



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL SEMIAUTOMÁTICO
PARA LA SIEMBRA DE LEGUMINOSAS EN SURCOS CON CAMBIO DE
DOS HERRAMIENTAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

SEBASTIÁN VINICIO ESTUPIÑÁN REASCOS

DIRECTOR: GABRIELA ANDALUZ O, MSc.

D. M. Quito,

2022

DECLARACIÓN

Yo SEBASTIÁN VINICIO ESTUPIÑÁN REASCOS, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.

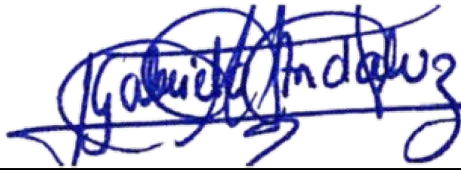


SEBASTIÁN VINICIO ESTUPIÑÁN REASCOS

C.I. 1720252277

CERTIFICACIÓN

El proyecto de investigación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL SEMIAUTOMÁTICO PARA LA SIEMBRA DE LEGUMINOSAS EN SURCOS CON CAMBIO DE DOS HERRAMIENTAS", desarrollado por el Sr. SEBASTIÁN VINICIO ESTUPIÑÁN REASCOS, ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Técnicas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gabriela Andaluze', is written over a horizontal line.

ING. GABRIELA ANDALUZ O, MSc
DIRECTOR DE PROYECTO

Agradecimientos

Agradezco a mi madre Nidia Reascos por ser el apoyo y motor en mi vida, agradezco a Martín Estupiñán por brindarme la fuerza para nunca rendirme y a mi abuelita Lucia Caizaluisa por cada oración brindada hacia mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Tema	1
2	Objetivos	1
	2.1 General	1
	2.2 Específicos	1
3	Problema	2
4	Hipótesis	2
5	Introducción	2
6	Tipos de agricultura	3
	6.1 Agricultura de precisión	3
	6.2 Agricultura de invernadero	4
7	Robótica en la agricultura	4
	7.1 Robots manipuladores	5
	7.2 Robots móviles	6
	7.3 Sistemas de locomoción robots móviles	7
	7.3.1 Configuración diferencial	7
	7.3.2 Configuración sincronizada	8
	7.3.3 Configuración triciclo.	8
	7.3.4 Configuración Ackerman	9
	7.3.5 Configuración Omnidireccional	9
	7.3.6 Mecanum wheels (Ruedas mecánicas)	9
	7.3.7 Movimiento de mecanum wheels	10
8	Siembra	11
	8.1 Siembra directa	11
	8.1.1 Siembra por golpe o localizada	12

8.1.2	Siembra a chorro continuo	12
8.1.3	Siembra al voleo	12
8.2	Siembra indirecta	13
8.3	Normativas de siembra	13
9	Tipos de suelos	14
9.1	Suelos arcillosos	15
9.2	Suelos francos	15
9.3	Suelos arenosos	15
9.4	Suelos calizos	16
10	Perforación de suelos	16
10.1	Perforación por percusión	17
10.2	Perforación por rotopercusión	17
10.3	Perforación por rotación	17
10.3.1	Brocas ahoyadoras	18
11	Tipos de dosificadores	19
11.1	Cilindro dentado	19
11.2	Cilindro acanalado	19
11.3	Plato vertical	20
12	Análisis y selección de alternativas	20
12.1	Análisis de alternativas para el material de la estructura principal	21
12.2	Análisis de alternativas para el sistema de locomoción	21
12.3	Análisis de alternativas de motores	24
12.4	Análisis de alternativas para el sistema de perforación	26
12.5	Análisis de alternativas para el dosificador	27
12.6	Análisis de alternativas para el controlador	27
12.6.1	Raspberry	28
12.6.2	Arduino	28
12.6.3	Selección de controlador	29
13	Diseño mecatrónico	29
14	Diseño mecánico	34

14.1	Diseño perfil principal	35
14.1.1	Diseño de perfil a flexión	36
14.1.2	Análisis de deflexión máxima del perfil principal	41
14.1.3	Simulación análisis por elementos finitos	42
14.1.4	Diseño de soldadura perfil principal	43
14.2	Dimensionamiento soporte motor	49
14.3	Dimensionamiento soldadura de las platinas	50
14.3.1	Simulación soldadura de platinas	52
14.3.2	Dimensionamiento de pernos a corte	53
14.4	Dimensionamiento platina principal	57
14.4.1	Diseño de platina a flexión	58
14.4.2	Análisis de deflexión en la platina principal	61
14.4.3	Simulación análisis por elementos finitos platina principal	62
14.5	Diseño del sistema broca	63
14.5.1	Diseño broca ahoyadora	63
14.5.2	Actuador lineal	67
14.6	Diseño dosificador de semillas	69
14.6.1	Volumen del contenedor de semillas	69
14.6.2	Diseño cilindro dentado	72
14.6.3	Diseño salida de semillas	74
15	Diseño electrónico	76
15.1	Dimensionamiento de motores	76
15.1.1	Modelo matemático motor DC	78
15.1.2	Función de transferencia motor DC	80
15.2	Módulos de control motores	81
15.3	Dispositivos de comunicación	82
15.4	Componentes para mando del robot móvil	83
15.4.1	Visualizador para el control inalámbrico	84
15.5	Sensor para detección de hilera	85
15.6	Dimensionamiento batería	86

15.6.1	Batería robot móvil	86
15.6.2	Dimensionamiento regulador de voltaje	89
15.6.3	Batería control inalámbrico	90
15.7	Resumen elementos electrónicos	91
16	Programación	93
16.1	Modos de funcionamiento	93
16.2	Distancia entre sitio de siembra	95
16.3	Control motores DC	97
16.3.1	Controlador P	98
16.3.2	Controlador I	98
16.3.3	Controlador D	98
16.4	Simulación del controlador PI, PD y PID	99
16.5	Implementación del controlador PID en el sistema de locomoción	104
16.6	Control dosificación de semillas	106
16.7	Interfaz de control del robot móvil	107
17	Pruebas de funcionamiento	109
17.1	Pruebas de comunicación	109
17.2	Prueba de desplazamiento del robot móvil	110
17.3	Prueba de calibración del sistema de perforación	112
17.4	Prueba de dosificación de semillas	113
18	Análisis de costos	120
18.1	Análisis de costos en la utilización de insumos	122
18.2	Análisis de costo en mano de obra	124
19	Conclusiones	125
20	Recomendaciones	126

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Uso de químicos en plantación de hilera	3
2	Agricultura intensiva en invernadero	4
3	Arado de tierra por medio de caballos y tractor	4
4	Robot Lase, laboratorio ingeniería aplicada	5
5	Robot Brain	6
6	Aurora, robot para invernaderos	6
7	Robot pequeño para siembra	7
8	Desplazamientos robot móvil con configuración diferencial	8
9	Disposición de ruedas robot móvil con configuración sincronizada	8
10	Disposición de ruedas robot móvil con configuración triciclo	8
11	Disposición de ruedas robot móvil con configuración Ackerman	9
12	Disposición de ruedas robot móvil con configuración omnidireccional	9
13	Rodillos con inclinación a 45° y 90°	10
14	Movimiento en línea recta robot omnidireccional	10
15	Movimiento a la izquierda robot omnidireccional	11
16	Siembra por golpe o localizada	12
17	Siembra por chorro continuo	12
18	Siembra por voleo	13
19	Siembra realizada en un almacigo	13
20	Medidas de surco para siembra de maíz	14
21	Suelo arcilloso	15
22	Suelo franco	15
23	Suelo arenoso	16
24	Suelo calizo	16

25	Sistema de perforación por percusión	17
26	Sistema de perforación por percusión	17
27	Barrena helicoidal	18
28	Sistema de perforación por rotación	18
29	Diferentes brocas ahoyadoras	18
30	Cilindro dentado para semilla	19
31	Rodillo acanalado para semilla	20
32	Sistema de platillos	20
33	Modelo 3D de robot móvil para siembra con cambio de herramienta	31
34	Modelo 3D del control inalámbrico del robot móvil.	32
35	División de los perfiles en la estructura principal.	35
36	Catálogo DIPAC perfiles cuadrados	36
37	Diagrama de cuerpo libre perfil principal.	37
38	Reacciones y momentos de una viga con apoyos fijos	37
39	Diagrama de fuerza cortante en la perfil principal.	38
40	Diagrama momento flector en la perfil principal.	39
41	Resultado de los diagramas fuerzas cortantes y momento flector.	39
42	Selección del perfil mediante valor permisible del módulo de sección	41
43	Deflexión máxima de un perfil con apoyos fijos	41
44	Propiedades físicas de acero estructural	42
45	Simulación deflexión en el perfil principal.	43
46	Uniones soldadas de la estructura sujetas a flexión.	43
47	Voladizo con unión tipo filete	44
48	Patrón de soldadura cordones verticales	45
49	Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte	47
50	Propiedades mínimas del metal de aporte	48
51	Electrodos para aceros con norma ASTM	48
52	Dimensiones motores de 12 V	49
53	Alternativas de motores 12 V	49
54	Motor acoplado a la pieza impresa en 3D.	50

55	Platinas con unión permanente.	51
56	Dimensiones de las platinas.	51
57	Soldadura de chaflán.	52
58	Tamaños mínimos de cordón para placas	52
59	Parámetros de ingreso para simulación.	53
60	Simulación elementos finitos para cordón soldadura de platinas.	53
61	Modos de falla por carga cortante	54
62	Pernos para sujeción del acople de motores a la estructura principal.	54
63	Propiedades mecánicas de pernos	55
64	Características pernos media rosca	56
65	Ubicación platina principal.	57
66	Propiedades estructurales de platinas	57
67	Diagrama de cuerpo platina principal.	58
68	Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores en la platina principal.	59
69	Criterio de deflexión máxima sujeta a flexión	61
70	Resultado simulación de platina principal	62
71	Resistencia a la penetración del suelo franco arenoso	63
72	Cono, parte inicial de la broca	64
73	Valor de resistencia a la fluencia para probetas de PLA	66
74	Distancia mínima de carrera del actuador.	68
75	Actuador lineal.	68
76	Espacio de trabajo del robot móvil.	69
77	Volumen del contenedor obtenido mediante SolidWorks.	72
78	Dimensión dientes del cilindro.	72
79	Ubicación del cilindro dentando en el contenedor de semillas.	73
80	Modelo desarrollado por Lan, Kocher y Smith	75
81	Ubicación del sensor en el sistema de salida	76
82	Esquema motor DC	79
83	Diagrama funcionamiento driver motor DC	81
84	Módulo controlador L298.	82

85	Módulo bluetooth HC-05.	83
86	Joystick analógico.	84
87	Pantalla Oled SH1106.	85
88	Corriente máxima de descarga	88
89	Especificaciones cargadores de 12 V	88
90	Diagrama de alimentación robot móvil.	89
91	Regulador DC DC 12-35 V.	90
92	Cargador portable 5V.	90
93	Diagrama de bloques alimentación del mando inalámbrico.	91
94	Diagrama de flujo del menú principal.	93
95	Diagrama de flujo modo manual.	94
96	Diagrama de flujo modo arveja y chocho.	95
97	Revoluciones por minuto del motor DC.	96
98	Respuesta de un sistema a una entrada escalón	97
99	Sistema sin controlador con lazo abierto.	99
100	Respuesta del sistema sin controlador con lazo abierto.	99
101	Diagrama de bloques del sistema sin controlador con lazo cerrado.	100
102	Respuesta del sistema sin controlador y con lazo cerrado.	100
103	Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado más controlador PI.	100
104	Herramienta Tune para obtención de parámetros de control.	101
105	Respuesta del sistema con controlador PI vs., respuesta del sistema sin controlador.	101
106	Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con controlador PD.	102
107	Respuesta del sistema con controlador PD vs., respuesta del sistema sin controlador	102
108	Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con controlador PID.	103
109	Respuesta del sistema con controlador PID vs., respuesta del sistema sin controlador	103
110	Gráfica de los tres controladores.	104
111	Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,01$; $K_i=0,1$	104

112	Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,1$; $K_i=0,1$	105
113	Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,001$; $K_i=0,1$	106
114	Sensor para conteo de semillas.	107
115	Principio de funcionamiento de sensor IR.	107
116	Menú de inicio del mando inalámbrico.	108
117	Movimiento del joystick para navegación dentro del menú.	108
118	Visualización del modo chocho.	109
119	Mensaje para continuar la siembra.	109
120	Desplazamiento del robot móvil por hilera 4.	111
121	Prueba de penetración en el suelo	112
122	Dosificación de arveja en sitio de siembra.	114
123	Dosificación de chocho en sitio de chocho.	114
124	Costo de insumos para siembra de arveja	123
125	Costo de mano de obra para siembra de arveja	124

ÍNDICE DE TABLAS

1	Sentido de giro individual de mecanum wheels	11
2	Características de siembra arveja y chocho	14
3	Evaluación de criterios para selección del material estructura principal	21
4	Evaluación de criterios para selección del sistema de locomoción	22
5	Alternativas de mecanum wheels	22
6	Evaluación de criterios para selección de motores DC	24
7	Alternativas de baterías	24
8	Evaluación de criterios para selección del sistema de perforación	26
9	Parámetros de impresión de PLA y ABS	27
10	Parámetros para el controlador del robot móvil	27
11	Parámetros para el controlador del mando robot móvil	28
12	Características Raspberry Pi 3 B+	28
13	Características Arduino Uno	29
14	Evaluación de criterios para selección del controlador	29
15	Parámetros principales	30
16	Partes principales robot móvil.	32
17	Partes mando inalámbrico.	33
18	Carga en la perfil principal	35
19	Parámetros para diseño de platinas	50
20	Masa que soporta las platinas	51
21	Masa que soporta la platina principal	58
22	Especificaciones actuadores lineales	67
23	Diámetro semilla de arveja	71
24	Medidas semilla de chocho	71

25	Características del motor	74
26	Coeficientes de resistencia a la rodadura	77
27	Características de motores DC	78
28	Características driver motor DC	82
29	Características módulos de comunicación	83
30	Características módulos joystick	84
31	Características pantallas oled	85
32	Características de sensores ultrasónicos	85
33	Consumo de corriente y voltaje elementos robot móvil	86
34	Características Regulador de voltaje	89
35	Consumo de corriente de elementos control	90
36	Elementos electrónicos seleccionados	91
37	Prueba de comunicación entre módulos Bluetooth	110
38	Pruebas desplazamiento por hilera	111
39	Pruebas perforación por hilera	112
40	Pruebas dosificación en sitio de siembra	113
41	Sembrado de arveja hilera 1	114
42	Sembrado de arveja hilera 2	115
43	Sembrado de arveja hilera 3	116
44	Sembrado de arveja hilera 4	117
45	Sembrado de chocho hilera 1	118
46	Sembrado de chocho hilera 2	118
47	Sembrado de chocho hilera 3	119
48	Sembrado de chocho hilera 4	120
49	Análisis de costos del proyecto	120
50	Análisis del consumo de semillas	124
51	Análisis del consumo eléctrico del robot móvil	124

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL SEMIAUTOMÁTICO PARA LA SIEMBRA DE LEGUMINOSAS EN SURCOS CON CAMBIO DE DOS HERRAMIENTAS

1. Tema

El tema del proyecto planteado es "Diseño y construcción de un robot móvil semiautomático para la siembra de leguminosas en surcos con cambio de dos herramientas".

