


Figura 3.25. Subsistema chasis con mecanismo diferencial.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Planos de despiece

Chasis:

Este elemento es el más importante del sistema ya que soporta todos los componentes electrónicos, así como el mecanismo diferencial que sirve como sistema de suspensión del vehículo. Asimismo, a nivel de fabricación, es la que requiere mayor cantidad de procedimientos (cortes para los agujeros, doblado). Las tarjetas electrónicas se elevan a través de postes plásticos para asegurar el aislamiento eléctrico entre estas y la plancha. Los demás elementos están sujetos a través de uniones atornilladas para asegurar que el sistema tenga un fácil ensamble. Para asegurar el desempeño de la pieza en su tarea de soportar los demás elementos del sistema se eligió un espesor de 3 mm. En la figura 3.26 y 3.27, se muestra la vista horizontal de la pieza y su desarrollo respectivamente. En los anexos B3 se muestran planos más detallados en cuanto a la posición y tamaño de los agujeros.

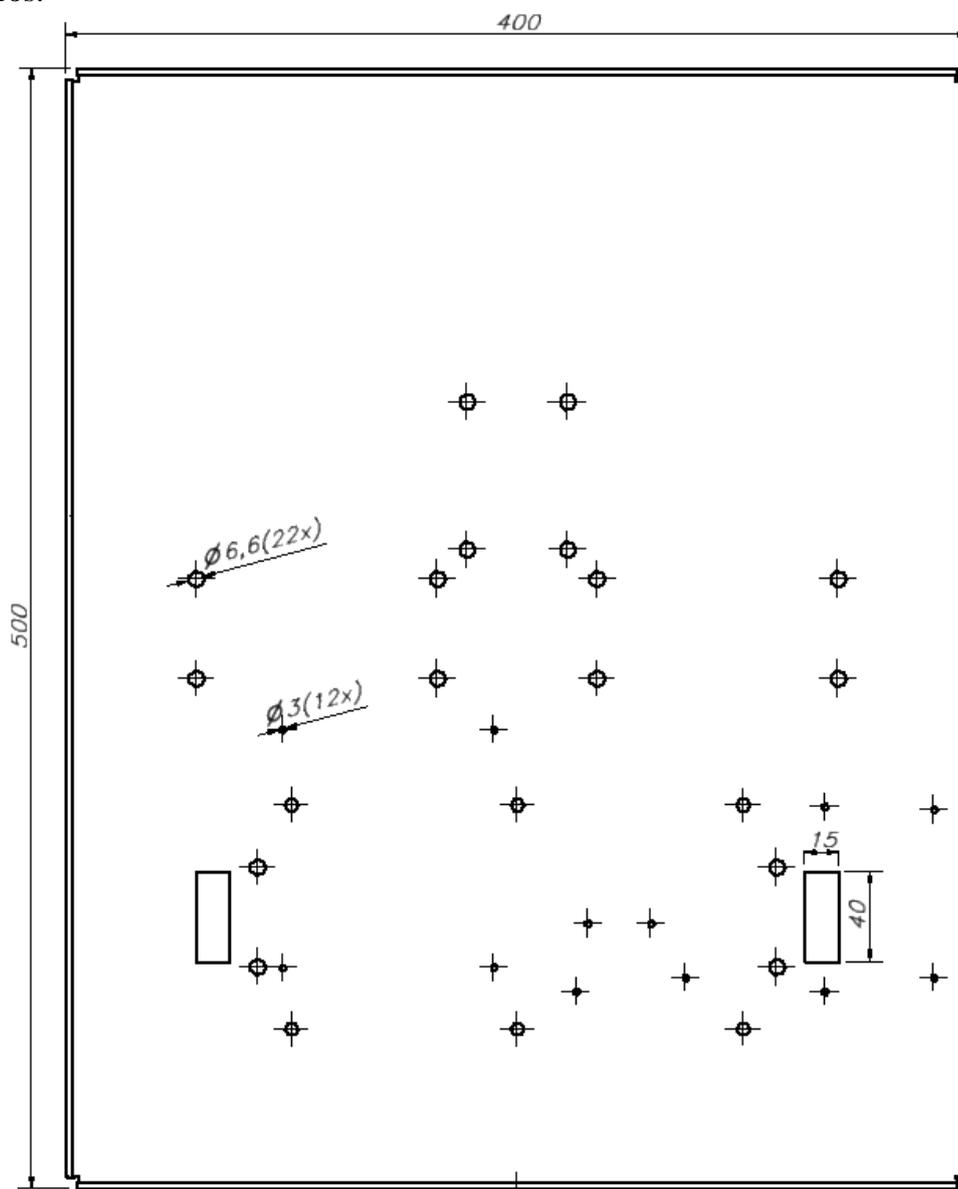


Figura 3.26. Chasis.
 Fuente: Elaboración propia.

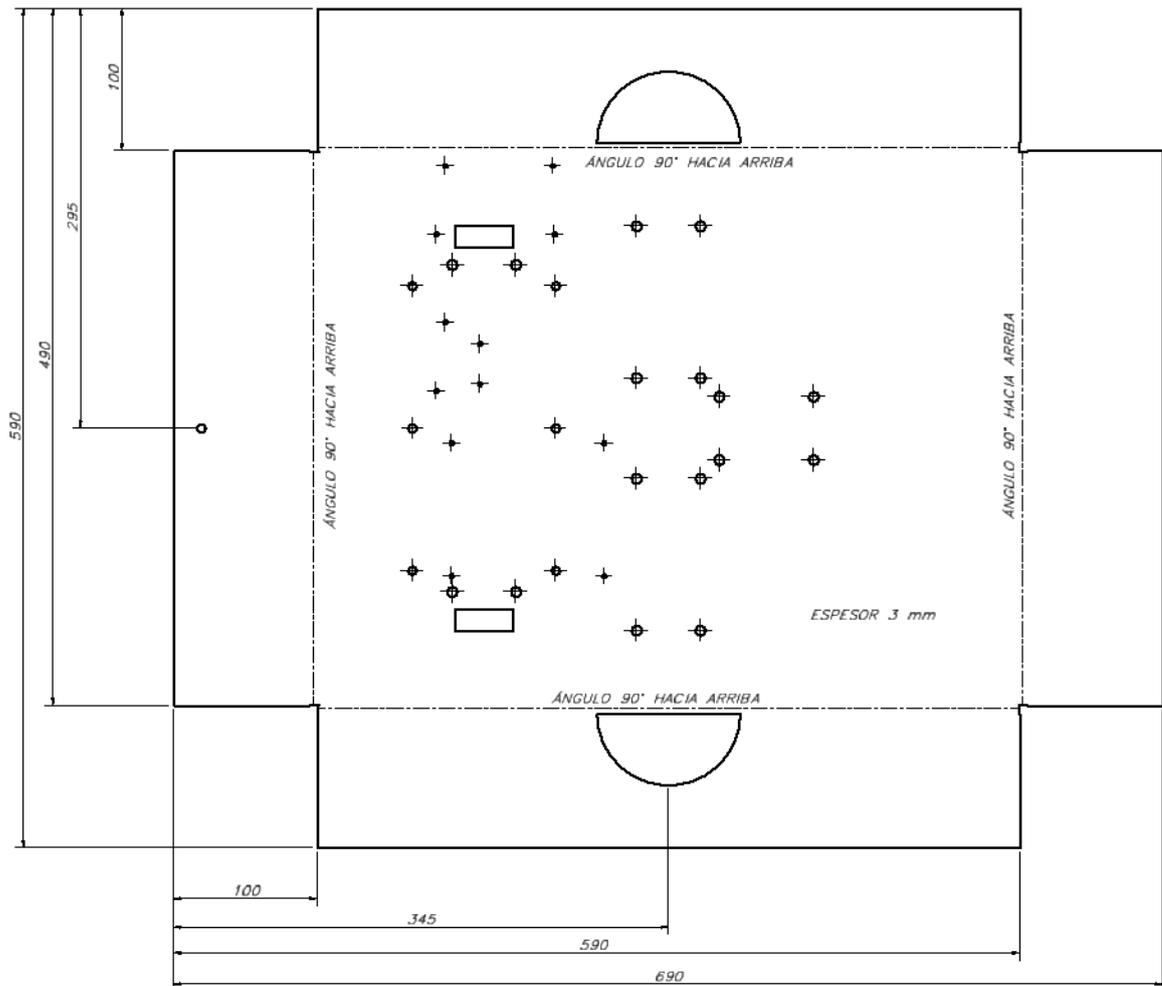


Figura 3.27. Desarrollo del chasis (placa doblada).
Fuente: Elaboración propia.

Placa de unión rueda con servo:

La siguiente pieza a mostrar es una placa doblada, cuyas dimensiones se pueden observar en la figura 3.28, encargada de unir la rueda con el servomotor. A través de este elemento se transmite el giro del servomotor a la rueda. Como ya se mencionó antes, todas las uniones son atornilladas para facilitar el ensamble o cambio de piezas. Para mayor detalle, ver los planos anexados donde se tiene más vistas del elemento.

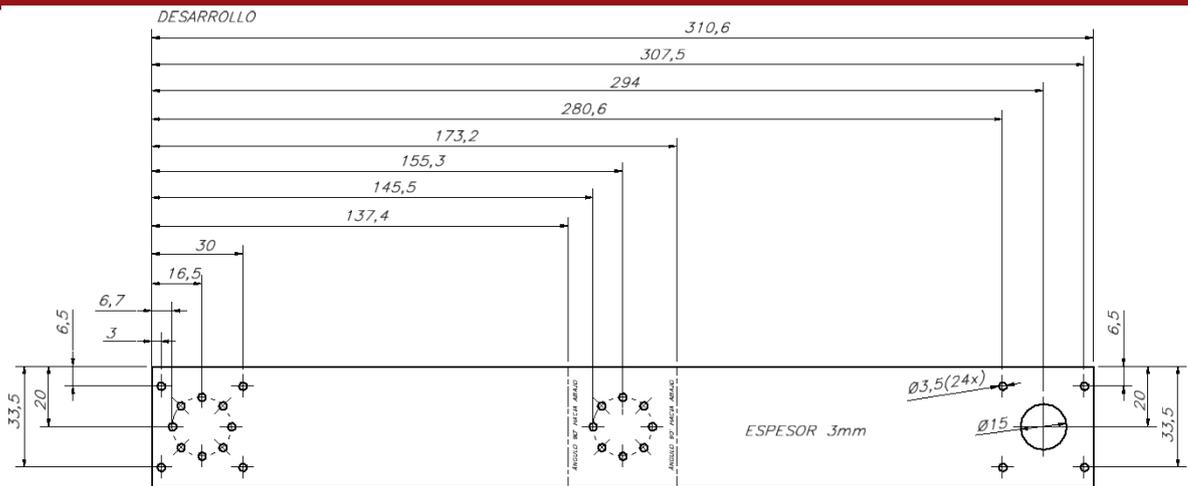


Figura 3.28. Placa de unión rueda con servo.
Fuente: Elaboración propia.