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar y construir un robot móvil semiautomático para la siembra de leguminosas en surcos con cambio de dos herramientas.

2.2. Específicos

- Investigar la normativa y tecnologías que son aplicadas en la siembra para leguminosas en la sierra ecuatoriana.
- Consultar las dimensiones de los surcos para dimensionar las herramientas para la siembra.
- Diseñar la estructura del robot móvil bajo parámetros de cálculos y estimaciones de trabajo del mismo.
- Ensamblar la estructura del robot móvil con las herramientas seleccionadas.
- Desarrollar un interfaz humano máquina para el control del robot móvil.
- Realizar pruebas del cumplimiento de la dosificación de las semillas y la profundidad por sitio de siembra.

3. Problema

La agroindustria en el Ecuador es un sector importante para la economía, teniendo un ingreso económico del 27 % para familias ecuatorianas, [1]. La producción de leguminosas entra en el promedio de 25,01 % Tm (toneladas por metro) del total del producto de cultivos transitorios, [2]. De esta producción se enfoca en dos semillas, chocho y arveja. El consumo de chocho en la sierra es del 71 %, oriente 87 % y costa 19 %; mientras que el consumo de la semilla de arveja en la sierra es del 35 %, costa 9 % y oriente 22 %, [3]. El proceso de siembra se desarrolla de forma tradicional, lo que conlleva a realizar acciones repetitivas en los agricultores como por ejemplo el trazo de tiras para ubicar la separación entre sitio de siembra, la perforación en cada espacio de manera manual. De igual manera no cuenta con un control de semillas por m² de siembra. Es necesario la implementación de la robótica para ayudar a realizar las tareas mencionadas de una manera más eficiente, optimizando el aprovechamiento de recursos.

4. Hipótesis

El robot móvil podrá desplazarse por el surco con dimensiones ya establecidas por normativas de la INIAP. El proceso de siembra será limitado en dos semillas, chocho y arveja. La selección de semilla se podrá efectuar por medio del control de mando. El robot móvil tendrá la capacidad de realizar un orificio con un mecanismo de actuador lineal y una broca ahoyadora para después realizar el proceso de dosificación de las semillas por medio de un dosificador tipo cilindro dentado.

5. Introducción

En el Ecuador la agricultura aporta con el 9 % de la producción anual, siendo la tercera fuente de mayor ingreso para el país, [4]. Esta actividad toma importancia debido a que Ecuador tiene un total de 26,079,000 hectáreas de las cuales 12,304,226 se utilizan para la agricultura. De este espacio se usa el 12 % para cultivos permanentes, es decir, cultivos los cuales su ciclo vegetativo dura más de un año y puede llegar a tener varias cosechas a lo largo de la vida. Las leguminosas entran en cultivos transitorios, que ocupa un 8 % de

este espacio, el ciclo vegetal de este cultivo es menor al año y en algunos casos este ciclo se cumple en un par de meses, este tipo de cultivo se denomina transitorio debido a que cuando llega el momento de la cosecha, es removido del suelo en su totalidad, [5]. De las cuatro regiones del Ecuador, la sierra es la que más se dedica a la producción de cultivos transitorios, ocupando un 31,73 % de su espacio para la producción.

6. Tipos de agricultura

La producción de leguminosas se realiza en áreas peri-urbanas y dependiendo del control que se tenga de la producción, así como también del manejo de los recursos (semillas, fertilizantes, abonos) se utiliza dos tipos de agricultura, de precisión y de invernadero, [6].

6.1. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión tiene como objetivo incorporar tecnología para realizar un estudio y control del suelo, así como también a los cultivos, los cuales están sujetos a variables naturales o variables inducidas dentro de su lote de producción. Este tipo de agricultura maneja de manera óptima los insumos (fertilizantes, abonos), permitiendo al productor medir, analizar y manejar el lote de producción, el cual antes era conocido pero no se lo podía monitorear. Este tipo de agricultura cuenta con subtipos: convencional (control de químicos e insumos externos) como se observar en la Figura 1, sustentable (control de plagas, caracterización del suelo) y extensiva (control de riego, uso de recursos naturales), [7].



Figura 1: Uso de químicos en plantación de hilera, [7].

6.2. Agricultura de invernadero

La agricultura de invernadero tiene como principal objetivo mejorar la calidad del producto por medio de un ambiente controlado. Este ambiente se conoce con el nombre de invernadero, el cual es una estructura de madera o metal recubierta por principalmente plástico. Debido a esto se aplican procesos de automatización, computación y robótica para controlar variables como ventilación, calefacción, humedad, etc. Variables que afectan en la producción de determinado producto, y las mismas que pueden repercutir a la calidad final. La agricultura intensiva es el claro ejemplo debido a que esta busca obtener la mayor cantidad de producto por unidad de superficie, como se observa en la Figura 2. [8], [7].



Figura 2: Agricultura intensiva en invernadero, [7].

7. Robótica en la agricultura

La agricultura se considera hoy en día como una industria y al ser considerada como tal sufre cambios constantes a medida que se implementa tecnología en sus procesos, el primer cambio que se introdujo fue maquinaria para sustituir el uso de animales, por ejemplo, el cambio de tractores en el proceso de arado de la tierra como se observa en la Figura 3, [8].



Figura 3: Arado de tierra por medio de caballos y tractor, [8].

La implementación de robots en la agricultura presenta complicaciones respecto a otras

industrias esto se debe principalmente a tres razones: entorno de trabajo cambiante, limitaciones de espacio y limitaciones económicas para implementación. Sin embargo, existe un tipo de agricultura en la cual se puede aplicar la robótica sin tantas limitantes y esta es la de invernadero. Dentro de esta agricultura se utiliza la robótica para realizar las siguientes actividades:

- Preparación del cultivo: eliminación de cultivo anterior, labranza, nivelado.
- Siembra: plantación de semillas, injertos, fertirrigación de plántulas.
- Producción: fertirrigación del cultivo, eliminación de malas hierbas, poda de plantas.
- Recolección: clasificación de frutos, envasado en campo.

Para estas actividades existen robots diseñados específicamente para efectuarlas, robots manipuladores así como también los robots móviles, [9].

7.1. Robots manipuladores

En la agricultura hay actividades fuera de la recolección y sembrío. Estas actividades tienen que ver con la jardinería, manipulación y trasplante de plantas o semillas. Un ejemplo de robot dedicado a la jardinería es el LASE que se lo observa en la Figura 4, este robot tiene la tarea de remover hojas en sembríos controlados.



Figura 4: Robot Lase, laboratorio ingeniería aplicada, [10].

Un robot que se dedica a la trasplante es el robot BRAIN, esta actividad se debe a que algunas plantas son sembradas en un inicio dentro de invernaderos, estas crecen hasta

un cierto punto para luego ser trasplantadas en el campo, el robot BRAIN se dedica a esta actividad, se lo puede observar en Figura 5.



Figura 5: Robot Brain, [10].

7.2. Robots móviles

La clasificación de este tipo de robots está determinada por el grado de autonomía que este tiene:

- Sistemas de ayuda al guiado: dentro de estos sistemas se pretende reducir el estrés asociado con tareas que requieren un nivel elevado de concentración.
- Sistemas de navegación autónoma: este sistema trata de una navegación no tripulada para la resolución de soluciones previsibles, [10].

Algunos ejemplos de sistemas de ayuda guiado es el robot AURORA, este se encarga de la tarea de fumigación, se lo puede observar en la Figura 6.



Figura 6: Aurora, robot para invernaderos, [10].

Otro ejemplo de robot móvil para siembra es el desarrollado por la Universidad de Illinois, el cual se encarga de siembra, fumigación y recolección, se lo puede observar en la Figura 7.



Figura 7: Robot pequeño para siembra, [10].

7.3. Sistemas de locomoción robots móviles

El sistema de locomoción más usado en robots móviles son las ruedas, debido a la facilidad de su diseño en comparación a sistema de patas o cadenas. Los diferentes mecanismos con ruedas son:

- Configuración diferencial.
- Configuración sincronizada.
- Configuración triciclo.
- Configuración Ackerman.
- Configuración omnidireccional.

7.3.1. Configuración diferencial

Utiliza dos llantas ubicadas en los laterales del robot, su control es independiente lo que permite que el robot rote sobre su propio eje. El principal problema de este sistema es encontrar el punto de equilibrio, la solución más común es colocar una tercera rueda la cual es una pivote o giratoria. Esta tercera llanta va ubicada en la parte delantera o trasera, con esto se garantiza que llantas laterales puedan tener una coordinación. En la Figura 8 se puede observar los desplazamientos que puede tener este tipo de configuración, [11], [12].

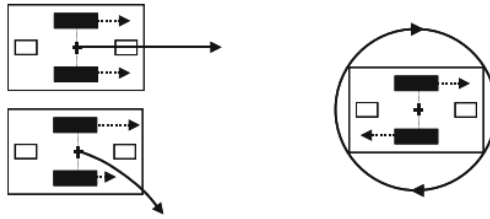


Figura 8: Desplazamientos robot móvil con configuración diferencial, [12].

7.3.2. Configuración sincronizada

Dispone de tres llantas con un sistema motriz independiente, esto permite que las ruedas giren en el sentido que se desea realizar el desplazamiento haciendo que el chasis del robot no cambie de posición. Para realizar el giro el robot debe detenerse, no puede conducirse y girar al mismo tiempo. La construcción del chasis suele ser de manera circular, en la Figura 9 se observa la disposición de las ruedas en esta configuración, [12], [11].

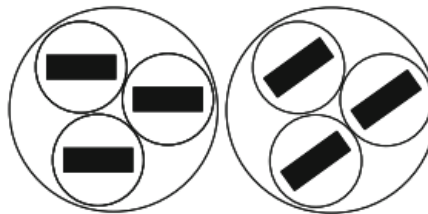


Figura 9: Disposición de ruedas robot móvil con configuración sincronizada, [12].

7.3.3. Configuración triciclo.

Cuenta con tres ruedas de las cuales solo una tiene un sistema motriz. Para que el robot pueda desplazarse la rueda delantera se ubica en medio de las llantas pasivas. Para conseguir el giro el eje debe estar alienado con la rueda delantera, en la Figura 10 se puede observar tanto la disposición de las llantas y los desplazamientos que puede realizar, [12], [11].

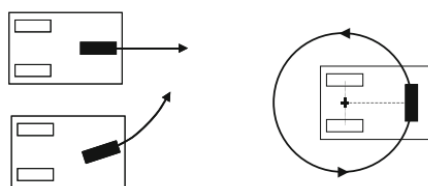


Figura 10: Disposición de ruedas robot móvil con configuración triciclo, [12].

7.3.4. Configuración Ackerman

Dos ruedas traseras con sistema motriz y dos ruedas delanteras direccionales, este sistema es de un vehículo automotriz estándar. Una desventaja en comparación con el sistema diferencial es que no permite realizar giros sobre su propio eje, pero con una gran ventaja es la corrección de posición por medio de las ruedas delanteras, no necesita detenerse para realizar el giro. En la Figura 11 se observa la disposición de llantas en este sistema, [12], [11].

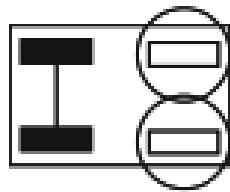


Figura 11: Disposición de ruedas robot móvil con configuración Ackerman, [12].

7.3.5. Configuración Omnidireccional

Dispone de tres o cuatro ruedas como se observa en la Figura 12, a diferencia de los demás sistemas cuenta con un tipo de llantas especiales denominadas "Mecanum Wheels", [12].



Figura 12: Disposición de ruedas robot móvil con configuración omnidireccional, [12].

7.3.6. Mecanum wheels (Ruedas mecánicas)

La superficie de este tipo de ruedas está cubierta por cilindros los cuales tienen una inclinación de $+45^\circ$ o 90° como se observa en la Figura 13. El eje de estas ruedas es accionado por un motor mientras que los cilindros no. Estos cuentan con cojinetes de bolas y su movimiento es libre sobre su eje. El accionamiento de estas ruedas es independiente, debido a esto el movimiento del robot dependerá del giro que se realice en eje de las

ruedas, [12].



Figura 13: Rodillos con inclinación a 45° y 90°, [12].

Existe una versión de rueda izquierda y derecha como se observa en la Figura 12, la colocación de estas en el robot está establecida para que el movimiento se pueda realizar.

7.3.7. Movimiento de mecanum wheels

El accionamiento de cada llanta es independiente, para entender cómo afecta al desplazamiento del robot se utiliza la Figura 14. Se observan los cuatro vectores de cada rueda, dos vectores apuntan a la izquierda y dos a la derecha, estos se anulan entre sí, quedando los vectores que apuntan hacia delante, por lo tanto, el robot avanzará en línea recta.

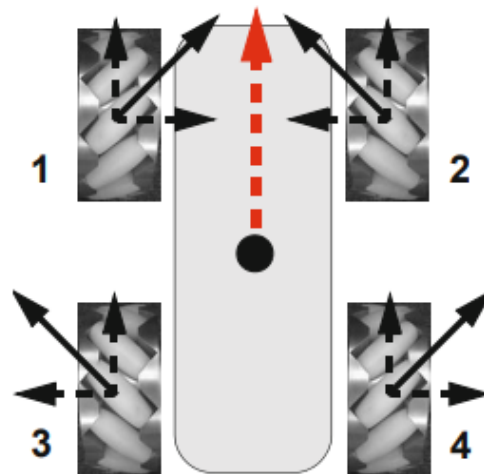


Figura 14: Movimiento en línea recta robot omnidireccional, [12].