Placa soporte de disco removedor:

La última pieza a mostrar (se mostraron las piezas de unión más importantes del sistema) es la placa soporte de disco removedor (ver figura 3.29). Como ya se mencionó anteriormente, esta pieza se une por un lado a un eje roscado (el cual a su vez soporta al disco removedor) con la ayuda de una tuerca y una arandela de presión. Mientras que por el otro lado se une con un eje (el cual es soportado por el chasis a través de chumaceras) mediante soldadura. Se decidió usar soldadura ya que la distancia entre discos removedores debe ser fija en todo momento. Para mayor detalle, ver los planos anexados donde se tiene más vistas del elemento.

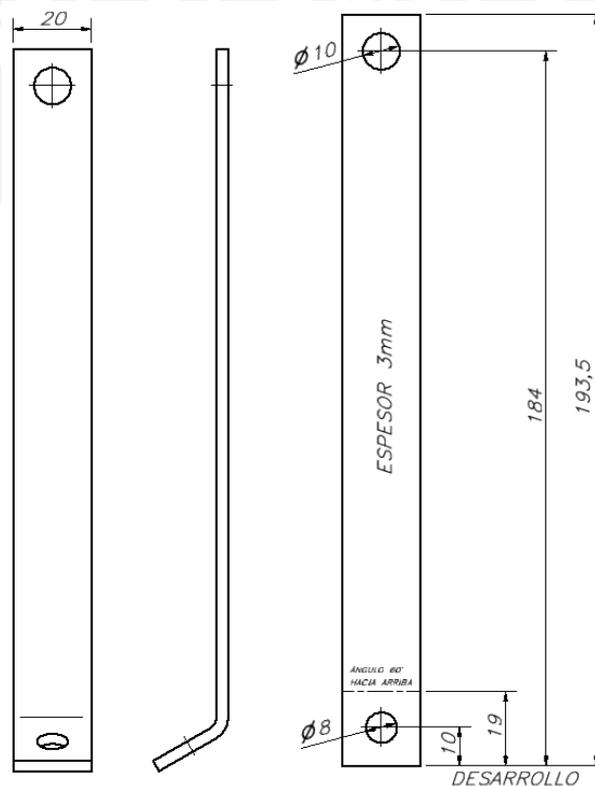


Figura 3.29. Placa soporte de disco removedor.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Simulaciones para verificaciones mecánicas

Para asegurarse que los elementos soporten el peso de la estructura y resistan las reacciones provenientes del desplazamiento del vehículo y la remoción de malezas se simuló su comportamiento a través del Método de Elementos Finitos.

Viga:

Como ya se mencionó, esta pieza se encarga de mantener sujetas las 4 ruedas independientes al vehículo.

La sección de esta viga fue calculada inicialmente en los anexos B1.1. Sus características se muestran en la tabla 3.33.

Tabla 3.33. Características de la pieza.

Fuente: Elaboración propia.

Material	Aluminio AA 6061
Densidad	2.7 g/cm ³
Masa	0.280773 kg
Área	92830.4 mm ²
Volumen	103990 mm ³
Centro de Gravedad	x=-0.132466 mm y=0 mm z=0 mm

Las fuerzas que actúan sobre este elemento (ver figura 3.30) son 49.050 N en el centro (fuerza transmitida al elemento del peso del subsistema chasis con mecanismo diferencial y del subsistema removedor) y 2 reacciones de 24.525 N a los extremos.

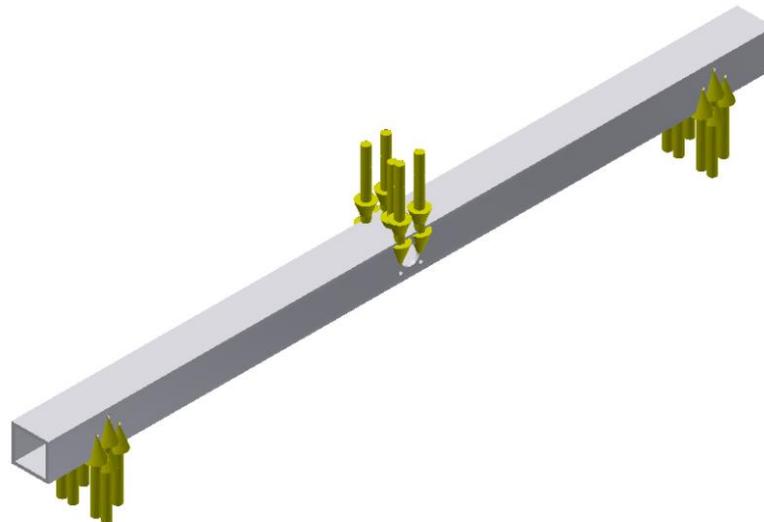


Figura 3.30. Fuerzas aplicadas en la pieza.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.34, se muestran de forma resumida los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos.

Tabla 3.34. Resultados.
Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	103990 mm ³	
Masa	0.280773 kg	
Von Mises Stress	0.0116605 MPa	11.7089 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.017287 mm
Factor de Seguridad	15 ul	15 ul

- Esfuerzo de Von Mises

En la figura 3.31, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 11.7 MPa aproximadamente y se da en la parte central de la viga (donde fue aplicada la fuerza de 49.05 N).

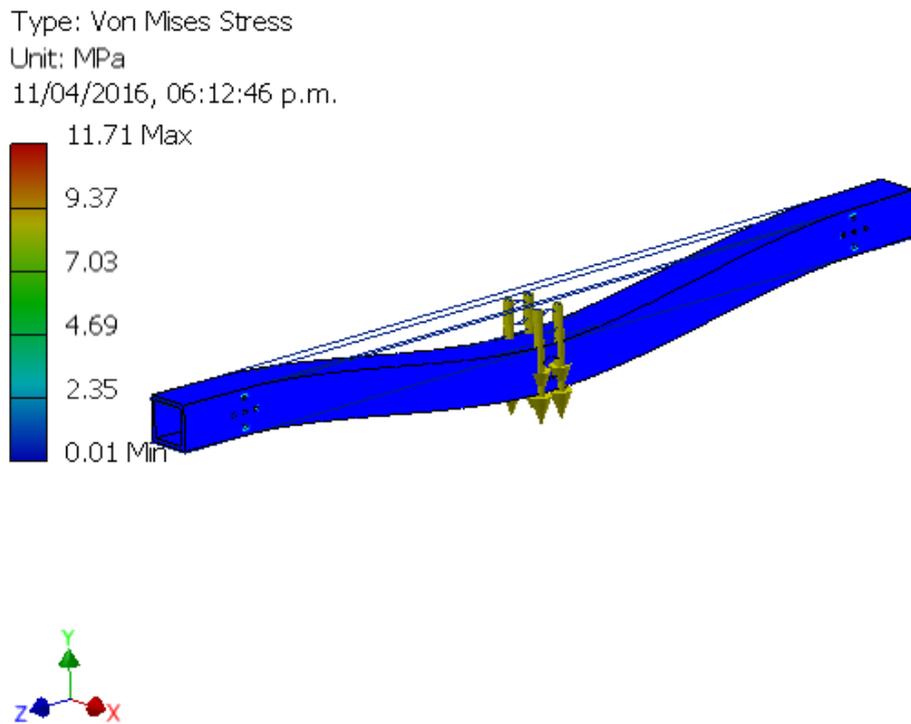


Figura 3.31. Análisis por Von Mises.
Fuente: Elaboración Propia.

- Desplazamiento

En la figura 3.32, se observa que el máximo desplazamiento también se da en la parte central de la viga y es de 0.02 mm aproximadamente.

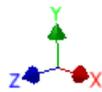
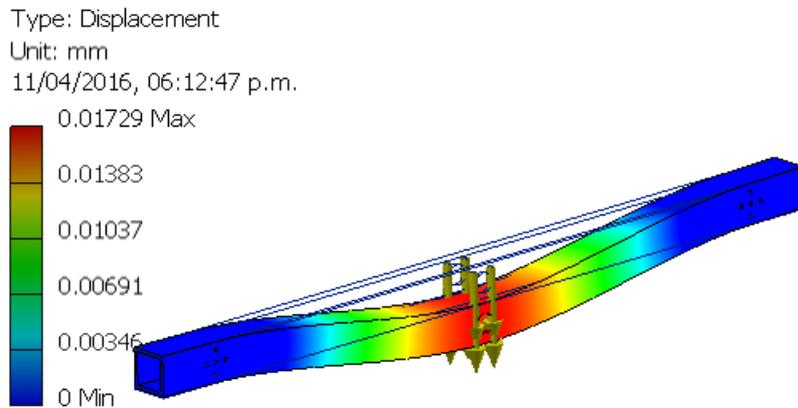


Figura 3.32. Análisis de desplazamiento.
Fuente: Elaboración propia.

- Factor de seguridad

Por último, en la figura 3.33, se observa que se puede tomar un factor de seguridad de hasta 15, por lo que se puede concluir que la pieza no fallará.

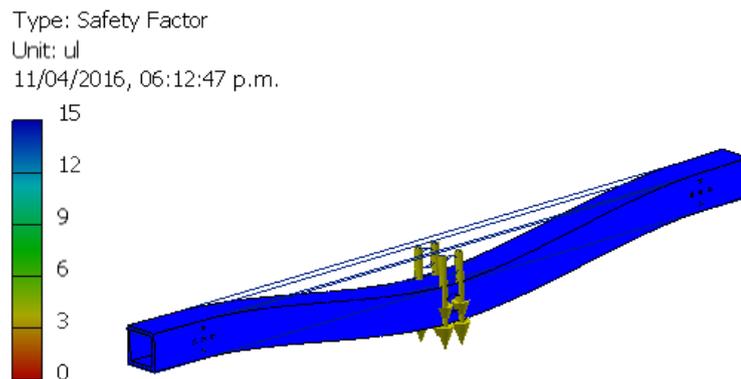


Figura 3.33. Factor de seguridad.
Fuente: Elaboración propia.

Placa soporte de disco removedor:

Como ya se mencionó, esta pieza se encarga de soportar los discos del removedor. Sus características se muestran en la tabla 3.35.

Tabla 3.35. Características de la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

Material	AISI 1020
Densidad	8 g/cm ³
Masa	0.0902806 kg
Área	8977.68 mm ²
Volumen	11285.1 mm ³
Centro de Gravedad	x=16.5578 mm y=87.7537 mm z=0 mm

Se asume que la pieza está empotrada por la parte superior (en realidad está soldada al eje principal del removedor). La fuerza que actúa sobre este elemento (ver figura 3.34) por la parte inferior es 4.848 N (esta fuerza simboliza la reacción del suelo calculada en el anexo B1).