Otro ejemplo se observa en la Figura 15, se detallan los vectores de cada rueda, dos apuntan hacia adelante y dos hacia atrás, estos se anulan entre si quedando solo los vectores que apuntan alado izquierdo, por lo tanto el robot se moverá a la izquierda.

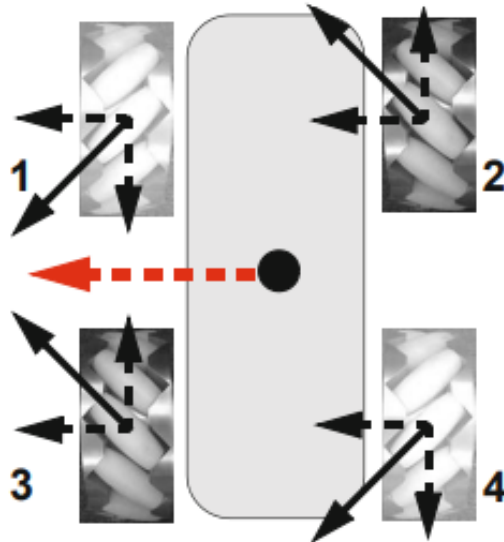


Figura 15: Movimiento a la izquierda robot omnidireccional, [12].

En la Tabla 1 se detalla el giro que deberá tener cada rueda para que el robot logre ir hacia adelante, atrás, izquierda, etc.

Tabla 1: Sentido de giro individual de mecanum wheels

Desplazamiento	Sentido de giro de ruedas
Adelante	Cuatro llantas hacia delante
Atrás	Cuatro llantas hacia atrás
Izquierda	1,4: atrás ; 2,3: adelante
Derecha	1,4: adelante ; 2,3: atrás
Giro en sentido horario	1,3: adelante ; 2,4: atrás
Giro sentido antihorario	1,3: atrás ; 2,4: adelante

8. Siembra

La siembra es la actividad de colocar una semilla sobre el suelo previamente preparado, el propósito de esto es lograr que germine. Las condiciones de siembra varían dependiendo el tipo de semilla. Existen dos tipos de siembra, directa e indirecta, [13].

8.1. Siembra directa

Este tipo de siembra consiste en colocar la semilla en el lugar donde va a completar todas las fases de desarrollo. Existen tres tipos de siembra directa.

- Siembra por golpe o localizada.
- Siembra a chorro continuo.
- Siembra al voleo.

8.1.1. Siembra por golpe o localizada

Este proceso consiste en colocar el número de semillas dependiendo el cultivo. Esto permite aprovechar de mejor manera los recursos que se usan en el transcurso de la siembra, en la Figura 16 se puede observar este tipo de siembra, [14].



Figura 16: Siembra por golpe o localizada, [14].

8.1.2. Siembra a chorro continuo

Este tipo siembra consiste en colocar las semillas en línea recta sin que exista una distancia determinada entre ellas, en la Figura 17 se puede observar este tipo de siembra, [14].



Figura 17: Siembra por chorro continuo, [14].

8.1.3. Siembra al voleo

En este tipo de siembra se intenta distribuir de manera uniforme las semillas sobre la superficie en la cual se desea realizar el cultivo. Una vez distribuida la semilla se puede

realizar un raleo para separar las semillas entre sí, en la Figura 18 se puede observar este tipo de siembra, [14].



Figura 18: Siembra por voleo, [14].

8.2. Siembra indirecta

En este tipo de siembra se cuenta con dos etapas, la primera es realizar el cultivo en un inicio dentro de un almacigo como se observa en la Figura 19, para después ser trasplantado dentro de un huerto.



Figura 19: Siembra realizada en un almacigo, [14].

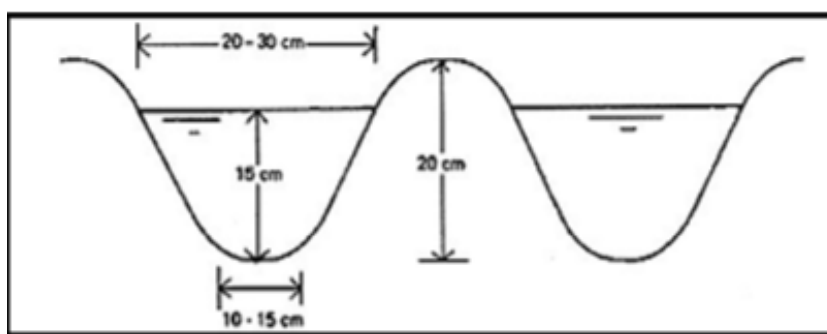
8.3. Normativas de siembra

La normativa de siembra se rige a las dos semillas seleccionadas, chocho y arveja. Para el proceso de siembra de estas semillas se utiliza el manual de la INIAP del cual se extrae la información reflejada en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de siembra arveja y chocho, [15]

Característica	Arveja	Chocho
Zona de cultivo	Pichincha	Pichincha
Temperatura	12 a 18 °C	7 a 14 °C
Suelo	Franco, arenoso	Franco arenoso, arenoso
Semilla por sitio	3 a 4	3 a 5
Separación entre sitio	25 a 30 cm	25 a 50 cm
Profundidad de siembra	hasta 5 cm	hasta 5 cm

Para la preparación del surco es necesario entender su concepto el cual es la señal que queda en la tierra después de ser arada. El manual de la INIAP indica que la tierra debe ser arada o surcada, es decir, puede contar o no con el camino de división (surco). La altura y separación del surco está delimitada por la profundidad de siembra de ambas semillas, la misma que es de 5 cm, este valor se obtiene del manual de manejo de cultivo establecido para cada semilla, [16], [17]. La forma que tienen los surcos se puede observar en la Figura 20.

**Figura 20:** Medidas de surco para siembra de maíz, [18].

9. Tipos de suelos

El suelo es la capa superficial de la tierra en la cual las plantas generan sus raíces, en esta capa se encuentran los nutrientes así como también el agua necesaria que sirven a las raíces para que se alimenten y puedan crecer sin problema. Existen varios tipos de suelos según sus características, [19].

- Suelos arcillosos.

- Suelos francos.
- Suelos arenosos.
- Suelos calizos.

9.1. Suelos arcillosos

Tienen la capacidad de retener el agua, debido a esto cuando está húmedo se vuelve pesado para trabajarlo, tiene un aspecto amarillento debido a que la mitad de su composición es arcilla. En la Figura 21 se observa un suelo arcilloso, [20].



Figura 21: Suelo arcilloso, [20].

9.2. Suelos francos

La composición de este suelo es entre arcilla y arena, tiene una capacidad buena de retención de agua así como también la facultad de erosión media. En la Figura 22 se puede observar un suelo franco, [20].



Figura 22: Suelo franco, [20].

9.3. Suelos arenosos

Tiene la capacidad de ser más fértil que el arcilloso, permite una rápida mineralización de materia orgánica, de igual manera tiene una capacidad de drenaje del agua haciendo que

sea más fácil su trabajo de labrado. En la Figura 23 se puede observar el suelo arenoso, [21].



Figura 23: Suelo arenoso, [21].

9.4. Suelos calizos

Se caracteriza por ser seco y árido, así mismo no cuenta con los nutrientes necesarios para que las plantas puedan desarrollarse con normalidad, razón por la cual el cultivo en este tipo de suelo es complicado. En la Figura 24 se observa un suelo calizo, [21].



Figura 24: Suelo calizo, [21].

10. Perforación de suelos

La perforación mecánica de suelos consta de tres etapas: rotura de terreno por un motor, sistema de eliminación y sostenimiento de paredes. Existen tres sistemas usados para realizar la perforación.

- Perforación por percusión.
- Perforación por rotopercusión.
- Perforación por rotación.

10.1. Perforación por percusión

El principio de sistema es realizar una fractura en el suelo por medio del golpe de una herramienta de gran peso, esto se logra transmitiendo la fuerza por medio de un cable, el cual está acoplado a una torre con un torno de fricción que permite levantar o bajar la herramienta como se observa la Figura 25, [22].

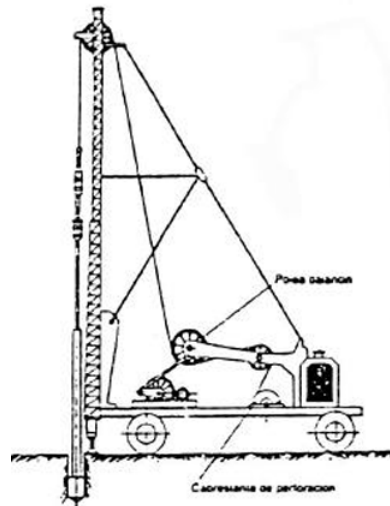


Figura 25: Sistema de perforación por percusión, [23].

10.2. Perforación por rotopercusión

Este sistema combina la percusión y rotación consiguiendo que una barrena gire por medio de un líquido hidráulico mientras que un sistema tipo martillo realiza golpes de martillo, estos se realizan de manera rápida, en la Figura 26, [22].

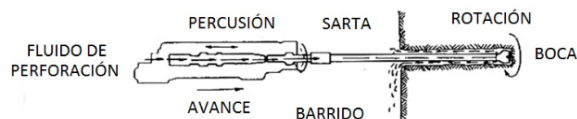


Figura 26: Sistema de perforación por percusión, [23].

10.3. Perforación por rotación

Este sistema se compone de una fuerza de empuje y una cabeza de rotación. Se usan barrenas de agujeros o barrenas helicoidales, las más usadas son las helicoidales debido a que pueden realizar una perforación más profunda, se la puede observar en la Figura 27.

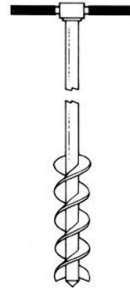


Figura 27: Barrena helicoidal, [23].

En la Figura 28 se puede observar un mecanismo de perforación por rotación.

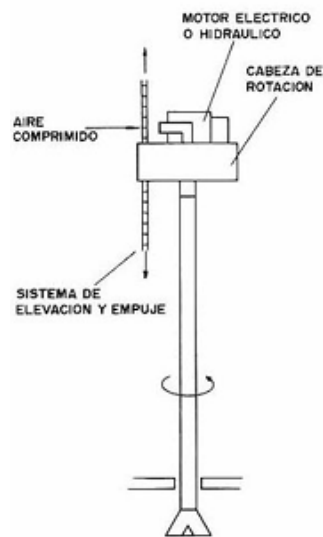


Figura 28: Sistema de perforación por rotación, [23].

10.3.1. Brocas ahoyadoras

Las barrenas helicoidales son usadas para realizar perforaciones entre los 3 a 5 metros y el diámetro viene desde 76,2 mm a 304,8 mm. Para perforaciones que no sobrepasan el metro de profundidad se usan brocas ahoyadoras, las cuales son de la misma forma que las barrenas helicoidales en la Figura 29 se observan tres tipos de brocas, estas varían dependiendo la profundidad, diámetro y terreno en cual se va a realizar la perforación.



Figura 29: Diferentes brocas ahoyadoras

11. Tipos de dosificadores

Los dosificadores son herramientas que permiten entregar una semilla de manera continua, estos pueden variar dependiendo el tipo de siembra y semilla. Esta herramienta es la que se encarga de determinar la densidad que tendrá el cultivo esto quiere decir la cantidad de plantas por unidad de área, [24].

11.1. Cilindro dentado

Este cilindro suele ser el más usado por su simplicidad, el material de sus dientes puede ser plástico o acero, suele estar ubicado por debajo de la tolva donde la semilla cae por una compuerta variable. Este sistema puede ser adaptado a un rango amplio de semillas (pasto y leguminosas) debido al cambio de rodillos, el mecanismo se puede observar en la Figura 30.

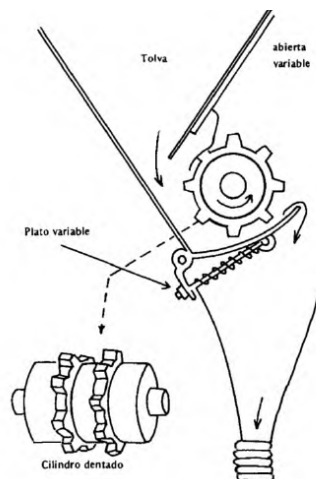


Figura 30: Cilindro dentado para semilla, [25].

11.2. Cilindro acanalado

Este tipo de cilindro para realizar una correcta alimentación de semillas requiere un ajuste previo, este va de acuerdo a la velocidad de rotación y el tamaño de las semillas. Con simientes pequeños este mecanismo es crítico, debido al desgaste del sistema entre la palanca y los rodillos, en la Figura 31 se observa este mecanismo.

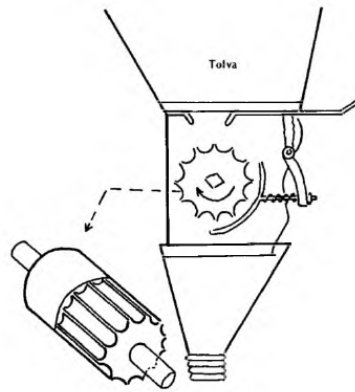


Figura 31: Rodillo acanalado para semilla, [25].

11.3. Plato vertical

Este mecanismo solo es usado para cereales debido a que no puede ser adaptado a otro tipo de semillas, este sistema cuenta con dos caras con alveolos y otros con costillas finas a un lado y gruesas al otro, se la puede observar en la Figura 32.

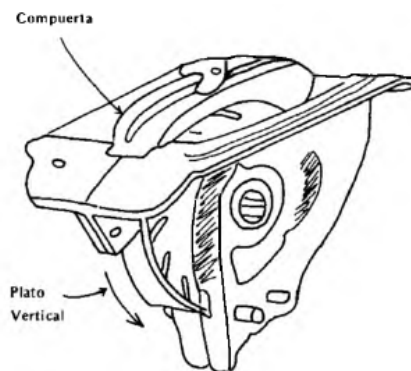


Figura 32: Sistema de platillos, [25].

12. Análisis y selección de alternativas

La información recaudada permite obtener las principales características de máquinas dedicadas a siembra:

- Superficie de trabajo: tierra.
- Etapas de siembra: perforación, dosificación, riego y cosecha.
- Funcionamiento: autónomo.

Se debe analizar alternativas que garanticen el funcionamiento del robot móvil bajo los parámetros mencionados. La etapa de siembra se delimita a perforación y dosificación.

12.1. Análisis de alternativas para el material de la estructura principal

La estructura debe garantizar la durabilidad del robot móvil, se plantea tres opciones: perfil estructural cuadrado, rectangular y redondo. Los criterios para su selección son:

- Criterio 1: el tamaño de los perfiles debe ir acorde a la dimensión de los surcos.
- Criterio 2: la forma del perfil debe garantizar la facilidad de realizar la unión permanente.
- Criterio 3: se debe tomar en cuenta si el perfil se encuentra en el mercado nacional.

En la Tabla 3 se realiza el análisis por medio criterios de ponderación: 1 cumple y 0 no cumple.

Tabla 3: Evaluación de criterios para selección del material estructura principal

Alternativa	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Σ	Ponderación
Perfil cuadrado	1	1	1	3	0,43
Perfil rectangular	1	1	1	3	0,43
Perfil redondo	1	0	0	1	0,13
Total				7	1

El perfil cuadrado permite construir una estructura simétrica a diferencia del perfil rectangular, debido a eso se hace la selección de la primera opción.

12.2. Análisis de alternativas para el sistema de locomoción

El sistema de locomoción debe ser capaz de movilizar al robot móvil sobre una superficie de tierra, para ello se utilizan los siguientes criterios:

- Criterio 1: el sistema debe poseer tracción en las cuatro ruedas.
- Criterio 2: debe realizar giros sobre su propio eje para minimizar el espacio de movimiento cuando se traslade de un punto a otro.

- Criterio 3: debe permitir un control independiente de cada rueda.

En la Tabla 4 se realiza el análisis por medio criterios de ponderación: 1 cumple y 0 no cumple.

Tabla 4: Evaluación de criterios para selección del sistema de locomoción

Alternativa	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Σ	Ponderación
Diferencial	0	1	1	2	0,22
Sincronizada	0	1	1	2	0,22
Triciclo	0	1	0	1	0,11
Ackerman	1	0	0	1	0,11
Omnidireccional	1	1	1	3	0,33
Total				9	1

La configuración omnidireccional tiene la mayor ponderación, debido a eso se hace la selección de este sistema, el cual cuenta con ruedas específicas para su funcionamiento para ello se analizan tres alternativas que se observan en la Tabla 5.

Tabla 5: Alternativas de mecanum wheels

Alternativas	Imagen	Características
Alternativa 1		<ul style="list-style-type: none"> ■ Diámetro 97 mm. ■ Kit de acoplamiento motor DC. ■ Soporte de carga: 5 kg. ■ Precio: \$40 (juego de 4 llantas)

Alternativas	Imagen	Características
Alternativa 2		<ul style="list-style-type: none"> ■ Diámetro 80 mm. ■ Kit de acoplamiento motor DC. ■ Soporte de carga: 22 lb. ■ Precio: \$50 (juego de 4 llantas)
Alternativa 3		<ul style="list-style-type: none"> ■ Diámetro 40 mm. ■ No cuenta con kit de acoplamiento para motor DC. ■ Soporte de carga: sin especificación. ■ Precio: \$35 (juego de 4 llantas)

La segunda alternativa posee una capacidad de soporte de carga más alta, debido a esto se hace la selección de esta opción.

12.3. Análisis de alternativas de motores

Los motores se implementarán en el sistema de locomoción, dosificación y broca. Se analizan dos opciones: 12 V y 24 V. Los motores AC quedan descartados debido a que la alimentación es con corriente continua. Los criterios de selección son los siguientes:

- Criterio 1: la alimentación debe estar de acuerdo al voltaje de funcionamiento de los motores, de esta manera se evita la incorporación de un banco de baterías.
- Criterio 2: los motores deben poseer una caja reductora.
- Criterio 3: debe poseer un encoder para poder realizar la lectura de las RPM para incorporar un control.


En la Tabla 6 se realiza el análisis por medio criterios de ponderación: 1 cumple y 0 no cumple.

Tabla 6: Evaluación de criterios para selección de motores DC

Alternativa	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Σ	Ponderación
Motor DC 12 V	1	1	1	3	0,75
Motor DC 24 V	0	1	0	1	0,25
Total				4	1

La mejor opción para el robot móvil es la incorporación de motores DC a 12 V. Para la selección de la batería se analizan tres opciones presentadas en la Tabla 7.

Tabla 7: Alternativas de baterías

Alternativas	Imagen	Características
Alternativa 1		<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje nominal: 12 V. ■ Corriente nominal: 9Ah.

Alternativas	Imagen	Características
		<ul style="list-style-type: none"> ■ Peso: 2,4 kg. ■ Vida útil: 3-5 años. ■ Dimensiones: 151 × 65 × 94 mm
Alternativa 2		<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje nominal: 12 V. ■ Corriente nominal: 7Ah. ■ Peso: 2,32 kg. ■ Vida útil: 5 años. ■ Dimensiones: 151 × 65 × 93 mm
Alternativa 3		<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje nominal: 12 V. ■ Corriente nominal: 5Ah. ■ Peso: 1,6 kg.

Alternativas	Imagen	Características
		<ul style="list-style-type: none"> ■ Vida útil: 3 años. ■ Dimensiones: 92 × 70 × 101 mm

La primera alternativa brinda una mayor autonomía para el robot móvil al poseer una corriente nominal mayor, se selecciona una batería de 12 V con 9 Ah.

12.4. Análisis de alternativas para el sistema de perforación

Para evaluar las alternativas se utilizan los siguientes criterios:

- Criterio 1: el sistema debe permitir realizar perforaciones con precisión.
- Criterio 2: debe efectuar perforaciones en tierra franco arenosa.
- Criterio 3: el mecanismo debe poseer dimensiones que vayan de acuerdo a la estructura del robot móvil.

En la Tabla 8 se realiza el análisis por medio criterios de ponderación: 1 cumple y 0 no cumple.

Tabla 8: Evaluación de criterios para selección del sistema de perforación

Alternativa	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Σ	Ponderación
Percusión	0	1	0	1	0,17
Rotopercusión	1	1	0	2	0,33
Rotación	1	1	1	3	0,5
Total				6	1

El sistema de rotación debe contar con una broca ahoyadora la cual deberá ir acoplada a un motor de 12 V. Dentro del mercado nacional e internacional no existen opciones

que cuenten con dicho acople, por ello se decide fabricarla con una impresora 3D. Para el material de elaboración se consideran los parámetros de impresión descritos en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros de impresión de PLA y ABS

Parámetro	ABS	PLA
Temperatura de extrusor	240-260 °C	200-220 °C
Temperatura de cama	>70 °C	Máximo 60 °C
Adhesivo de cama	Según el fabricante del filamento	No requiere

La poca disponibilidad de impresoras con características para trabajar con ABS hace que se descarte este material, por otro lado, la experiencia realizando impresiones con PLA hace que sea seleccionado para la fabricación de piezas que requiera el robot móvil.

12.5. Análisis de alternativas para el dosificador

El dosificador no requiere un análisis de alternativas, en [25], p. 4, se especifica que para la dosificación de leguminosas se utiliza un cilindro dentado. Para la fabricación del contenedor se plantea la utilización de acrílico o MDF, este dependerá la disponibilidad del material en los centros donde se realice el corte.

12.6. Análisis de alternativas para el controlador

Se requiere dos controladores, el primero para el robot móvil con los parámetros especificados en la Tabla 10, el segundo para el control inalámbrico que requiere los parámetros de la Tabla 11.

Tabla 10: Parámetros para el controlador del robot móvil

Entradas digitales	6
Salidas digitales	4
Salidas PWM	4
Comunicación con otro controlador	Inalámbrica
Alimentación	5-12V

Tabla 11: Parámetros para el controlador del mando robot móvil

Entradas digitales	5
Salidas digitales	4
Entradas analógicas	4
Comunicación con otro controlador	Inalámbrica
Alimentación	5-12V

Se tiene conocimiento en base a proyectos y trabajos realizados sobre dos controladores Raspberry y Arduino, se realiza un análisis entre estas dos opciones.

12.6.1. Raspberry

Las raspberry pi 3 b+ es un mini-procesador de software libre, la misma que cuenta con una memoria RAM, GPU(unidad de procesamiento gráfico), puertos USB, HDMI, Ethernet y 40 pines GPIO. Sus principales características se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12: Características Raspberry Pi 3 B+, [26]

Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC
Voltaje de operación	5 V
Corriente de operación	3 A
Puertos	GPIO 40 Pines
Entradas analógicas	-
Precio	\$ 130

12.6.2. Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, la cual cuenta con un microcontrolador ATMELE. Sus principales características se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13: Características Arduino Nano, [27]

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5 V
Corriente de operación	500 mA
Pines digitales	14
Pines analógicos	6
Precio arduino nano	\$ 15

12.6.3. Selección de controlador

Para evaluar las alternativas de los controladores se utilizan los siguientes criterios:

- Criterio 1: si el controlador posee mínimo 2 entradas analógicas.
- Criterio 2: el controlador posee mínimo 6 entradas digitales.
- Criterio 3: si el controlador está disponible en el mercado nacional.
- Criterio 4: compatibilidad con sensores, drivers y módulos inalámbricos.

En Tabla 14 se realiza el análisis por medio de criterios de ponderación: 1 cumple y 0 no cumple.

Tabla 14: Evaluación de criterios para selección del controlador

Alternativa	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Σ	Ponderación
Arduino Nano	1	1	1	1	4	0,66
Raspberry pi 3 b+	0	1	0	1	2	0,33
Total					6	1

La evaluación realizada en la Tabla 14 permite seleccionar el controlador Arduino Nano.

13. Diseño mecatrónico

En esta sección se presenta el diseño mecatrónico, el cual contempla una parte mecánica, electrónica e informática. Primero se establecen los parámetros principales de funcionamiento del robot móvil, estos se observan en la Tabla 15. Estos parámetros se basan en el estudio realizado anteriormente.

Tabla 15: Parámetros principales

Parámetro	Detalle
Dimensiones de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Altura surco: 10 cm. ■ Ancho de surco: 15 cm
Dosificación de semillas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Arveja: 3-4 semillas. ■ Chocho: 3-5 semillas
Separación entre semillas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Arveja: 25-30 cm. ■ Chocho: 25-50 cm. ■ Automático.
Perforación de suelo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Profundidad: máximo de 5 cm. ■ Suelo: Franco arenoso
Terreno de movilización de llantas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tierra
Tiempo de funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mínimo: 1 hora (requerimiento de diseño)
Tipo de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Batería externa: 12V, mínimo 9Ah.
Posicionamiento del robot	<ul style="list-style-type: none"> ■ Manual.
Tipo de dosificador	<ul style="list-style-type: none"> ■ Cilindro dentado.

Parámetro	Detalle
Tipo de locomoción	<ul style="list-style-type: none"> ■ Omnidireccional diámetro 80 mm, total de ruedas 4.
Sistema de perforación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Perforación por rotación. ■ Broca ahoyadora.
Velocidad de desplazamiento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Máximo 1 m/s.
Área de sembrado	<ul style="list-style-type: none"> ■ 5,8 m².

Tomando las consideraciones para el diseño se realiza el modelo en 3D del robot móvil como se muestra en la Figura 33, este diseño cumple con todos los parámetros para realizar la dosificación y colocación de semilla en el sitio de siembra. El control inalámbrico se muestra en la Figura 34.

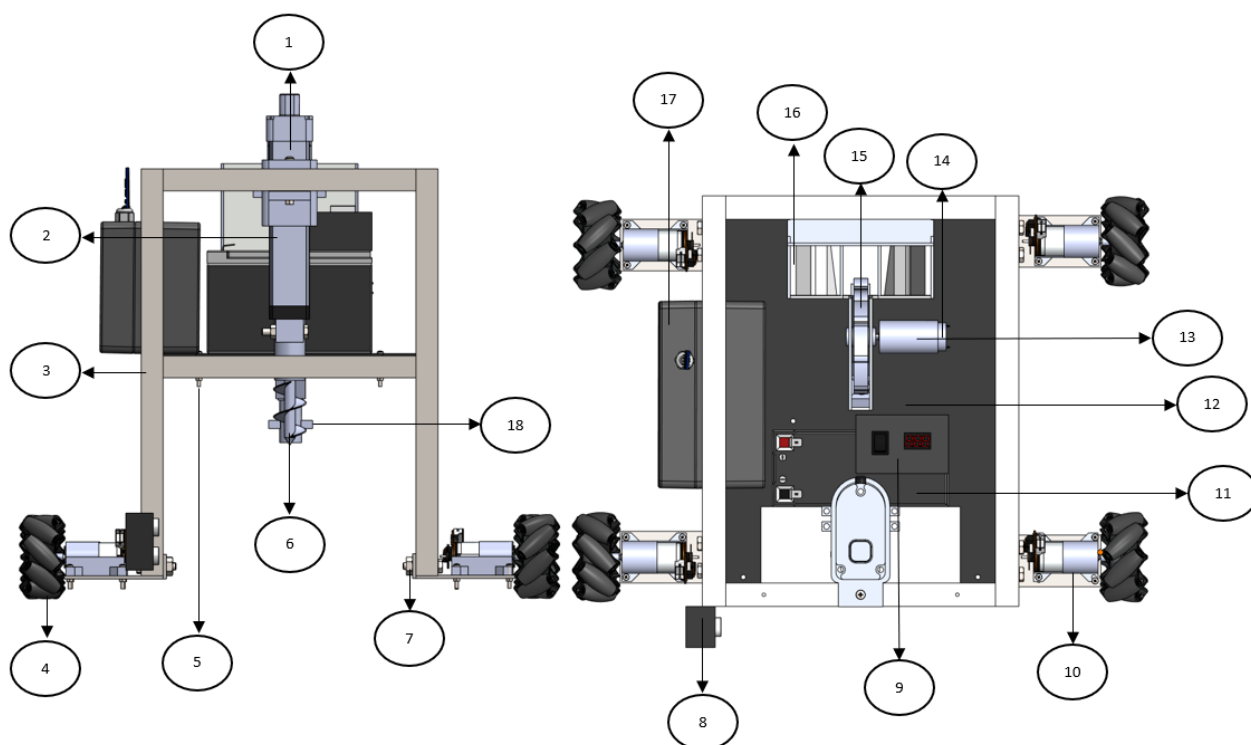


Figura 33: Modelo 3D de robot móvil para siembra con cambio de herramienta

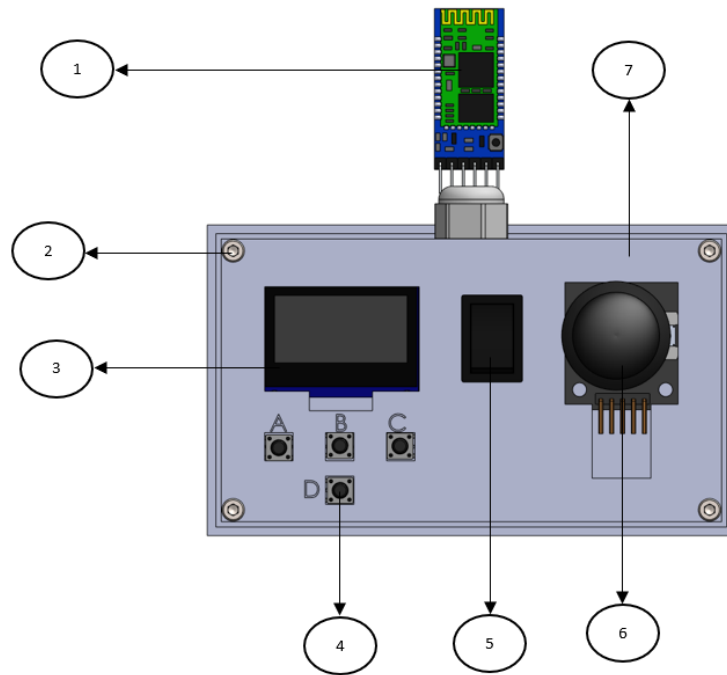


Figura 34: Modelo 3D del control inalámbrico del robot móvil.