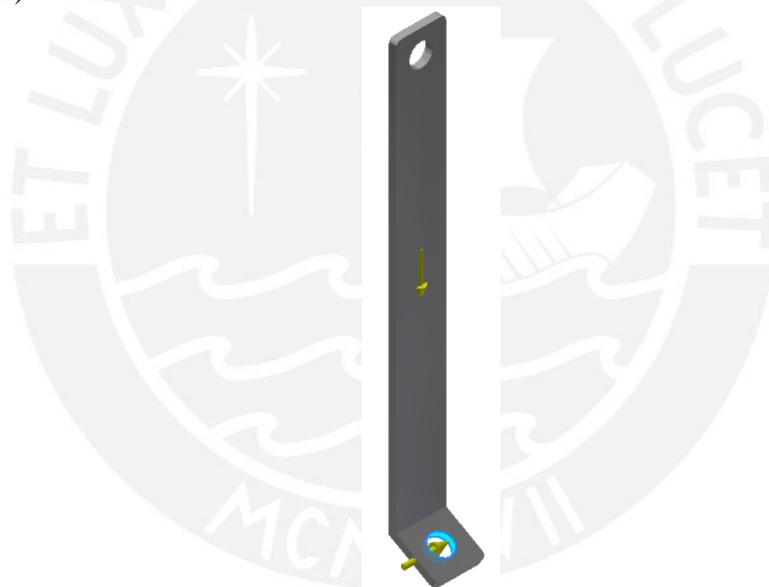


Figura 3.34. Fuerzas aplicadas en la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.36, se muestran de forma resumida los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos.

Tabla 3.36. Resultados.
Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	11285.1 mm ³	
Masa	0.0902806 kg	
Von Mises Stress	0.0104492 MPa	6.00952 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.0323507 mm
Factor de Seguridad	15 ul	15 ul

- Esfuerzo de Von Mises

En la figura 3.35, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 6 MPa aproximadamente y se da en la parte superior del elemento (donde se encuentra soldado al eje principal del subsistema removedor).

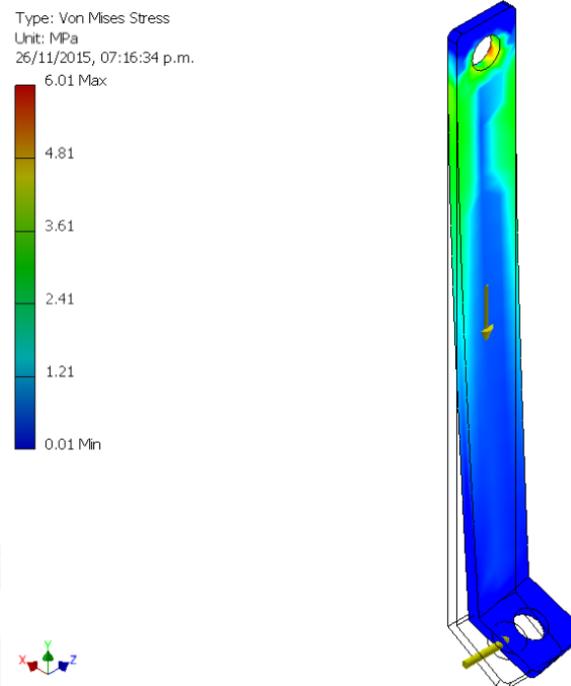


Figura 3.35. Análisis por Von Mises.
Fuente: Elaboración propia.

- Desplazamiento

En la figura 3.36, se observa que el máximo desplazamiento se da en la parte inferior del elemento y es de 0.03 mm aproximadamente.

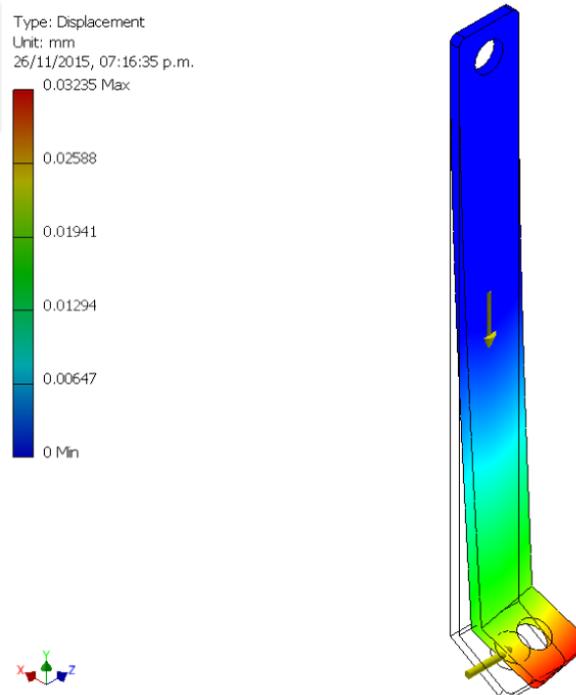


Figura 3.36. Análisis de desplazamiento.
Fuente: Elaboración propia.

- Factor de seguridad

Por último, en la figura 3.37, se observa que se puede tomar un factor de seguridad de hasta 15, por lo que se puede concluir que la pieza no fallará.

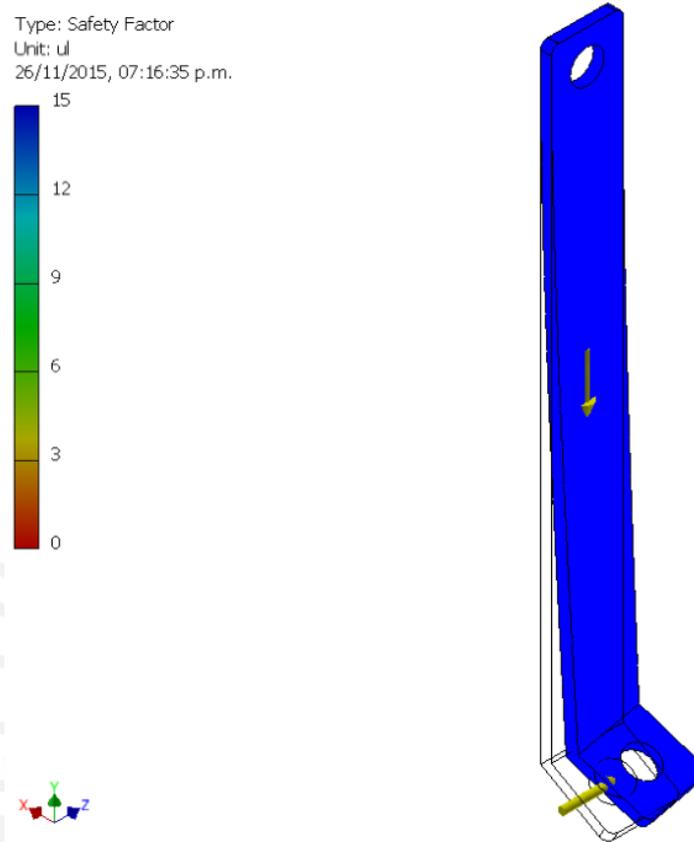


Figura 3.37. Factor de seguridad.
Fuente: Elaboración propia.

Placa de unión rueda con servo:

Como ya se mencionó, esta pieza se encarga de unir la rueda con el servomotor. Sus características se muestran en la tabla 3.37.

Tabla 3.37. Características de la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

Material	Aluminio AA 6061
Densidad	2.7 g/cm ³
Masa	0.0994652 kg
Área	27444.8 mm ²
Volumen	36839 mm ³
Centro de Gravedad	x=0.211106 mm y=10.2483 mm z=0.0000155759 mm

Las fuerzas que actúan sobre este elemento (ver figura 3.38) son las reacciones vistas en la viga (24.525 N) y el momento torsor (0.330 Nm) del servomotor al transmitir giro a la rueda, calculado en el anexo B1.



Figura 3.38. Fuerzas aplicadas en la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.38, se muestran de forma resumida los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos.

Tabla 3.38. Resultados.
Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	36839 mm ³	
Masa	0.0994652 kg	
Von Mises Stress	0.000938887 MPa	3.98384 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.00372858 mm
Factor de Seguridad	15 ul	15 ul

- Esfuerzo de Von Mises

En la figura 3.39, se puede observar que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 4 MPa aproximadamente y se da en la parte central del elemento (donde fue aplicado el momento torsor y la fuerza de 24.525 N).

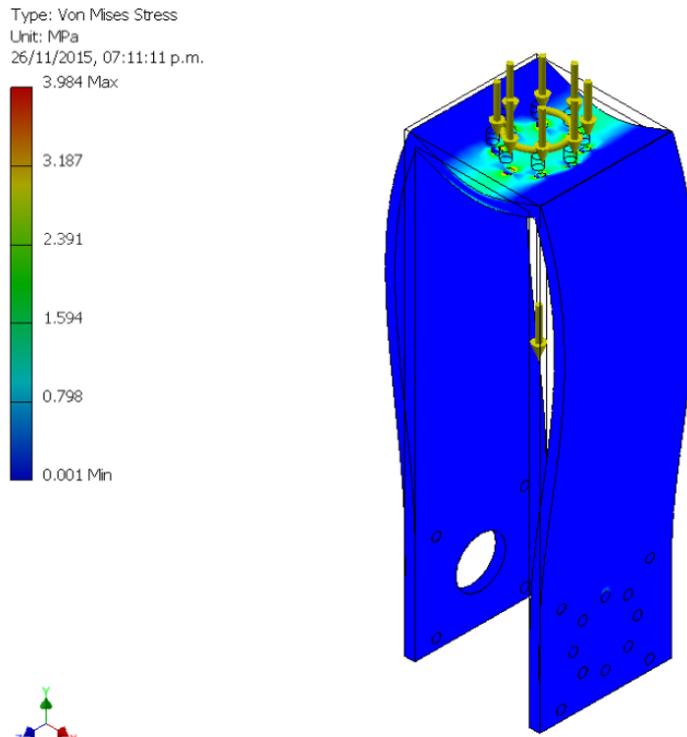


Figura 3.39. Análisis por Von Mises.
Fuente: Elaboración propia.

- Desplazamiento

En la figura 3.40, se observa que el máximo desplazamiento se da a los lados del elemento y es de 0.004 mm aproximadamente.

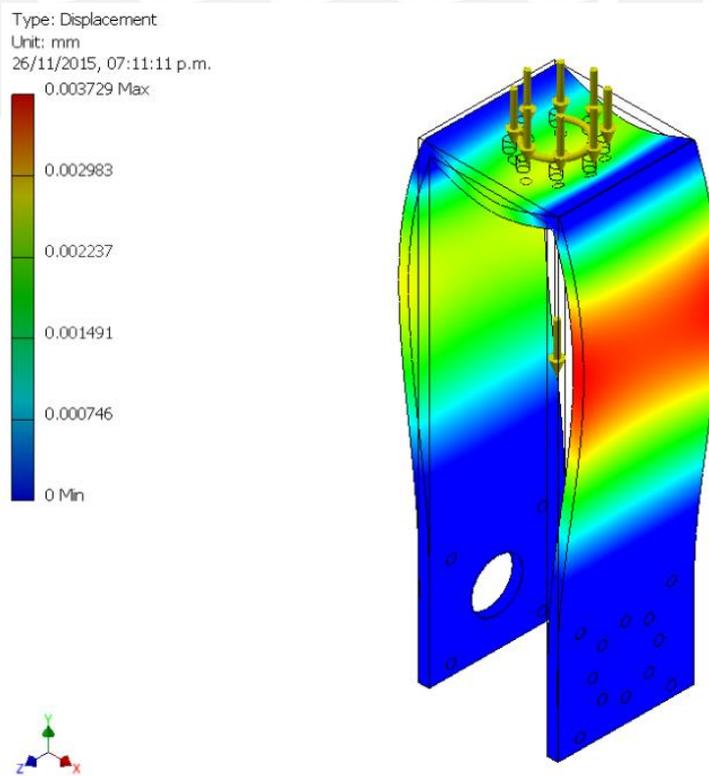
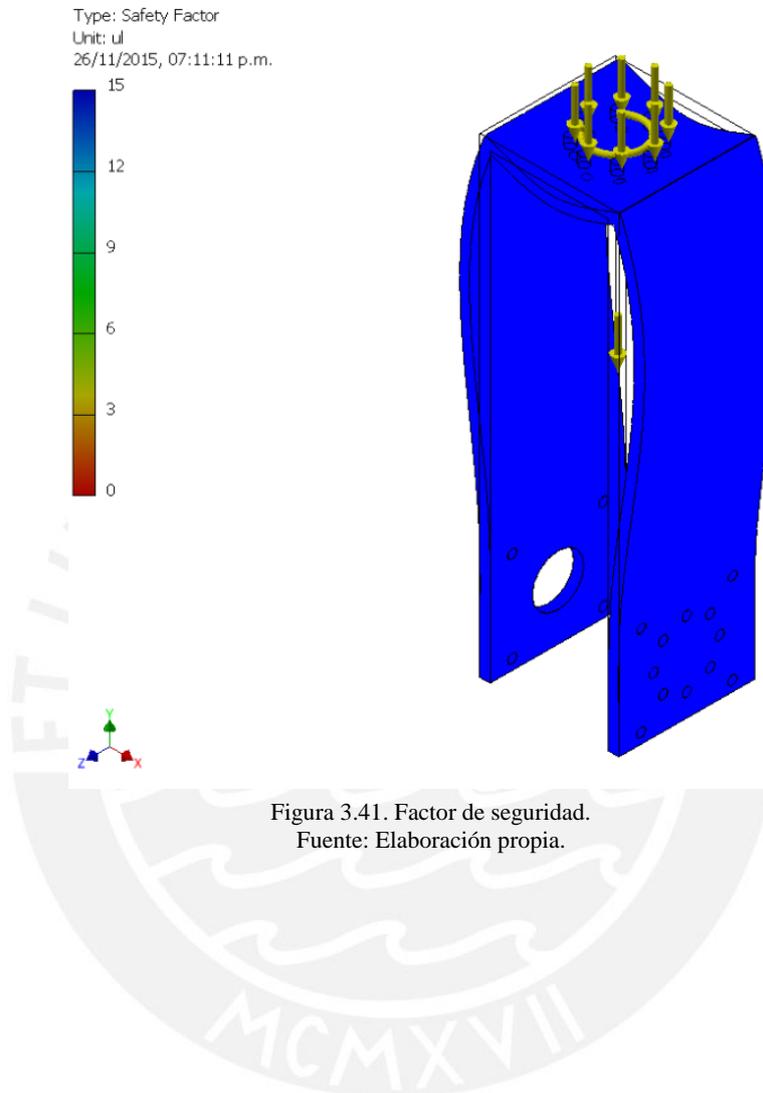


Figura 3.40. Análisis de desplazamiento.
Fuente: Elaboración propia.

- Factor de seguridad

Por último, en la figura 3.41, se observa que se puede tomar un factor de seguridad de hasta 15, por lo que se puede concluir que la pieza no fallará.



3.3. Diseño de control

3.3.1. Diagramas de flujo

A continuación se describirán los diagramas de flujo del sistema relacionados con la programación de los microcontroladores.

La lógica de control sobre cómo se ingresan, procesan y muestran datos hacia el usuario no se considera en este trabajo. Se asume que el usuario ya envió la trayectoria definida hacia el micro-controlador. Solo se menciona el envío de información al usuario, mas no su lógica de recepción.

En la figura 3.42, se muestra el diagrama de flujo general del sistema, empezará con la función de “Iniciar Sistema” (se explicará más adelante), luego entrará a la función de “Iniciar Recorrido y Remoción de Malezas”, la cual se encarga del desplazamiento del móvil desde el punto de partida hasta el punto final, así como realizar la tarea de remoción de malezas entre plantas. Finalmente, se envía la trayectoria real que siguió el móvil para que el usuario pueda compararla con la que se había definido.

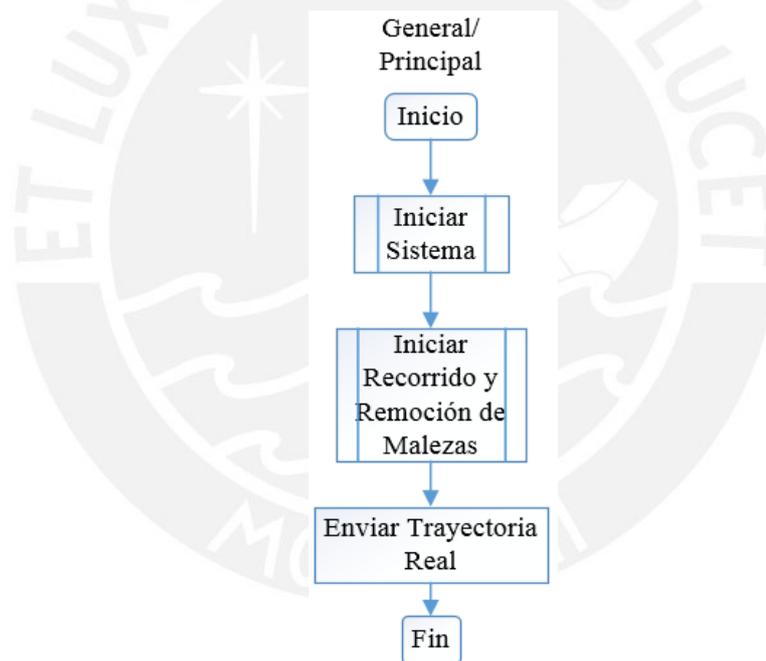


Figura 3.42. Diagrama de flujo general.
Fuente: Elaboración propia.

Iniciar sistema

La función para iniciar el sistema (ver figura 3.43) se encarga de configurar los pines de entrada y salida del Arduino, así como inicializar las variables correspondientes. Luego pasa a una etapa de espera, donde el sistema se quedará esperando la trayectoria a seguir por parte del usuario. Una vez recibido el camino definido, el sistema empezará su movimiento y no podrá seguir otra trayectoria a menos que se reinicie el Arduino. Si no se recibe una trayectoria después de un tiempo límite, se finalizará el programa principal yendo de frente a la última instrucción, esto se hace para evitar problemas propios del uso del sistema.

Iniciar Sistema

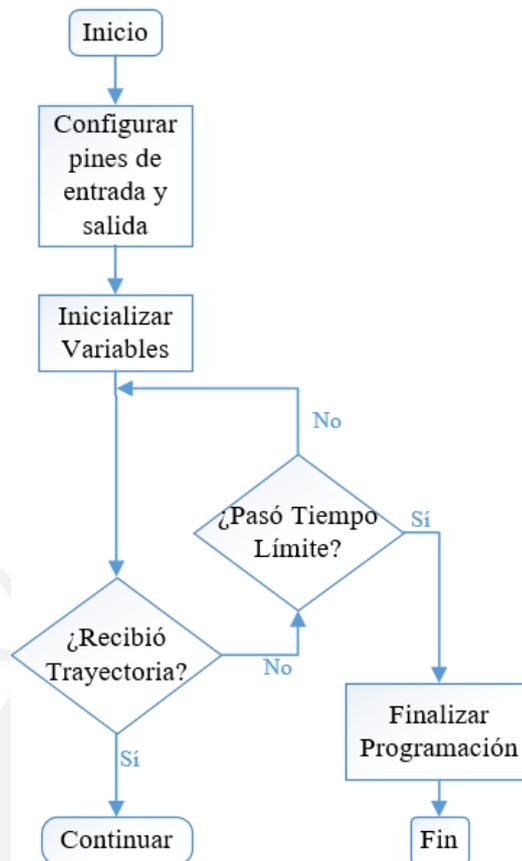


Figura 3.43. Función “Iniciar Sistema”.
Fuente: Elaboración propia.

Iniciar recorrido

En esta función (ver figura 3.44) se realizan los algoritmos de control más importantes del sistema mecatrónico. Empieza con el procesamiento de dos procesos en paralelo, por un lado está el lazo de control de detección de las plantas del cultivo, y por otro lado el lazo de control de seguimiento de trayectoria del vehículo.

En el primero, se procesa la imagen proveniente de la cámara y se verifica constantemente si se ha detectado una planta (algodón). En caso sea afirmativa la respuesta, se localiza la posición de la planta y, junto con la información de la posición real del móvil proveniente del otro lazo de control, se controla el accionamiento del removedor de malezas para que se repliegue o levante y evite el contacto con la planta. El removedor seguirá en ese estado hasta que la cámara le indique al microcontrolador que no se ha detectado una planta, es en ese momento en que se controla el accionamiento del removedor para que se despliegue o baje y vuelva a entrar en contacto con la tierra del cultivo. El presente lazo se repite hasta que el móvil haya llegado al final de su recorrido.

En el segundo lazo de control, se estima la posición real del móvil con los sensores GPS e IMU, se determina el error que existe respecto a la posición en la que debería estar (se analiza cuánto se ha desviado el móvil del camino a seguir). Luego se corrige dicho error, lo cual consiste en una lógica de control que se explicará más adelante. El presente lazo se repite hasta que el móvil haya llegado al final de su camino.