En la Tabla 16 se hace una descripción de los elementos principales del robot móvil.

Tabla 16: Partes principales robot móvil.

Numeración	Descripción
1	Actuador lineal
2	Soporte actuador lineal
3	Estructura robot móvil
4	Llanta omnidireccional
5	Perno unión platina
6	Broca ahoyadora
7	Perno sujeción motores
8	Sensor de hilera

Numeración	Descripción
9	Visualizador de voltaje y Interruptor ON/OFF
10	Soporte motores y platina sujeción motores
11	Batería
12	Platina soporte elementos principales
13	Soporte motor dosificador
14	Motor dosificador
15	Dosificador
16	Contenedor semillas
17	Caja eléctrica/elementos electrónicos
18	Sensor IR conteo de semillas

En la Tabla 17 se hace una descripción de los elementos principales del control inalámbrico, este cuenta con una batería de 5 V.

Tabla 17: Partes mando inalámbrico.

Numeración	Descripción
1	Módulo Bluetooth
2	Pernos sujeción case del control

Numeración	Descripción
3	Pantalla Oled
4	Pulsadores
5	Interruptor ON/OFF
6	Joystick
7	Case del control

14. Diseño mecánico

El diseño mecánico comprende la estructura del robot móvil y la platina del soporte del motor. Para el diseño de la estructura se divide a los perfiles en tres, cada uno con sus dimensiones respectivas. Para el tamaño del perfil principal se consideró el ancho de hilera donde se realizará la siembra, para el perfil terciario se consideró la altura pertinente para la colocación del sistema de la broca, por último el perfil secundario tiene el tamaño para la colocación de la platina principal y los elementos que esta contenga. Los perfiles se los puede observar en la Figura 35.

1. Perfil secundario, 350 mm de largo.
2. Perfil terciario, 370 mm de largo.
3. Perfil principal, 230 mm de largo.

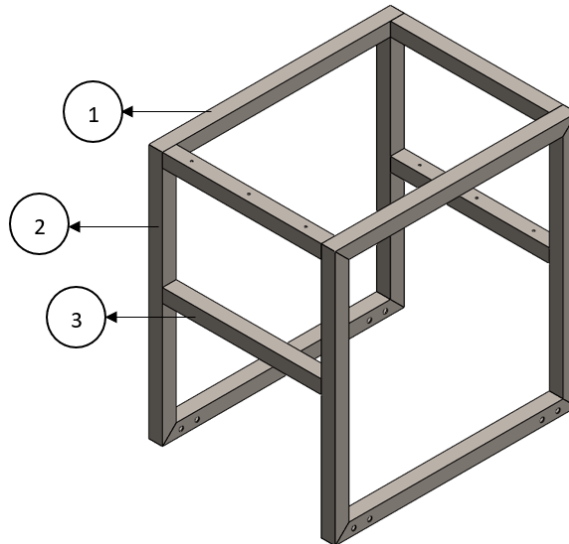


Figura 35: División de los perfiles en la estructura principal.

14.1. Diseño perfil principal


Para el diseño del perfil principal se determinan la carga total a la que está sometida, para ello se establece la masa de los elementos: batería, platina elementos principales, elementos electrónicos y en adicional la masa de una persona, esta se añade como un factor de seguridad para garantizar que pueda soportar si se agrega algún elemento en el futuro. En la Tabla 18 se detalla la masa de cada elemento.

Tabla 18: Carga en la perfil principal

Descripción	Cantidad	Masa (kg)
Batería	1	2,4
Platina elementos principales	1	0,8
Elementos electrónicos	1	0,4
Masa persona	1	80,4
Total		84

La masa total se la transforma en peso y se obtiene una carga total de 823,2 N. En la sección anterior se dividió a la estructura en tres perfiles, de estos tres perfiles el principal soporta el peso de platina, batería, sistema dosificador, motor dosificador, caja eléctrica y semillas. Debido a que este perfil soporta la mayor cantidad de carga la selección de los demás se basará en la de este. El análisis de alternativas del material determinó que las

dimensiones del perfil deben garantizar que la estructura ocupe el menor espacio para su movilidad dentro de los surcos. En la Figura 42 se detallan tres alternativas para su análisis.



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	I cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

Figura 36: Catálogo DIPAC perfiles cuadrados, [28].

14.1.1. Diseño de perfil a flexión

Este criterio de diseño permite determinar el mínimo valor permisible del módulo de sección para el perfil con (1), [29].

$$S_{min} = \frac{M_{max}}{\sigma_{perm}} \quad (1)$$

Donde:

S_{min} Mínimo valor permisible del módulo de sección para el perfil, en cm³;

M_{max} Momento flector máximo en el perfil principal, en N·mm;

σ_{perm} Esfuerzo permisible para el material, en MPa.

Se realiza un diagrama de cuerpo libre que visualiza la Figura 37 considerando el largo del perfil y la carga establecida en la Tabla 18.

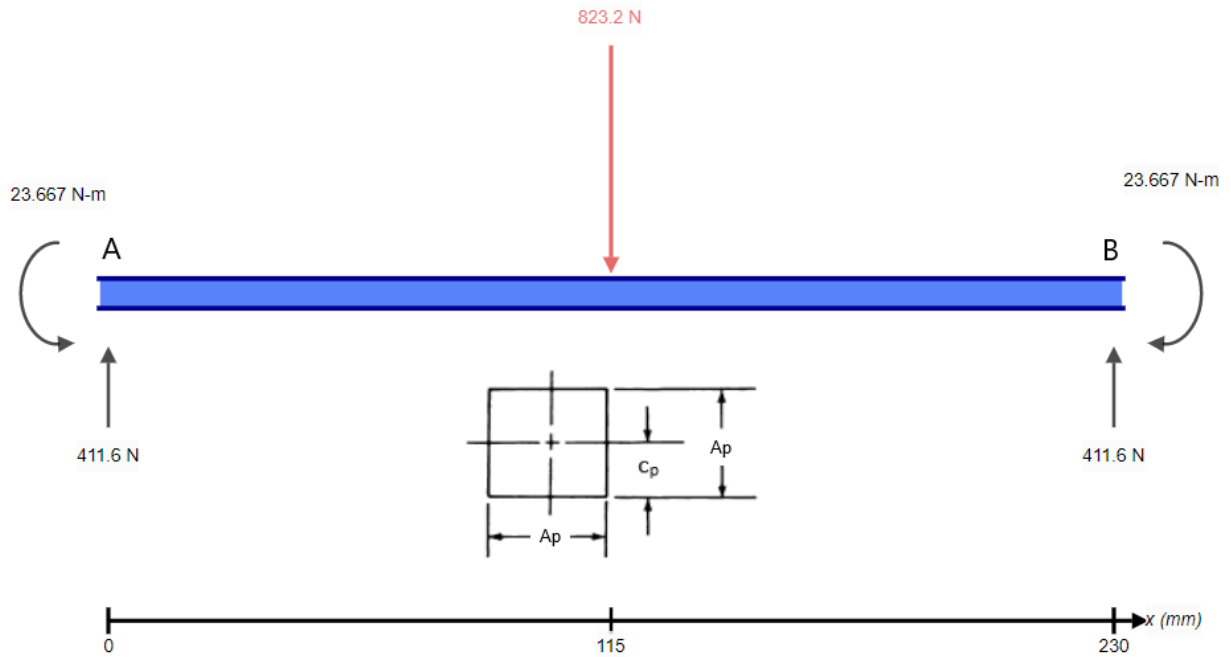


Figura 37: Diagrama de cuerpo libre perfil principal.

Para el cálculo de las reacciones se utiliza las fórmulas detalladas en la Figura 38.

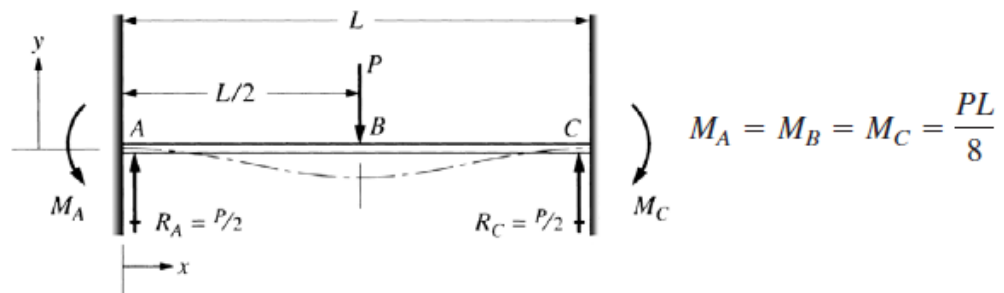


Figura 38: Reacciones y momentos de una viga con apoyos fijos, p. 912, [30].

Para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y B se utiliza (2).

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} \quad (2)$$

Donde:

R_A Reacción en el apoyo A, en N;

R_B Reacción en el apoyo B, en N;

F Fuerza ejercida sobre el perfil principal, en N.

Se reemplazan los datos en (2):

$$R_A = R_B = \frac{823,2 \text{ [N]}}{2}$$

$$R_A = R_B = 411,6 \text{ [N]}$$

El momento flector máximo se determina con (3), [30].

$$M_{max} = \frac{F \cdot L_p}{8} \quad (3)$$

Donde:

M_{max} Momento flector máximo en el perfil, en N·mm;

L_p Largo del perfil principal, en mm.

Se reemplazan los valores en (3):

$$M_{max} = \frac{823,2 \text{ [N]} \cdot 230 \text{ [mm]}}{8}$$

$$M_{max} = 23667 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Con la obtención de las reacciones se procede a realizar el diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores, se los visualiza en la Figura 39 y Figura 40 respectivamente.

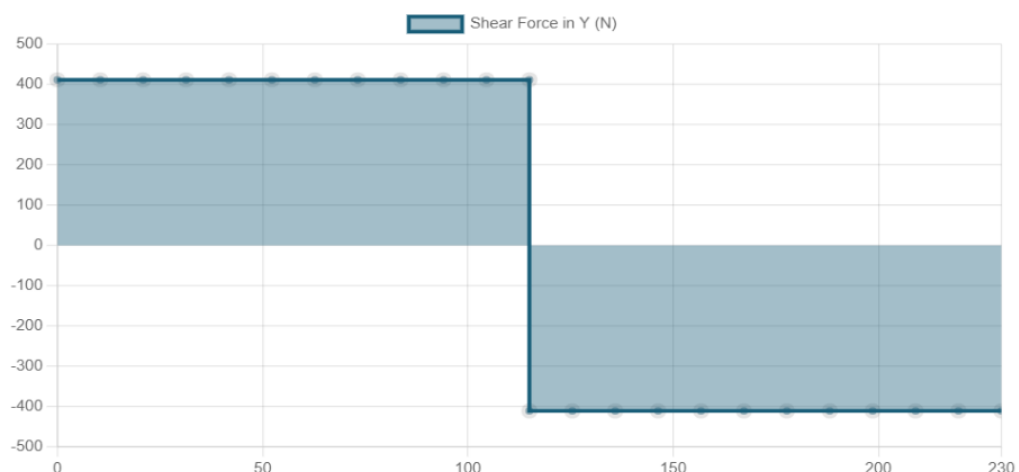


Figura 39: Diagrama de fuerza cortante en la perfil principal.

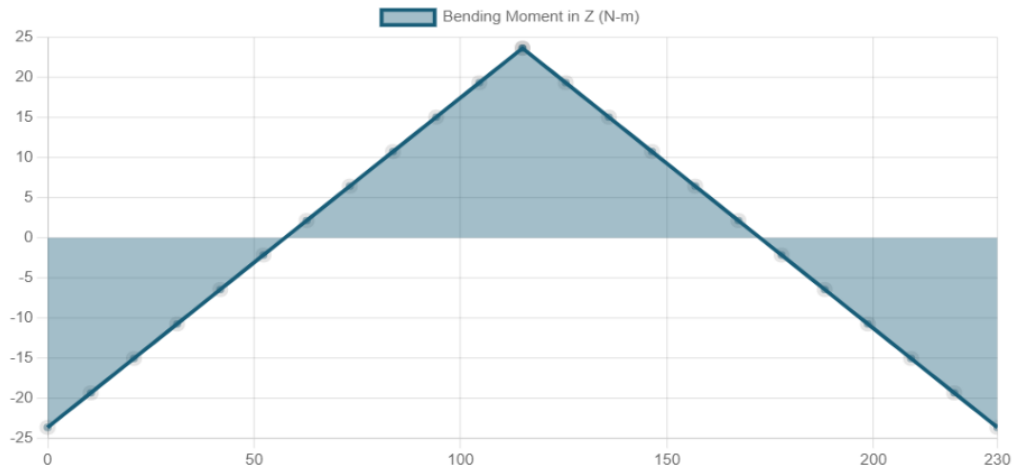


Figura 40: Diagrama momento flector en la perfil principal.

El resultado de los diagramas se observa en la Figura 41.

Support at	X	Y	Mx
0	0 N	411.6 N	23.667 N-m
230	0 N	411.6 N	-23.667 N-m

Figura 41: Resultado de los diagramas fuerzas cortantes y momento flector.

Con el momento flector máximo se procede a determinar el esfuerzo normal máximo con (4), [29].

$$\sigma_m = \frac{M_{max} \cdot c_p}{I_p} \quad (4)$$

Donde:

σ_m Esfuerzo normal máximo, en MPa;

c_p Distancia máxima a la superficie neutra, en mm;

I_p Segundo momento de la sección transversal, en mm⁴.