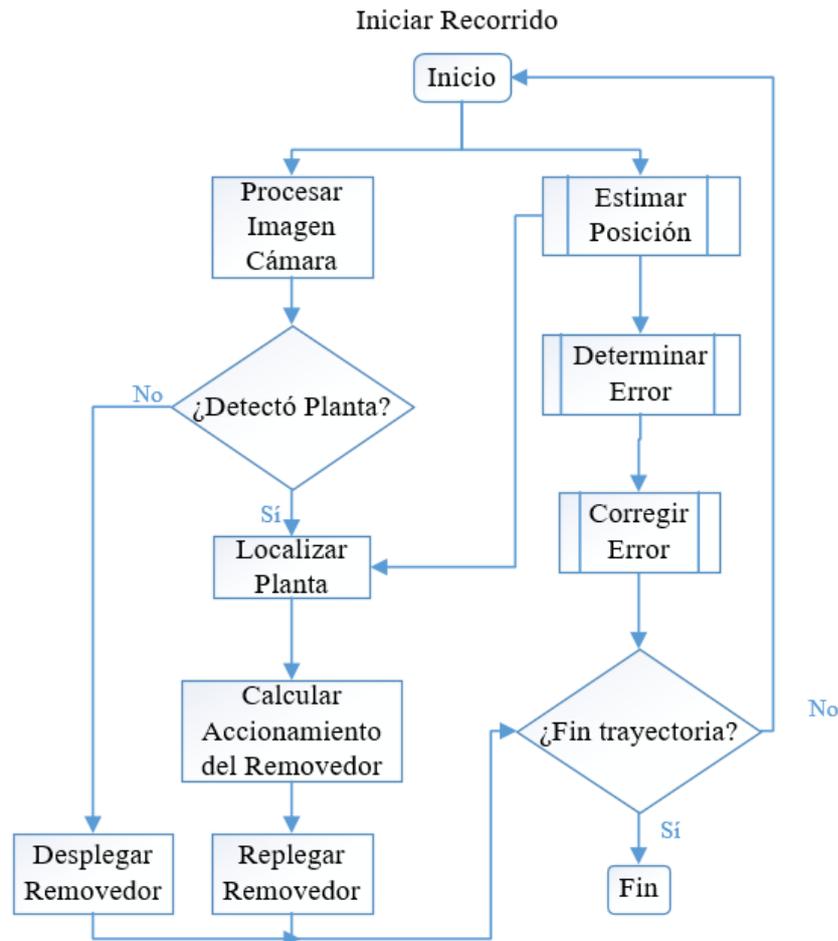


Figura 3.44. Función “Iniciar Recorrido”.
 Fuente: Elaboración propia.

Estimar posición

En esta función (ver figura 3.45), se obtiene la posición global proveniente del GPS y 9 variables provenientes del IMU (tres variables por cada sensor; acelerómetro, giroscopio y magnetómetro o compás), dichas variables son procesadas en el microcontrolador para obtener una posición estimada con la información proveniente del IMU. Cuando se tienen ambas posiciones, éstas pasan por un filtro de Kalman que combina ambos modelos en uno solo y determinar así la posición real del móvil. Dicha posición se envía al usuario a través del XBee para que este pueda supervisar el móvil en tiempo real. Debido a que el GPS trabaja a bajas frecuencias, es posible que en un instante no genere información de la posición del móvil, por lo que para hallar la posición real de éste el microcontrolador se basaría exclusivamente en la información proveniente del IMU.

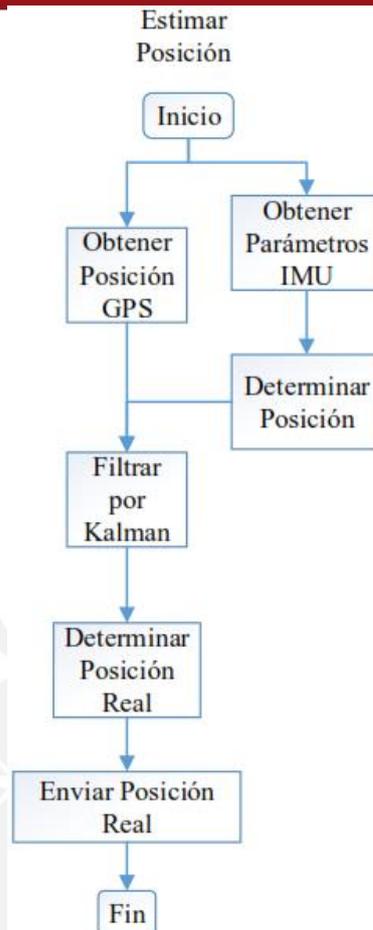


Figura 3.45. Función “Estimar Posición”.
Fuente: Elaboración propia.

Determinar error

El error se determina simplemente de la diferencia entre la posición real del móvil y la posición definida por el usuario en la trayectoria (ver figura 3.46). Se creó una función que realice esto solo para que el programa principal se encargue de llamar a funciones.



Figura 3.46. Función “Determinar Error”.
Fuente: Elaboración propia.

Corregir error

Esta última función (ver figura 3.47) consiste en la corrección de movimientos que debe realizar el móvil para seguir en el camino. Para esto se analiza la cinemática del móvil con los datos de posición real y orientación; además se requiere conocimiento de las dimensiones del móvil. De esta forma se puede determinar los movimientos del móvil a través de cambios en la dirección de las ruedas y en la velocidad de éstas.

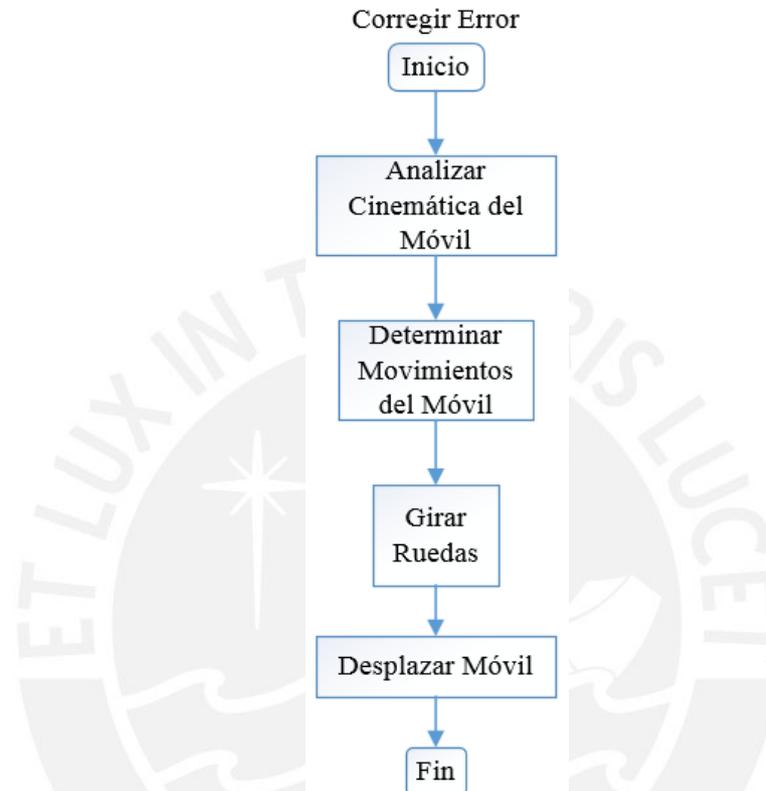


Figura 3.47. Función “Corregir Error”.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Arquitectura de control

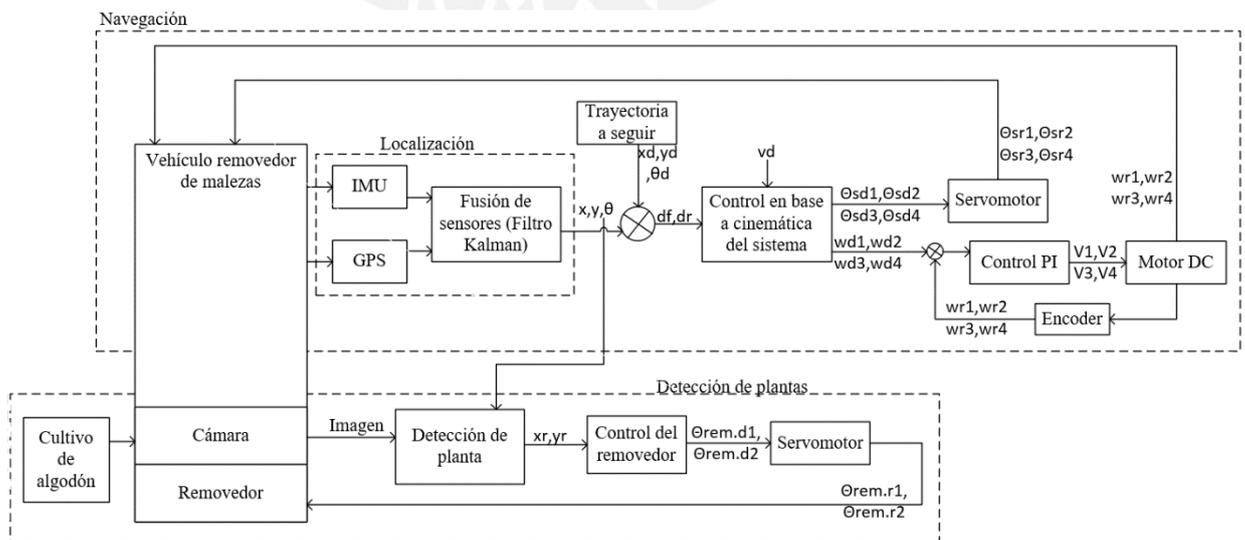


Figura 3.48. Arquitectura de control.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.48, se observa el diagrama de control del sistema con los bloques de localización, navegación y detección de plantas.

Bloque de localización

Los sensores ubicados en el vehículo (IMU y GPS) constantemente envían información del sistema para que a través del filtro de Kalman se tenga una posición real del móvil en el cultivo.

Bloque de navegación

Dicha posición (la cual está determinada a través de coordenadas x, y y una orientación θ) se compara con la trayectoria que debería seguir el móvil y el error resultante (“offset” en dos puntos del móvil respecto al camino a seguir representados como df y dr) entra a la lógica de control que busca reducirlo tomando en consideración la velocidad deseada (v_d) del móvil (se explicará más adelante). Para reducir el error se envían señales de control a los actuadores que se encuentran en las ruedas. Se envía una posición angular a los servomotores (ángulo de servomotor deseado - θ_{sd}), los cuales no necesitan un lazo de control debido a que ya existe uno dentro de su hardware. Dicho giro (ángulo de servomotor real - θ_{sr}) afectará la orientación del móvil que será detectada por los sensores ya mencionados, cerrando un lazo de control. Lo mismo sucede con los motores DC, encargados del desplazamiento del móvil, a los cuales se le envía una velocidad angular deseada (w_d); no obstante, estos actuadores si necesitan un lazo de control (a través de encoders) que permita mantener una velocidad fija en ellos y en el móvil (su controlador PI recibe la velocidad angular deseada - w_d y envía dicha información en función de voltaje), el desplazamiento resultante de velocidad angular real (w_r) afectará la posición del móvil que será detectada por los sensores ya mencionados, cerrando otro lazo de control.

La razón de utilizar un control PI en los motores DC se debe a que un control P puede darte un error constante en estado estable y nunca llegar al set point deseado (para la navegación es importante reducir el error). En cuanto a un control PD, implementar una acción derivativa ocasiona que el sistema (el móvil) sea muy sensible al ruido (lo amplifica) y pueda saturar al actuador (motor). Por último, un control PID puede ser mejor al incluir las ventajas de las tres acciones (proporcional, integral y derivativa) pero puede haber inconvenientes en el momento de sintonizar los valores de dichas acciones; esta solución es más compleja, por lo que se decidió escoger el control PI.

Bloque de detección de plantas

Finalmente, la cámara se encarga de detectar las plantas en el cultivo con el fin de accionar el removedor en el momento adecuado para evitarlas (todo esto se logra en base al conocimiento de las dimensiones del móvil y a la localización de las plantas respecto al vehículo). En este caso, se hace uso de un lazo de control abierto, donde x_r, y_r representa la posición relativa de la planta al móvil; $\theta_{rem,d}$, el ángulo del removedor deseado; y $\theta_{rem,r}$, el ángulo real.

3.3.3. Sistema de localización

Para obtener la posición real del móvil, se usarán los datos provenientes del sensor IMU y el sensor GPS. El algoritmo a usar (Filtro de Kalman) para combinar dichos datos en una sola posición estimada se elige luego de revisar distintos métodos presentados en trabajos similares [16]. Al usar este filtro se logra obtener una medición más precisa de la localización del móvil al compensar las deficiencias de cada sensor (el sensor IMU

acumula error al estimar posición relativa y el GPS presenta una precisión de 2.5 metros; si bien este valor puede ser grande, al momento de implementar el filtro y considerando la baja velocidad del móvil se puede llegar a una mejor precisión final). Asimismo, el algoritmo a usar permite incorporar más sensores, en caso sea necesario, sin la necesidad de reconstruir el filtro. A continuación se presentan las principales ecuaciones involucradas en el diseño del Filtro de Kalman.

Sea el modelo de la planta:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Fx(k) + w(k), \\ Q(k) &= E[w(k)w(k)^T],\end{aligned}$$

donde $x(k)$ es el vector de estados, $w(k)$ es el ruido gaussiano blanco asumido, F es la matriz de transición de estados, y Q la matriz de covarianza del ruido gaussiano blanco.

Se puede asumir las medidas de un número N de sensores como:

$$z_i(k) = H_i x(k) + b_i(k), \quad i = 1, \dots, N,$$

donde $z_i(k)$ es el vector de medida del sensor i , $b_i(k)$ es el ruido gaussiano blanco asumido del sensor i , H_i es la matriz de medida asociada al sensor i ; y N es el número de sensores.

Entonces el Filtro de Kalman para varios sensores puede ser dividido en una etapa de estimación y una de predicción. Como se mencionó anteriormente, lo que se quiere es llegar a un modelo final donde se combinen las mediciones de todos los sensores (se pueden incluir más para mejorar la navegación) y así obtener la posición del móvil con mayor precisión.

Etapa de estimación:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k|k) &= \hat{x}(k|k-1) + \sum_{i=1}^N K_i(k)[z_i(k) - H_i \hat{x}(k|k-1)], \\ K_i(k) &= P(k|k)H_i^T R_i^{-1}(k),\end{aligned}$$

donde K_i representa la ganancia del filtro asociada al sensor i y la incertidumbre del estimado está dado por:

$$P^{-1}(k|k) = P^{-1}(k|k-1) + \sum_{i=1}^N H_i^T R_i^{-1}(k)H_i.$$

Etapa de predicción:

$$\hat{x}(k+1|k) = F\hat{x}(k|k),$$

$$P(k+1|k) = FP(k|k)F^T + Q(k).$$

3.3.4. Sistema de navegación

Tomando como referencia el control de trayectoria desarrollado en trabajos similares [10], se planteó una lógica de control del móvil en base a su cinemática primordialmente.

Debido a que el vehículo consta de 4 ruedas independientes, el control puede ser complicado pero se simplifica si se considera solo el control de dos puntos de dirección, uno en la parte delantera y otra en la parte posterior. Entonces, en vez de controlar 4

ruedas independientes, se controla de la misma forma 2 conjuntos de 2 ruedas independientes (ver figura 3.49). La lógica de control consiste en minimizar la distancia entre el camino a seguir y los dos puntos de dirección, entonces, el control se basa primordialmente en la dirección de las ruedas. Para esto se tomará el centro de rotación instantáneo del móvil (el cual cambiará constantemente dependiendo de la orientación del vehículo y “offset” con el camino a seguir).

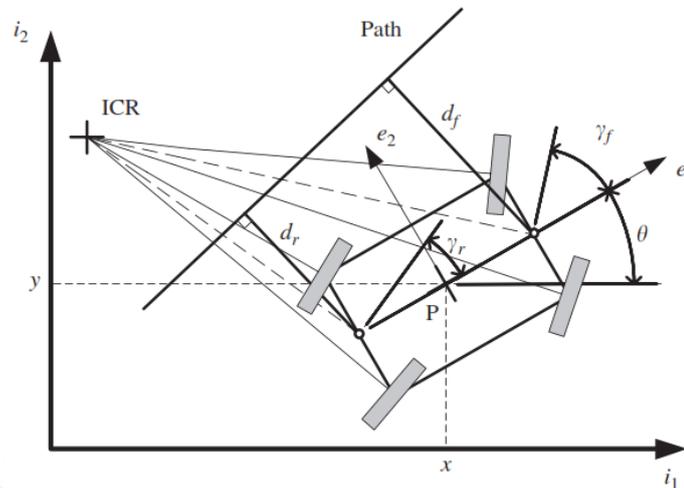


Figura 3.49. El control consiste en minimizar las distancias d_f y d_r independientemente, cuyos signos indican en qué lado del camino se encuentran los puntos de dirección. x , y , θ representan la posición del vehículo. γ_f , γ_r son las direcciones de los dos puntos a seguir. ICR representa el centro instantáneo de rotación del móvil. Fuente: [10].

Con las distancias d_f y d_r se obtienen los ángulos γ_f , γ_r .

$$\gamma_f = \begin{cases} \frac{k_p d_f \pi}{2} - \theta, & |d_f| \leq \frac{1}{k_p}, \\ \frac{\text{sign}(d_f) \pi}{2} - \theta, & \text{otro caso.} \end{cases}$$

donde θ es la orientación del móvil y k_p la ganancia que se establece para que cuando d_f sobrepase el valor de $1/k_p$, la rueda se mueva perpendicularmente hacia el camino (“path” en la figura 3.49). Lo mismo se aplica para γ_r .

La localización del centro instantáneo de rotación se determina con:

$$[x_{ICR} y_{ICR}]^T = \begin{cases} [10^7 \sin(\gamma_f) \ 10^7 \cos(\gamma_f)], & \gamma_r = \gamma_f, \\ [-0.51/\tan(\gamma_f)], & \gamma_r = 0, \\ \left[\begin{matrix} 0.5 + \frac{0.5 \tan(\gamma_f)}{\tan(\gamma_r)} & 0.5 - x_{ICR} \\ 1 - \frac{\tan(\gamma_f)}{\tan(\gamma_r)} & \tan(\gamma_r) \end{matrix} \right], & \text{otro caso.} \end{cases}$$

El siguiente paso consiste en transformar la localización del centro instantáneo de rotación a la localización de las ruedas, la cual será perpendicular a la distancia entre ellas. En la figura 3.50, la zona gris indica las limitaciones de giro de la rueda. En el presente trabajo, los servomotores pueden girar $\pm 45^\circ$ pero con programación adicional pueden girar hasta 180° .

El proceso de detección se dividirá en dos partes: segmentación y diferenciación. La primera parte consiste en la separación o distinción entre suelo (tierra) y plantas (no solo se cuenta el algodón sino también las malezas que pueda haber en el cultivo). Para esto, las imágenes capturadas por la cámara (Logitech Webcam C920) pasan por un filtro infrarrojo antes de ser transformadas a escala de grises. La razón de filtrarlas de esta manera es que existe un mayor contraste entre las plantas (presentan más brillo) y el suelo, a diferencia de las imágenes que no se encuentren en este espectro [13] [15]. Al tener un mayor contraste en la imagen, se facilita el uso de un valor umbral para separar los elementos ya mencionados. Previamente, se realiza una operación morfológica en la imagen (apertura) y el resultado se resta de la imagen original para disminuir los efectos que pueda haber por cambios en la iluminación (movimiento del Sol). Luego, con un umbral fijo, se obtiene una imagen binaria donde las plantas son de color blanco y el resto (suelo) es negro.

La segunda parte consiste en comparar el centroide de cada elemento obtenido (fondo blanco) con las posiciones donde deberían estar las plantas según un patrón (ver figura 3.52) creado en base a la información de la distancia entre plantas y entre surcos del cultivo y el ángulo de la cámara con respecto al móvil. Los elementos que tengan un tamaño cercano al de los círculos del patrón y un centroide cercano a las posiciones del patrón se considerarán como plantas de algodón, lo demás se tomará como maleza. A pesar de que en este ejemplo se tiene 3 columnas, solo será importante detectar las plantas en la columna central ya que es en ella donde actúa el removedor. Asimismo, se tiene la información de que la distancia entre surcos es de 120 cm y la distancia entre plantas es de 40 cm.

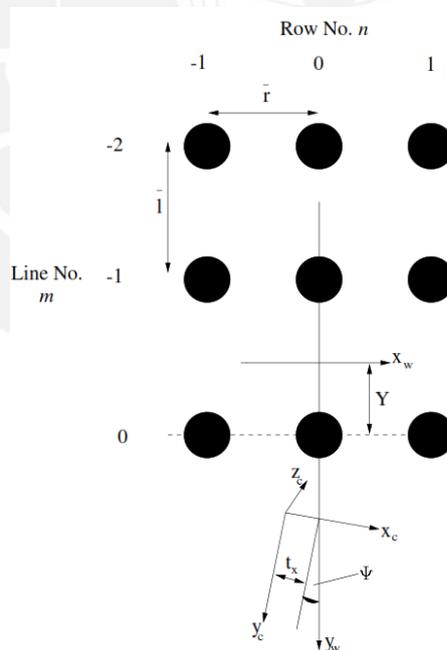


Figura 3.52. Patrón de posición de las plantas en el cultivo.
Fuente: [13].

Los ejes x_w, y_w pertenecen al sistema de coordenadas solidario al móvil (los ejes se mueven conforme lo hace éste), los ejes x_c, y_c, z_c pertenecen al sistema de coordenadas de la cámara sujeta al móvil (ver figura 3.53), el ángulo ψ es la desviación del vehículo, el cual se puede asumir pequeño debido a que el móvil se mueve siguiendo el surco (lo cual permite asumir que $\cos \psi = 1$ y $\sin \psi = \psi$), Y es la distancia del eje x_w con el círculo

(planta) que se encuentra más cercano al borde inferior de la imagen, n es el número de columnas, m es el número de fila, \bar{r} es la distancia entre surcos y \bar{l} es la distancia entre plantas.

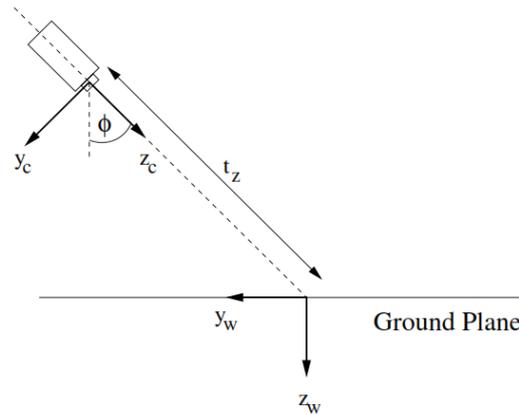


Figura 3.53. Coordenadas de la cámara sujeta al móvil.
Fuente: [13].