Para obtener I_p se utiliza (5), [30].

$$I_p = \frac{A_p^4}{12} \quad (5)$$

Donde:

A_p Ancho del perfil, en mm.

Se reemplazan los datos en (4):

$$\sigma_m = \frac{23667 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \cdot 10 \text{ [mm]}}{13333 \text{ [mm}^4\text{]}}$$

$$\sigma_m = 17,75 \text{ [MPa]}$$

El esfuerzo permisible se determina por medio de (6), [29].

$$FS = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_m} \quad (6)$$

Donde:

FS Factor de seguridad del diseño, adimensional.

Para determinar FS se utiliza los criterios de [30], p. 185. El factor de seguridad para diseño de elementos de maquina con una confianza promedio en los datos de diseño es de 2,5.

Se reemplazan los datos en (6):

$$2,5 = \frac{\sigma_{perm}}{17,75 \text{ [MPa]}}$$

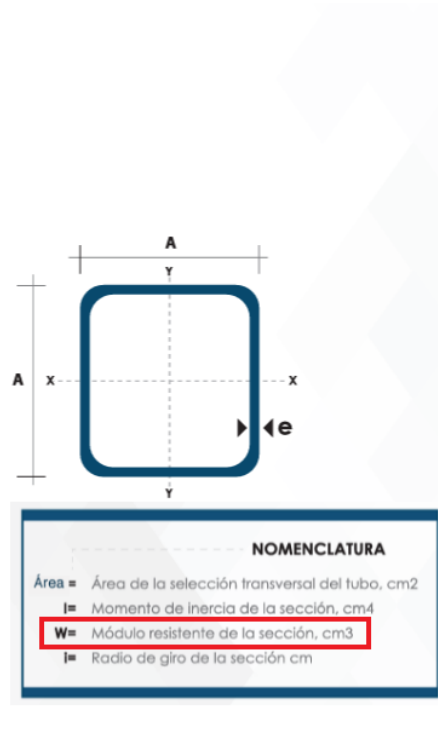
$$\sigma_{perm} = 44,4 \text{ [MPa]}$$

Los datos obtenidos son reemplazados en (1):

$$S_{min} = \frac{23,66 \text{ [N} \cdot \text{m]}}{44,4 \text{ [MPa]}}$$

$$S_{min} = 533,59 \times 10^{-9} \text{ [m}^3\text{]} = 0,53 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Con la obtención de S_{min} se procede a buscar el perfil que cuente con este valor, en la Figura se observa en el perfil seleccionado.



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

NOMENCLATURA

Área = Área de la selección transversal del tubo, cm²
 I = Momento de inercia de la sección, cm⁴
 W = Módulo resistente de la sección, cm³
 i = Radio de giro de la sección cm

Figura 42: Selección del perfil mediante valor permisible del módulo de sección, [28].

14.1.2. Análisis de deflexión máxima del perfil principal

Se realiza este análisis para determinar un valor máximo admisible para la deflexión, la misma que se detalla en la Figura 43, posterior se realiza una simulación para visualizar que la deformación no supere el máximo.

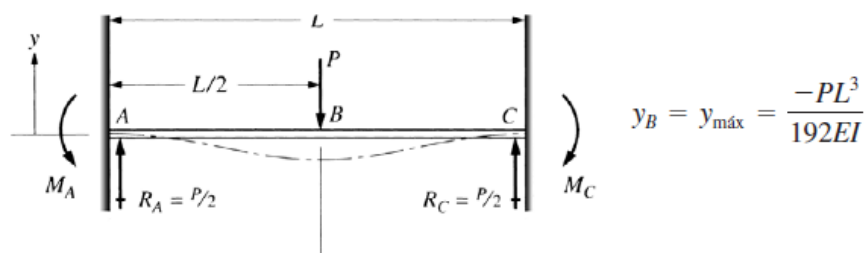


Figura 43: Deflexión máxima de un perfil con apoyos fijos, p. 912 [30].

Para determinar la deflexión máxima se utiliza (7), [30].

$$y_{\max} = \frac{-F \cdot L_p^3}{192 \cdot E \cdot I_p} \quad (7)$$

Donde:

E Módulo de elasticidad del material, en GPa.

El material del perfil cuadrado lo especifica el fabricante el cual es acero A36 con norma ASTM500, sus propiedades se observan en la Figura 44.

Material	Densidad, kg/m ³	Resistencia última			Cedencia ³		Módulo de elasticidad, GPa	Módulo de rigidez, GPa	Coeficiente de expansión térmica, 10 ⁻⁶ /°C	Ductilidad, porcentaje de elongación en 50 mm
		Tensión, MPa	Compresión, ² MPa	Cor-tante, MPa	Tensión, MPa	Cor-tante, MPa				
Acero										
Estructural (ASTM-A36)	7 860	400			250	145	200	77.2	11.7	21
Alta resistencia-aleación baja										
ASTM-A709 Grado 345	7 860	450			345		200	77.2	11.7	21
ASTM-A913 Grado 450	7 860	550			450		200	77.2	11.7	17
ASTM-A992 Grado 345	7 860	450			345		200	77.2	11.7	21
Templado										
ASTM-A709 Grado 690	7 860	760			690		200	77.2	11.7	18

Figura 44: Propiedades físicas de acero estructural, p. 747 [29].

Se reemplazan los valores en (7):

$$y_{max} = \frac{-823,2 \text{ [N]} \cdot 0,23^3 \text{ [m}^3\text{]}}{192 \cdot 200 \text{ [GPa]} \cdot 13,33 \times 10^{-9} \text{ [m}^4\text{]}}$$

$$y_{max} = 0,37 \text{ [mm]}$$

Se obtiene un valor máximo admisible para la deflexión del perfil igual a 0,37 mm.

14.1.3. Simulación análisis por elementos finitos

Con la selección del perfil se realiza una simulación por medio del programa SolidWorks, a fin de determinar la deformación máxima que sufrirá el perfil sometida a la carga que se eligió para el diseño. Como se observa en la Figura 45 la deformación máxima es de 0,10 mm mientras que la deflexión admisible es de 0,37 mm. Esto quiere decir que la deflexión obtenida por simulación es menor a la deflexión por cálculo afirmando que el perfil principal no sufrirá fallos.

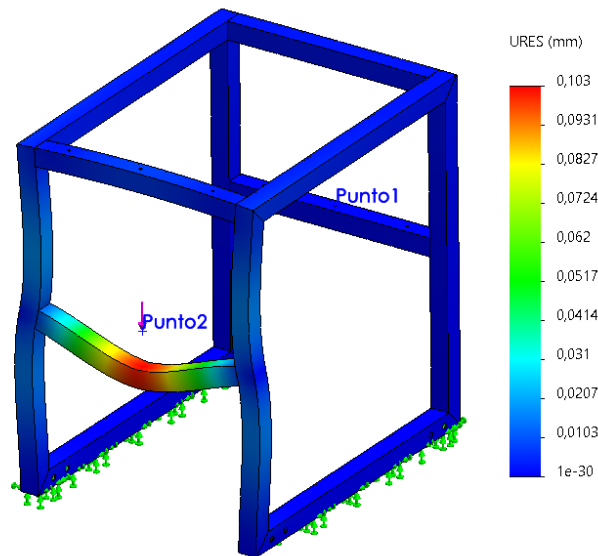


Figura 45: Simulación deflexión en el perfil principal.

14.1.4. Diseño de soldadura perfil principal

El diseño de la soldadura se hace por medio del criterio de uniones soldadas sujetas a flexión por el tipo de carga y ubicación de los perfiles en la estructura del robot móvil como se puede observar en la Figura 46.

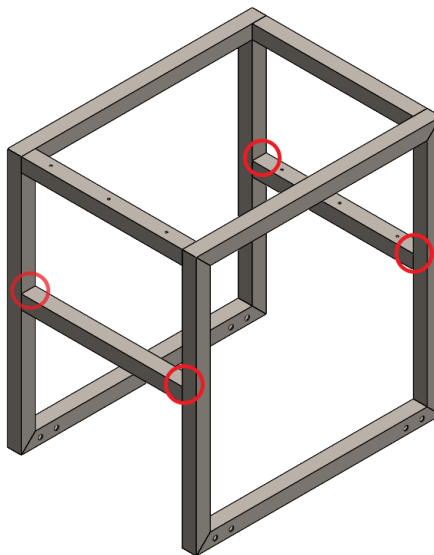


Figura 46: Uniones soldadas de la estructura sujetas a flexión.

En la Figura 47 se muestra una unión tipo filete superior e inferior, la fuerza aplicada genera un cortante primario en la soldadura, mientras que el momento generado crea un cortante secundario en el cordón.

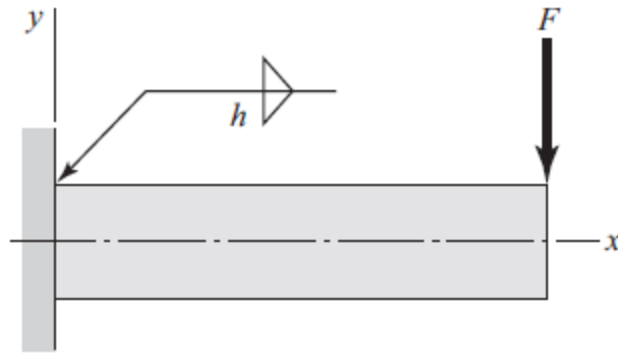


Figura 47: Voladizo con unión tipo filete, [31].

Para calcular el esfuerzo cortante primario se emplea (8), [31]. El esfuerzo cortante secundario se determina por medio de (9), [31].

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad (8)$$

$$\tau'' = \frac{M_s \cdot c}{I_s} \quad (9)$$

Donde:

V Carga en la soldadura, en N;

τ' Esfuerzo cortante primario en el cordón de soldadura, en MPa;

τ'' Esfuerzo cortante secundario en el cordón de soldadura, en MPa;

c Distancia desde el centroide del perfil hasta el punto crítico, en mm;

A Área del cordón de soldadura en mm^2 ;

I_s Segundo momento de área del cordón de soldadura, en mm^4 ;

M_s Reacción de momento producido por la fuerza en el perfil, en N·mm.

Para determinar el patrón de los cordones se debe tomar en cuenta la facilidad de suelda respecto a la ubicación de las piezas que se desea unir, como se observa en la Figura 46 los cordones no deben interferir en la ubicación de la platina principal debido a esto se hace una selección de cordones verticales. Este patrón de soldadura se observa en la Figura 48.

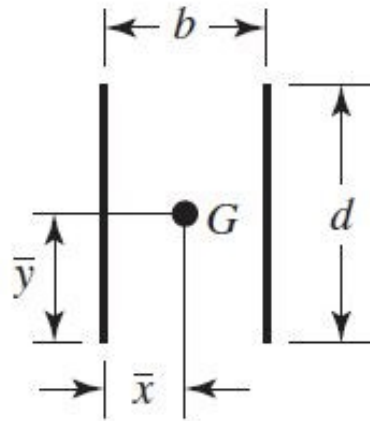


Figura 48: Patrón de soldadura cordones verticales, [31].

El perfil seleccionado es cuadrado (20×20 mm), debido a esto $x = y$ y $b = d$, esta información permite determinar el segundo momento unitario del área del cordón, el cual se obtiene con (10), [31].

$$I_u = \frac{d^3}{6} \quad (10)$$

Donde:

d Altura del cordón de soldadura, en mm;

I_u Segundo momento unitario del área del cordón, en mm^3 .

Se reemplazan los datos en (10) para obtener:

$$I_u = \frac{20^3 [\text{m}^3]}{6}$$

$$I_u = 1333,3 [\text{m}^3]$$

Se procede a calcular segundo momento de área del cordón de soldadura por medio de (11), [31].

$$I_s = 0,707 \cdot h \cdot I_u \quad (11)$$

Donde:

h Cateto del cordón de soldadura, en mm.

Se reemplazan los datos en (11):

$$I_s = 0,707 \cdot h \cdot 1333,3 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$I_s = 942,6 \cdot h \text{ [mm}^3\text{]}$$

El siguiente paso es calcular el área del cordón de soldadura que de igual manera quedará en función del cateto del cordón, se obtiene por medio de (12), [31].

$$A = 1,414 \cdot h \cdot d \quad (12)$$

Se reemplazan los datos en (12):

$$A = 28,3 \cdot h \text{ [mm]}$$

Con el cálculo realizado, se determina la reacción del momento por la fuerza en el perfil con (13), [31].

$$M_s = \frac{F \cdot L_p}{8} \quad (13)$$

Reemplazando en (13):

$$M_s = \frac{823,2 \text{ [N]} \cdot 230 \text{ [mm]}}{8}$$

$$M_s = 23667 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Con todas variables determinadas se procede a reemplazar tanto en (8) como en (9):

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{823,2 \text{ [N]}}{28,3 \cdot h \text{ [mm]}} \\ \tau' &= \frac{29,1}{h} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \\ \tau'' &= \frac{23667 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \cdot 20 \text{ [mm]}}{942,6 \cdot h \text{ [mm}^3\text{]}} \\ \tau'' &= \frac{502,2}{h} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \end{aligned}$$

La combinación de los esfuerzos obtenidos da como resultado el esfuerzo total sobre el cordón de soldadura, para esto se hace una combinación vectorial con (14), [31].

$$\tau = \sqrt{(\tau')^2 + (\tau'')^2} \quad (14)$$

Donde:

τ Esfuerzo máximo sobre el cordón de soldadura, en MPa.

Reemplazando en (14):

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{29,1}{h}\right)^2 + \left(\frac{502,2}{h}\right)^2} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$$

$$\tau = \frac{503,1}{h} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$$

Como se puede observar el esfuerzo encontrado quedó en función de h . Para la obtención de este valor del cateto se lo hace en función del factor de seguridad, el cual se lo puede observar en la Figura 49.

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	n^*
Tensión	A tope	$0.60S_y$	1.67
Aplastamiento	A tope	$0.90S_y$	1.11
Flexión	A tope	$0.60-0.66S_y$	1.52-1.67
Compresión simple	A tope	$0.60S_y$	1.67
Cortante	A tope o de filete	$0.30S_{ut}^{\dagger}$	

Figura 49: Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte, p. 468, [31].

Como se observa el factor de seguridad a flexión está en el rango de 1,52 a 1,67. El factor de seguridad está definido por (15), [31].

$$n = \frac{\tau_p}{\tau} \quad (15)$$

Donde:

τ_p Esfuerzo permisible del material de aporte, en MPa;

n Factor de seguridad para el cordón de soldadura, adimensional.