Para poder determinar qué plantas cumplen con el patrón de posiciones obtenido se necesita realizar una transformación de coordenadas debido a la posición en que se encuentra la cámara (tomando en consideración que esta no gira en ningún sentido, sino se mantiene en esa posición). Se llega a las siguientes ecuaciones que generan coordenadas de imagen en píxeles (x_f, y_f) (se recuerda que se tomó como referencia la fuente [13]).

$$x_f(t_x, Y, \psi, \bar{r}, \bar{l}, m, n) = \frac{f}{d_x} \frac{n\bar{r} + \psi(m\bar{l} + Y) + t_x}{n\bar{r}\psi\sin\phi - (m\bar{l} + Y)\sin\phi + t_z} + C_x,$$

$$y_f(t_x, Y, \psi, \bar{r}, \bar{l}, m, n) = \frac{f}{d_y} \frac{(m\bar{l} + Y - \psi n\bar{r})\cos\phi}{n\bar{r}\psi\sin\phi - (m\bar{l} + Y)\sin\phi + t_z} + C_y,$$

Donde: d_x es la dimensión horizontal de la resolución de la cámara en píxeles.
 d_y es la dimensión vertical de la resolución de la cámara en píxeles.
 f es la longitud focal de la lente de la cámara.
 C_x y C_y son las coordenadas del centro de la imagen.

3.4. Integración del sistema mecatrónico

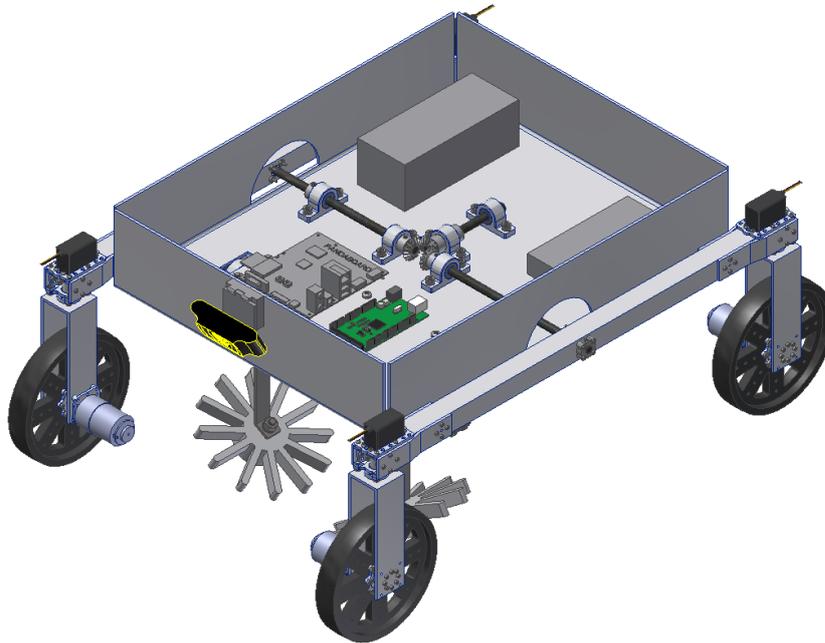


Figura 3.54. Sistema mecatrónico.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.54, se puede observar el sistema mecatrónico. La parte mecánica se compone por los subsistemas rueda, removedor completo y chasis (en el cual se incluye el mecanismo diferencial y las vigas). Los actuadores se albergan en las ruedas (motores DC y servomotores Hitec) y en el removedor (servomotores Dynamixel), mientras que los sensores (IMU, GPS, cámara Logitech y XBee), procesadores (Arduinos Mega y PandaBoard) y baterías se albergan en el chasis.

En cuanto al funcionamiento del sistema, en primer lugar, se coloca el móvil en el punto de partida de la trayectoria a seguir (en el inicio del cultivo). Es en este momento que la lógica explicada en los diagramas flujo empieza. Una vez recibida una trayectoria, el móvil se desplazará a través de los surcos con el removedor tipo disco (“finger weeder”) desplegado a una profundidad de 4 cm en la tierra (esta distancia pertenece al rango de trabajo del removedor seleccionado). La cámara detectará constantemente las plantas en el surco para que el removedor se repliegue o levante y las evite, cabe resaltar que no es necesario que el “finger weeder” evite las plantas mientras remueve las malezas ya que se parte de un supuesto de que el cultivo tiene una raíz lo suficientemente fuerte para aguantar la remoción (a diferencia de las malezas); no obstante, se plantea la posibilidad de que el removedor evite las plantas para garantizar el bienestar del cultivo.

Los sensores para la navegación constantemente detectan la posición del móvil para que éste se mantenga en el camino. Para garantizar una buena precisión de seguimiento de trayectoria se definió una velocidad de 2 km/h para el vehículo; asimismo, se diseñó el sistema para que se pueda desplazarse durante 1.5 horas, lo que con la velocidad mencionada y la distancia de 120 cm entre surcos y 40 cm entre plantas equivale a 0.35 ha. Una vez se haya recorrido la trayectoria y distancia deseada (seleccionada en base al tiempo de funcionamiento), las baterías del vehículo pueden recargarse para iniciar otro recorrido.

4. COSTOS

4.1. Costos por componentes

En el presente subcapítulo, se presentan los costos de los componentes importados (se dividió en componentes electrónicos y componentes mecánicos). Para la estimación del costo de envío se asumirá que equivale a 0.6 del subtotal (esto incluye gastos por aduanas, envío, etc). Cabe resaltar que si bien no se trabajó en los diagramas eléctricos un circuito de protección y un cargador para las baterías, esto se debe a que dichos elementos son comprados y no influyeron en el diseño general del sistema, solo se mencionan sus costos.

4.1.1. Electrónica

Tabla 4.1. Tabla de componentes electrónicos importados.
Fuente: Elaboración propia.

Componente	Precio Unitario (\$)	Cantidad	Proveedor	Precio Total (\$)
Arduino Mega 2560	45.95	2	Sparkfun	91.9
PandaBoard	189.18	1	Digikey	189.18
Sensor IMU	19.95	1	Adafruit	19.95
Sensor GPS	39.95	1	Sparkfun	39.95
XBee Pro Series1	37.95	1	Sparkfun	37.95
Driver Dual MC33926	29.95	2	Pololu	59.9
Motor DC 100 RPM	39.95	4	Pololu	159.8
Batería 5 Ah	23.20	1	Hobbyking	23.20
Batería 12 Ah	124.26	1	Hobbyking	124.26
Dynamixel AX-12A	40.41	2	TrossenRobotics	80.82
Hitec HS-5485HB	19.99	4	Servocity	79.96
Logitech Webcam C920	49.99	1	Amazon	49.99
Módulo de protección de circuito 11.1 V (4 A)	8.5	1	Batteryspace	8.5
Módulo de protección de circuito 22.2 V (10 A)	27.95	1	Batteryspace	27.95
Fuente de 15 V/ 7 A	13.99	1	Hobbyking	13.99
Cargador LiPo (1-5 A)	15.58	1	Hobbyking	15.58
Subtotal	\$ 1022.88 o S/. 3447.1 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			
Envío	\$ 613.73 o S/. 2068.3 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			
Total	\$ 1636.61 o S/. 5515.4 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			

4.1.2. Mecánica

 Tabla 4.2. Tabla de componentes mecánicos importados.
 Fuente: Elaboración propia.

Componente	Precio Unitario (\$)	Cantidad	Proveedor	Precio Total (\$)
Rueda	9.99	4	Servocity	39.96
Engranaje Cónico	44.19	3	McMasterr-Carr	132.57
Collar	2.25	3	McMasterr-Carr	6.75
Chumacera	12.47	8	McMasterr-Carr	99.76
Postes para PCB	0.06	100	AliExpress	6
Rodamiento rígido de bolas 115-2z	6.34	2	McMasterr-Carr	12.68
Acople Rueda	4.99	8	Servocity	39.92
Acople Eje Viga	4.99	6	Servocity	29.94
Acople Motor	4.99	4	Servocity	19.96
Soporte Servo	3.74	4	Servocity	14.96
Acople de Elevación	4.99	8	Servocity	39.92
Acople Eje Servo	6.99	4	Servocity	27.96
Acople con Rodamientos	5.24	4	Servocity	20.96
Acople giratorio rueda	4.89	4	Servocity	19.56
Subtotal	\$ 590.86 o S/. 1991.2 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			
Envío	\$ 354.52 o S/. 1194.7 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			
Total	\$ 945.38 o S/. 3185.9 (cotización del 3 de diciembre del 2015)			

4.2. Costos de mano de obra

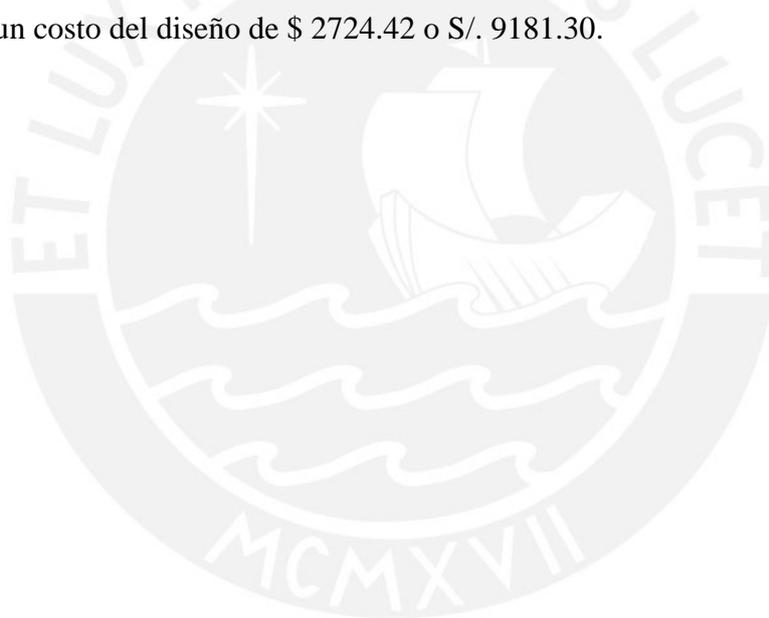
Los costos de mano de obra corresponden principalmente a la impresión 3D del disco removedor (“finger weeder”), el cual se cotizó con la sala VEO de la Pontificia Universidad Católica del Perú; al doblado y corte de las placas; y a los mecanizados de los ejes, los cuales se cotizaron con EPLI SAC.

Pieza	Material	Cantidad	Precio Total (S/.)
Disco removedor	ABS	2	S/. 130
Conjunto de piezas (8 piezas)	Aluminio/acero	1	S/. 350
Total			S/. 480

El costo por el diseño en base a horas trabajadas no se tomó en cuenta en el presente trabajo, por lo que el costo total del sistema consiste en la suma de los costos por componentes y por mano de obra. Se tomará el cambio de dólar a 3.37.

Costo Total = 1636.61 + 945.38 + 480/3.37 = 2724.42 dólares.

Se estima un costo del diseño de \$ 2724.42 o S/. 9181.30.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Culminado el desarrollo del presente trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se pudo diseñar un sistema automático capaz de realizar un control mecánico de malezas entre plantas sin dañar al cultivo o requerir la ayuda de un operario, cumpliendo con el objetivo general del proyecto.
- La metodología empleada (definida en los objetivos específicos trazados) facilitó el diseño del sistema debido al planteamiento de un concepto de solución óptimo a partir de la información bibliográfica y la selección de alternativas distribuidas en funciones específicas.
- Se logró diseñar un removedor económico que pueda atacar a las malezas de forma satisfactoria. No obstante, se consideró que el algodón era lo suficientemente fuerte para soportar dicha tarea, por lo que la decisión del agricultor sobre en qué momento usar el sistema es crucial.

Asimismo, se tienen las siguientes recomendaciones:

- Dado que no se encontraron productos comerciales similares a lo diseñado, el costo no tuvo mucha influencia en el diseño, este puede ser optimizado para poder disminuir costos.
- Si bien solo se usó un sensor IMU y un sensor GPS para la localización del móvil, dado el algoritmo usado, se pueden incluir otros sensores que permitan mejorar la precisión en el seguimiento de la trayectoria para proyectos similares.
- Debido a que no se desarrolló un prototipo, no se pudo demostrar qué tan preciso es el sistema de navegación. Se recomienda simulaciones del filtro de Kalman empleado para observar cómo mejora la precisión de los sensores (IMU y GPS) en conjunto, así como simulaciones de los algoritmos planteados (tanto en la navegación como en la detección de plantas).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CERNA, Luis Antonio
2013 *Ciencia y Tecnología de Malezas*. Trujillo: Fondo Editorial PAO.
- [2] VERAMENDI, Teodorico
2011 *Manejo Integrado del Algodonero*. Material del curso-taller *Jornada de capacitación UNALM-AGROBANCO*. Piura: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [3] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO)
Manejo de malezas en algodón. Consulta: 5 de septiembre de 2015.
[http://www.fao.org/docrep/t1147s/t1147s0l.htm#manejo de malezas en algodón](http://www.fao.org/docrep/t1147s/t1147s0l.htm#manejo%20de%20malezas%20en%20algod%C3%B3n)
- [4] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO)
Recomendaciones para el manejo de malezas. Consulta: 6 de septiembre de 2015.
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0884s/a0884s00.pdf>
- [5] LA REPÚBLICA
2013 "Demandan un mayor compromiso para impulsar el cultivo del algodón".
La Republica. Lima, 30 de octubre.
Consulta: 5 de septiembre de 2015.
<http://larepublica.pe/30-10-2013/demandan-un-mayor-compromiso-para-impulsar-el-cultivo-del-algodon>
- [6] CHEN, Sun
2010 *High-efficiency weeding robot*. China, 19 de mayo.
Patente: CN101707992A.
- [7] ZHONG, Dong
2014 *Remote control electric weed extractor*. China, 10 de septiembre.
Patente: CN203814140U.
- [8] ORTEGA, Gabriela
2004 *El Cultivo del Algodón en el Departamento de Piura: Una Configuración y Diagnóstico de su Cadena Productiva*. Tesis de título de Economista. Piura: Universidad de Piura, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.
- [9] XUE, Jinlin y Liming XU
2010 *Autonomous Agricultural Robot and its Row Guidance*. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, pp. 725-729.
- [10] BAK, Thomas y Hans JAKOBSEN
2004 *Agricultural Robotics Platform with Four Wheel Steering for Wheel Detection*. Biosystems Engineering, volumen 87, número 2, pp. 125-136.
- [11] MARCHANT, J. A., T. HAGUE y N. D. TILLET
1997 *Row-following Accuracy of an Autonomous Vision-guided Agricultural Vehicle*. Computers and Electronics in Agriculture, volume 16, pp. 165-175.
- [12] JOTHIMURUGAN, P. y otros
2013 *Solar E-Bot for Agriculture*. Texas Instruments India Educators Conference, pp. 125-130.
- [13] SOUTHALL, B. y otros
2002 *An Autonomous Crop Treatment Robot: Part I. A Kalman Filter Model for Localization and Crop/Weed Classification*. The International Journal of Robotics Research, volumen 21, número 1, pp. 61-74.

- [14] SOUTHALL, B. y otros
2002 *An Autonomous Crop Treatment Robot: Part II. Real Time Implementation*. The International Journal of Robotics Research, volumen 21, número 1, pp. 75-85.
- [15] ASTRAND, B. y A. J. BAERVELDT
2005 *A vision based row-following system for agricultural field machinery*. Mechatronics, número 15, pp. 251-269.
- [16] CARON, F. y otros
2006 *GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects*. Information Fusion, volumen 7, número 2, pp. 221-230.
- [17] JARADAT, Mohammad, Muath BANISALIM y Fahed AWAD
2012 *Autonomous Navigation Robot for Landmine Detection Applications*. IEEE.
- [18] MAHFOUD, A. y G. IHHAM
2013 *A force prediction model for the plough introducing its geometrical characteristics and its comparison with Gorjachkin and Gee Clough models*. Erudite Journal of Engineering and Technology, volumen 1, número 1, pp. 1-7.
- [19] SPOOR, G. y R. J. GODWIN
1978 *An Experimental Investigation into the Deep Loosening of Soil by Rigid Tines*. The British Society for Research in Agricultural Engineering, volumen 23, pp. 243-258.
- [20] DEDOUSIS, Athanasios
2007 *An Investigation into the Design of Precision Weeding Mechanisms for Inter and Intra-Row Weed Control*. Tesis de doctorado en Ciencias Aplicadas. Bedfordshire: Cranfield University.
- [21] GILL, William y Glen VANDEN BERG
1968 *Soil Dynamics in Tillage and Traction*. Agricultural Research Service, número 316.
- [22] HETTIARATCHI, D. R. P.
1997 *Prediction of Soil Forces Acting on Concave Agricultural Discs*. Journal agriculture Engineering Research, volumen 68, pp. 51-62.
- [23] GODWIN, R. J. y M. J. O'DOGHERTY
2007 *Integrated soil tillage force prediction models*. Journal of Terramechanics, volumen 44, pp. 3-14.
- [24] SOGAARD, H. T.
1998 *Automatic Control of a Finger Weeder with Respect to the Harrowing Intensity at Varying Soil Structures*. Journal agriculture Engineering Research, volumen 70, pp. 157-163.
- [25] MOEENIFAR, A., S. R. MOUSAVI-SEYEDI y D. KALANTARI
2014 *Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force*. CIGR Journal, volumen 16, número 1, pp. 69-74.
- [26] BILLINGSLEY, J.
2008 *Some Agricultural applications of Machine Vision*. IEEE.
- [27] HAUG, S. y otros
2013 *Plant Classification System for Crop/Weed Discrimination without Segmentation*. IEEE, pp. 1142-1149.

- [28] HAGUE, T. y N. D. TILLET
1995 *Navigation and Control of an Autonomous Horticultural Robot*. Mechatronics, volumen 6, número 2, pp. 165-180.
- [29] KOZLOWSKI, K. y D. PAZDERSKI
2004 *Modeling and Control of a 4-wheel skid-steering Mobile Robot*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., volumen 14, número 4, pp. 477-496.
- [30] BARSHAN, B. y H. F. DURRANT-WHYTE
1995 *Inertial Navigation Systems for Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, volumen 11, número 3, pp. 328-342.
- [31] ZHAO, Y.
2015 *Performance evaluation of Cubature Kalman filter in a GPS/IMU tightly-coupled navigation system*. Signal Processing, volumen 119, pp. 67-79.
- [32] LI, M. y otros
2009 *Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance*. Int. J. Agric. & Biol. Eng., volumen 2, número 3, pp. 1-16.
- [33] BORGES, G. A., A. PADILHA y J. YOSHIYUKI
2007 *An IMU/Magnetometer/GPS-Based Localization System using Correlated Kalman Filtering*. IEEE.
- [34] BLASCO, J. y otros
2002 *Robotic Weed Control using Machine Vision*. Biosystems Engineering, volumen 83, número 2, pp. 149-157.
- [35] ASTRAND, B. y A. J. BAERVELDT
2002 *An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control*. Autonomous Robots, volumen 13, pp. 21-35.
- [36] TILLET, N. D., T. HAGUE y S. J. MILES
2002 *Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet*. Computers and Electronics in Agriculture, volumen 33, pp. 163-177.
- [37] TILLET, N. D. y otros
2008 *Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision*. Biosystems Engineering, volumen 99, pp. 171-178.
- [38] NAKAJIMA, S.
2009 *Concept of a Novel Four-wheel-type Mobile Robot for Rough Terrain, RT-Mover*. Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [39] DURRANT-WHYTE, H.
2001 *A Critical Review fo the State-of-the-Art in Autonomous Land Vehicle Systems and Technology*. Autonomous Land Vehicle Technology.
- [40] CARIOU, C., R. LENAIN y B. THUILOT
2009 *Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot of accurate field operations*. Journal of Field Robotics, volumen 26.
- [41] PÉREZ RUIZ, M. y otros
2012 *Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops*. Computers and Electronics in Agriculture, volumen 80, pp. 41-49.
- [42] PEDERSEN, S. M. y otros
2005 *Agricultural robots: an economic feasibility study*. Precision Agriculture.

- [43] SLAUGHTER, D. C., D. K. GILES y D. DOWNEY
2008 *Autonomous robotic weed control systems: A reviews*. Computers and Electronics in Agriculture, volumen 61, pp. 63-78.
- [44] KUAN, D., G. PHIPPS y A. C. HSUEH
1988 *Autonomous Robotic Vehicle Road Following*. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volumen 10, número 5, pp. 648-658.
- [45] QUEZADA, Diego
2014 *Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema rocker-bogie y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE*. Tesis para titulación en Ingeniería Mecatrónica. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- [46] BEATTY ROBOTICS
Differential for Mars Rover. Consulta: 3 de octubre de 2015.
<http://beatty-robotics.com/differential-for-mars-rover/>
- [47] SUSTAINABLE AGRICULTURE RESEARCH & EDUCATION (SARE)
Finger Weeder. Consulta: 10 de octubre de 2015.
<http://www.sare.org/Learning-Center/Books/Steel-in-the-Field/Text-Version/Horticultural-Crop-Tools/Finger-weeder.>
- [48] ANIL RUBBER INDUSTRIES
Agricultural tyres. Consulta: 3 de octubre de 2015.
<http://www.ariroadking.com/agricultural-tyres.html>.