Para determinar el esfuerzo permisible se utiliza (16):

$$\tau_p = 0,66 \cdot S_{ys} \quad (16)$$

Donde:

S_{ys} Resistencia a la fluencia del material, en MPa.

Para la selección de S_{ys} es necesario seleccionar el electrodo, para ello se observa la Figura 50.

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

Figura 50: Propiedades mínimas del metal de aporte, p. 468, [31].

Se selecciona el electrodo E60xx con una resistencia a la fluencia de 345 MPa, con un factor de 1,67. Se reemplaza en (15):

$$h = 3,7 \text{ mm}$$

El valor de h encontrado es el valor mínimo que deberá tener el cateto del cordón de soldadura para las uniones permanentes entre los perfiles, los cuales son de acero A36 Norma ASTM-500, [28]. Para la elección del electrodo se utiliza la Figura 51.

ESPECIFICACIÓN DE ACERO		R. DE CEDENCIA		R. A LA TENSIÓN		ELECTRODO SUGERIDO
		kpsi	MPa	kpsi	MPa	
ASTMA36		36	250	58-80	400-550	TODOS
ASTMA53	Grado B	35	240	60 min.	415 min.	1,2,3,9,10,11,12,13
ASTMA106	Grado B	35	240	60 min.	415 min.	9,10,11,12,13
ASTMA131	Gr A,B,CS,D,DS,E	34	235	58-71	400-490	9,10,11,12,13
ASTMA139	Grado B	35	240	60 min.	415 min.	9,10,11,12,13
ASTMA381	Grado Y36	35	240	60 min.	415 min.	TODOS
ASTMA500	Grado A	33	228	45 min.	310 min.	TODOS
	Grado B	42	290	58 min.	400 min.	8,9,10,11,12,13
ASTMA501		36	250	58 min.	400 min.	1,2,3,9,10,11,12,13
ASTMA516	Grado 55	30	205	55-75	380-515	7,8,9,10,11,12,13
	Grado 60	32	220	60-80	415-550	7,8,9,10,11,12,13
ASTMA524	Grado I	35	240	60-85	415-586	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
	Grado II	30	205	55-80	380-550	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
ASTMA529		42	290	60-85	415-550	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
ASTMA570	Grado 30	30	205	49 min.	340 min.	1,2,3,4,5,6,7,8
	Grado 33	33	230	52 min.	360 min.	1,2,3,4,5,6,7,8
	Grado 36	36	250	53 min.	365 min.	1,2,3,4,5,6,7,8
	Grado 40	40	275	55 min.	380 min.	1,2,3,4,5,6,7,8
	Grado 45	45	310	60 min.	415 min.	1,2,3,4,5,6,7,8
	Grado 50	50	345	65 min.	450 min.	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
ASTMA709	Grado 36	36	250	58-80	400-550	TODOS
API5L	Grado B	35	240	60	415	1,2,3,4,5,6,7,10,11,13
	Grado X42	42	290	60	415	1,2,3,4,5,6,7,10,11,13

Figura 51: Electrodo para aceros con norma ASTM, [32].

El grado es tipo B debido a que este se emplea en el campo de la construcción de estructuras maquinaria, [33]. El electrodo seleccionado es un E6013. Con el valor de h determinado se procede a obtener los valores de τ, τ', τ'' :

$$\tau = 136 \text{ [MPa]}$$

$$\tau' = 7,8 \text{ [MPa]}$$

$$\tau'' = 135,7 \text{ [MPa]}$$

14.2. Dimensionamiento soporte motor

Para poder acoplar los motores a la estructura se diseñaron dos componentes, el primero es una pieza impresa en 3D en material PLA, la cual puede acoplar motores con las dimensiones especificadas en la Figura 52. El parámetro que varía es el tamaño del reductor (L) que depende de la relación de engranes. En la Figura 53 se observan opciones de motores que cuentan con una variación en el tamaño del reductor de entre 18 a 27 mm.

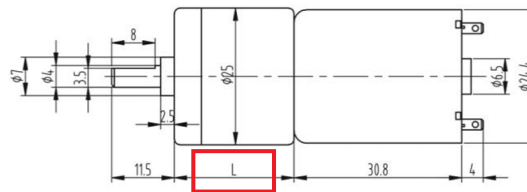


Figura 52: Dimensiones motores de 12 V, [34].

Especificaciones de motores						
NO	Tipo de motor	RPM	Voltaje Nominal	Corriente de Bloqueo	Torque	Relación Caja Reductora
12	JGA25-370	1931	12 V	1200 mA	0.44 kg·cm	1:4.4 Gearmotor
13	JGA25-370	915	12 V	1200 mA	1 kg·cm	1:9.28 Gearmotor
14	JGA25-370	399	12 V	1200 mA	2.2 kg·cm	1:21.3 Gearmotor
15	JGA25-370	250	12 V	1200 mA	3.8 kg·cm	1:34 Gearmotor
16	JGA25-370	188	12 V	1200 mA	5 kg·cm	1:45 Gearmotor
17	JGA25-370	108	12 V	1200 mA	8.4 kg·cm	1:78 Gearmotor
18	JGA25-370	82	12 V	1200 mA	11 kg·cm	1:103 Gearmotor
19	JGA25-370	50	12 V	1200 mA	18 kg·cm	1:171 Gearmotor
20	JGA25-370	37	12 V	1200 mA	24 kg·cm	1:226 Gearmotor
21	JGA25-370	22	12 V	1200 mA	>24 kg·cm	1:378 Gearmotor

Figura 53: Alternativas de motores 12 V, [34].

El resultado del diseño de la pieza se visualiza en la Figura 54, puede acoplar motores que cuenten con las dimensiones de la Figura 52, con una variación de (L) entre los 18 a 27 cm.

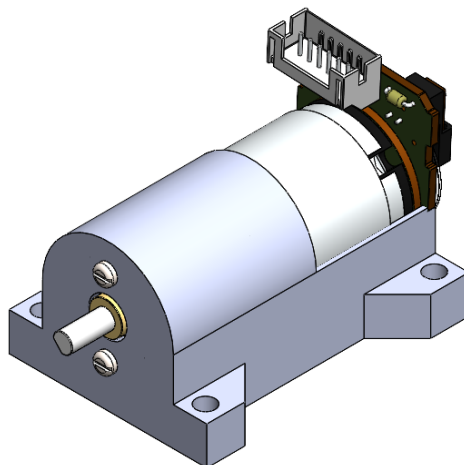


Figura 54: Motor acoplado a la pieza impresa en 3D.

La segunda pieza son dos platinas soldadas en forma de ángulo estructural para poder sujetar la pieza en 3D con el motor a la estructura principal.

14.3. Dimensionamiento soldadura de las platinas

Para realizar el diseño del cordón de soldadura y posterior el diseño de la resistencia a la fractura de la unión es necesario establecer los parámetros, los cuales se pueden observar en la Tabla 19, están establecidos para que la pieza impresa en 3D cuente con el espacio suficiente para que sea sujeta sin ningún problema.

Tabla 19: Parámetros para diseño de platinas

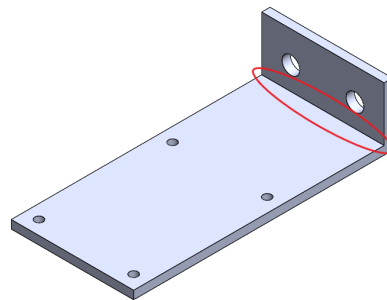
Descripción	Acero A36
Dimensión platina pequeña	44 × 22,5 × 3 mm
Dimensión platina grande	44 × 93 × 3 mm
Pernos	M6
Tamaño cateto suelda	3,7 mm

En la Tabla 20 se detalla la masa total que soporta las platinas, se añade un 50% de la masa total como un factor de seguridad. La masa total se multiplica por la gravedad para obtener el peso total del robot móvil, igual a 147 N.

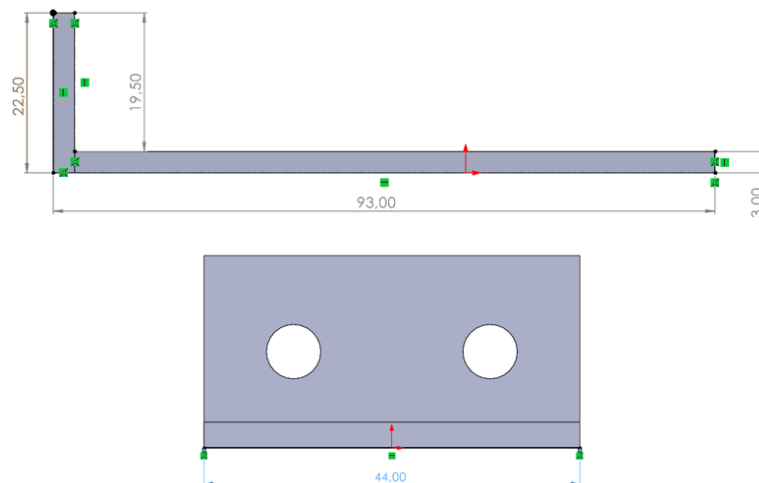
Tabla 20: Masa que soporta las platinas

Descripción	Cantidad	Masa total (kg)
Estructura	1	5,5
Batería	1	2,4
Platinas soporte motor	4	0,3
Platina elementos principales	1	0,9
Elementos electrónicos	1	0,4
Dosificador	1	0,5
Factor de seguridad	1	5
Total		15

La unión de las platinas se puede observar en la Figura 55, en esta pieza va sujeta el acople donde van ubicados los motores.

**Figura 55:** Platinas con unión permanente.

Las dimensiones principales y material de las platinas se pueden observar en la Figura 56, el material de estas platinas es acero A36.

**Figura 56:** Dimensiones de las platinas.

Este tipo de unión es de chaflán la cual cuenta con una forma de triángulos rectángulos con catetos desiguales como se puede observar la Figura 58, [30].

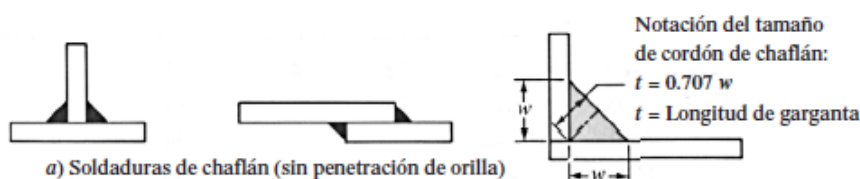


Figura 57: Soldadura de chaflán.

Previamente se calculó un tamaño de cateto con su respectivo electrodo, para conocer si esta unión no presentará falla se analiza la Figura 58 en la cual se especifican los tamaños máximos de cateto para uniones de chaflán.

Espesor de la placa (pulg)	Tamaño máximo del lado, para soldaduras de chaflán (pulg)
$\leq 1/2$	3/16
$> 1/2 - 3/4$	1/4
$> 3/4 - 1\frac{1}{2}$	5/16
$> 1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{4}$	3/8
$> 2\frac{1}{4} - 6$	1/2
> 6	5/8

Figura 58: Tamaños mínimos de cordón para placas, [30].

El espesor de la placa es de 3 mm es decir 0,1 pulg, esto determina el tamaño máximo del cateto, 3/16 pulg el cual es equivalente a 4,8 mm. El valor de cateto encontrado fue de 3,7 mm, por lo tanto, es un valor menor al máximo permitido, esto indica que no presentará fallas.

14.3.1. Simulación soldadura de platinas

Una vez dimensionado el cateto del cordón de soldadura para la unión de las platinas se procede a realizar la simulación para determinar que el cordón no presentará fallas. Para garantizar que la simulación sea correcta es necesario ingresar los parámetros seleccionados los cuales son: factor de seguridad, espesor del cateto de soldadura, electrodo seleccionado y la fuerza de soldadura la cual es el peso de la estructura especificada en la Tabla 20. Los datos ingresados se observan en la Figura 59.

Tamaño de soldadura

Estándar norteamericano
 Estándar europeo

Electrodo: E60

Fuerza de soldadura: 273032388.809 N/m²

Factor de seguridad:

 Estándar nacional americano para grúas elevadoras de vehículos

 Bajo los dispositivos con gancho de suspensión

1,67

Tamaño de soldadura estimado

3.7 mm

Figura 59: Parámetros de ingreso para simulación.

La simulación se realizó por medio de elementos finitos en el software SolidWorks, y esta indica si el cateto de soldadura ingresado es el correcto o si este sufre alguna falla, de igual manera da el tamaño mínimo de dicho cateto como se observa en la Figura 60. La simulación da un cateto menor para que el cordón de soldadura no sufra ningún daño, esto quiere decir que dicho cordón no sufrirá daños en la unión de las platinas.



Figura 60: Simulación elementos finitos para cordón soldadura de platinas.

14.3.2. Dimensionamiento de pernos a corte

Para realizar el dimensionamiento de los pernos se debe analizar cómo está distribuida la carga sobre los pernos, como se observa en la primera ilustración de la Figura 61, se produce una falla por carga cortante.

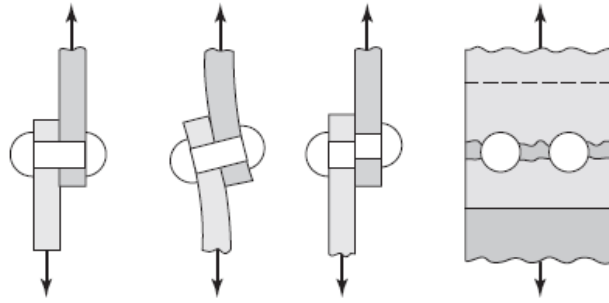


Figura 61: Modos de falla por carga cortante, [31].

En la Figura 62 se observa los pernos que deben ser dimensionados debido a que soportan el peso total de la estructura.

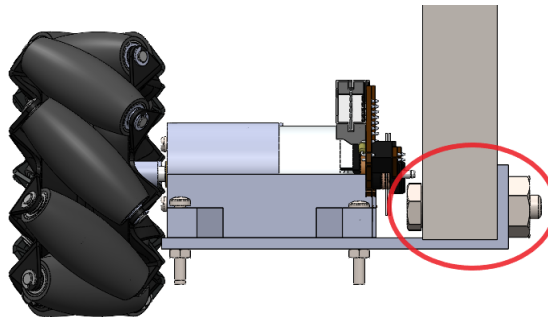


Figura 62: Pernos para sujeción del acople de motores a la estructura principal.

El primer paso a realizar es el cálculo de la resistencia de fluencia al corte por medio de (17), [31].

$$S_{yc} = 0,5 \cdot S_y \quad (17)$$

Donde:

S_{yc} Resistencia de fluencia al corte, en MPa;

S_y Resistencia mínima a la fluencia, en MPa.

Para obtener la resistencia mínima a la fluencia se utiliza la Figura 63.








Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima, † MPa	Resistencia mínima a la tensión, † MPa	Resistencia mínima a la fluencia, † MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero aleado, T y R	

Figura 63: Propiedades mecánicas de pernos, [31].

Primero se selecciona un perno M6 con clase de propiedad 4,6 debido a que tiene el valor mínimo de fluencia, esto con el propósito de diseñar el caso más crítico.

El valor de resistencia a la fluencia es 240 MPa, se reemplaza en (17):

$$S_{yc} = 0,5 \cdot 240 \text{ [MPa]}$$

$$S_{yc} = 120 \text{ [MPa]}$$

Para determinar el diámetro mínimo que deberán tener los pernos se utiliza (18), [29].

$$S_{yc} = \frac{P_u}{A_n} \quad (18)$$

Donde:

A_n Área necesaria al esfuerzo, en mm²;

P_u Carga última en el perno, en N.

El área necesaria al esfuerzo es el área del perno se puede reescribir con (19), [29].

$$A_n = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (19)$$

Donde:

d_p Diámetro mínimo del perno, en mm.

El termino P_u se determina con (20), [29].

$$P_u = FS \cdot P \quad (20)$$

Donde:

P Carga sometida en el perno, en N.

Reemplazando en (18):

$$S_{yc} = \frac{4 \cdot P_u}{\pi \cdot d_p^2}$$

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot 367,5 \text{ [N]}}{\pi \cdot 120 \text{ [MPa]}}}$$

$$d_p = 2 \text{ [mm]}$$

El diámetro mínimo para el perno no sufra fallas es de 2 mm. La selección fue de un perno M6 que cuenta con un diámetro de 6 mm, sus características se las puede observar en la Figura 64. En conclusión, el perno no sufrirá ningún fallo debido a que el seleccionado cuenta con diámetro mayor al mínimo permitido.

PERNO HEXAGONAL MEDIA ROSCA													DIN 931								
		Grade A and B		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">GRADO DE RESISTENCIA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8.8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>10.9</td> <td></td> </tr> <tr> <td>12.9</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										GRADO DE RESISTENCIA		8.8		10.9		12.9	
		GRADO DE RESISTENCIA																			
8.8																					
10.9																					
12.9																					
mm																					
Rosca	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30							
Paso	0.7	0.8	1	1.25	1.5	1.75	2	2	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5							
b	125	14	16	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	60	66						
	L ≥ 200	-	22	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	66	72						
	200	-	-	-	-	45	49	53	57	61	65	69	73	79	85						
k	2.8	3.5	4	5.3	6.4	7.5	8.8	10	11.5	12.5	14	15	17	18.7							
e	A	7.66	8.79	11.05	14.38	18.9	21.1	24.49	26.75	30.14	33.53	35.72	39.98	45.2	50.85						
	B	-	8.63	10.89	14.20	18.72	20.88	23.91	26.17	29.56	32.95	35.03	39.55	45.2	50.85						
S	7	8	10	13	17	19	22	24	27	30	32	36	41	46							
L	25-40	25-50	30-60	35-80	40-100	45-120	50-140	55-160	65-180	65-200	70-220	80-240	90-260	90-300							

Figura 64: Características pernos media rosca, [35].

14.4. Dimensionamiento platina principal

Las dimensiones de la platina principal se determinan por la ubicación de la misma en la estructura como se puede observar en la Figura 65, la profundidad de la platina es de 230 mm y largo es de 350 mm.

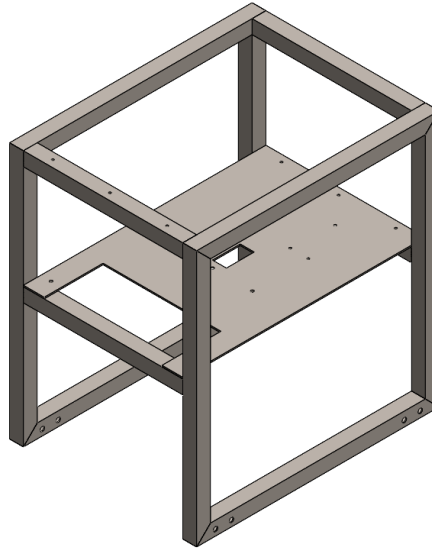


Figura 65: Ubicación platina principal.

Se utiliza el catálogo de DIPAC para determinar el material de las platinas el cual se observa en la Figura 66.

Calidad Estructural

Norma	Composición Química							Propiedades Mecánicas				Norma Equivalente
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%CU	OTROS	Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alarga- miento %	Doblado 180°	
ASTM A-588M Grado A	0,19 max	0,8 1,25	0,04 max	0,05 max	0,3 0,6	0,25 0,40	Ni 0,15-0,35 Cr 0,40-0,65 V 0,02-0,10	345 min	485 min	18 min		
ASTM A-283 Grado C	0,12 0,18	0,3 0,6	0,025 max	0,03 max	0,04 max	0,2 max		205 min	380 516 max	25 min	0=1,5e	SAE 1015
JIS G-3101 5541 M	0,17 0,23	0,3 0,6	0,025 max	0,025 max	0,04 max	0,25 max		250 min	400 min 550 max	21 min		SAE 1020 ASTM A-36 ASTM A-570 GRADO 36
A 36	0,25 0,29	0,80 1,2	0,04 max	0,05 max	0,4 max	0,20 max		250 min	400 min 550 max	20 min		
A570-GR50	0,25	1,35 max	0,035 max	0,04 max				340 min	450 min 550 max	17 min	1-1/2e	

Figura 66: Propiedades estructurales de platinas, [28].

El material de las platinas es acero A36. Es necesario determinar la carga a la cual está sujeta la platina, en la Tabla 21 se detalla la masa de cada elemento. Se añade un 50 % de

la masa total como factor de seguridad, esta masa se pasa a fuerza dando un valor de 49 N.

Tabla 21: Masa que soporta la platina principal

Descripción	Cantidad	Masa total (kg)
Batería	1	2,4
Elementos electrónicos	1	0,4
Dosificador	1	0,5
Factor de seguridad	1	1,7
Total		5

14.4.1. Diseño de platina a flexión

Se realiza un diagrama de cuerpo libre de la viga el cual se observa en la Figura 67.

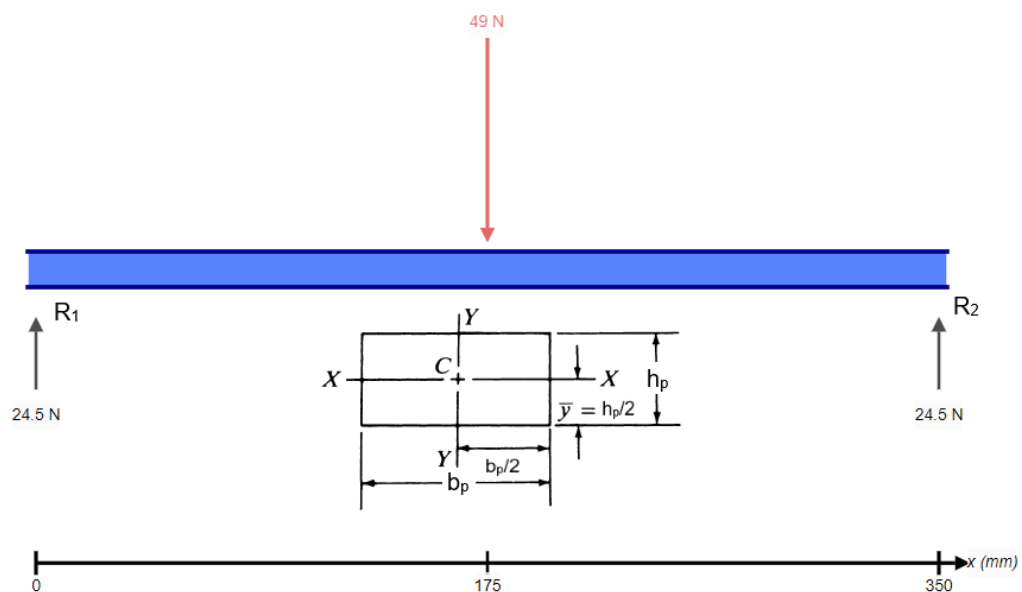


Figura 67: Diagrama de cuerpo platina principal.

Se determinan las reacciones por medio (21), [29].

$$R_1 = R_2 = \frac{F_p}{2} \quad (21)$$

Donde:

R_1 Reacción en el apoyo 1, en N;

R_2 Reacción en el apoyo 2, en N;

F_p Fuerza aplicada en la platina principal, en N.

Para el cálculo del momento flector máximo se utiliza (22), [31].

$$M_{max_{pl}} = \frac{F_p \cdot L_{pl}}{4} \quad (22)$$

Donde:

$M_{max_{pl}}$ Momento flector máximo en la platina, en N·mm;

L_{pl} Largo de la platina, en mm.

Reemplazando los datos en (21) y (22) se obtiene:

$$R_1 = R_2 = 24,5 \text{ [N]}$$

$$M_{max_{pl}} = 4284,5 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

En la Figura 68 se presentan los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores de la platina principal.

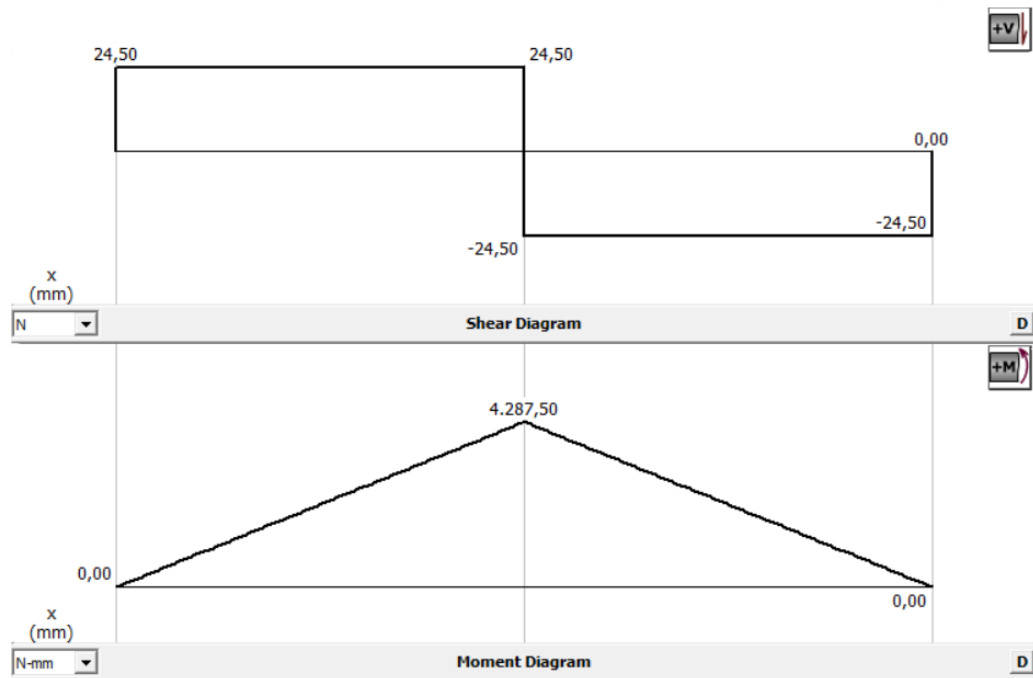


Figura 68: Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores en la platina principal.

Se requiere determinar el espesor mínimo que deberá tener la platina, para ello se utiliza (23), [29].

$$S_{min_{pl}} = \frac{1}{6} \cdot b_p \cdot e_p^2 \quad (23)$$

Donde:

$S_{min_{pl}}$ Mínimo valor permisible del módulo de sección para la platina, en mm^3 ;

b_p Profundidad de la platina, en mm;

e_p Espesor mínimo de la platina, en mm.

Para determinar $S_{min_{pl}}$ se utiliza, (24), [29].

$$S_{min_{pl}} = \frac{M_{max_{pl}}}{\sigma_{perm_{pl}}} \quad (24)$$

Donde:

$\sigma_{perm_{pl}}$ Esfuerzo permisible para el material, en MPa.

El esfuerzo permisible se obtiene con (25), [29].

$$\sigma_{perm_{pl}} = 0,66 \cdot S_{y_{pl}} \quad (25)$$

Donde:

$S_{y_{pl}}$ Esfuerzo de fluencia del material, en MPa.

Se reemplaza los datos en (24):

$$S_{min_{pl}} = \frac{4287,5 \text{ [N} \cdot \text{mm]}}{0,66 \cdot 250 \text{ [MPa]}}$$

$$S_{min_{pl}} = 26 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Se reemplaza $S_{min_{pl}}$ en (23):

$$26 \text{ [mm}^3\text{]} = \frac{1}{6} \cdot 230 \text{ [mm]} \cdot e_p^2$$

$$e_p = 0,82 \text{ [mm]}$$

El valor mínimo del espesor es de 0.82 mm, a continuación se realiza un análisis de deflexión para determinar e_p bajo otro criterio de diseño.

14.4.2. Análisis de deflexión en la platina principal

Para determinar la deflexión máxima se utiliza los criterios presentados en la Figura 69, la platina es una parte de maquina sujeta a flexión.

Deflexión debido a la flexión

Partes de máquina en general: 0.0005 a 0.003 pulg/pulg de longitud de viga

Precisión moderada: 0.00001 a 0.0005 pulg/pulg

Alta precisión: 0.000 001 a 0.000 01 pulg/pulg

Figura 69: Criterio de deflexión máxima sujeta a flexión, p. 777 [30].

Se calcula la deflexión máxima permisible que tendrá la platina por medio de (26), [30].

$$y_{max_{pl}} = \frac{L_{pl}}{300} \quad (26)$$

Donde:

$y_{max_{pl}}$ Deflexión máxima permisible de la platina, en mm;

Se reemplazan los valores en (26):

$$L_{pl} = 350 \text{ [mm]} = 13,78 \text{ [in]}$$

$$y_{max_{pl}} = \frac{13,78 \text{ [in]}}{300}$$

$$y_{max_{pl}} = 0,046 \text{ [in]} = 1,2 \text{ [mm]}$$

Para determinar el espesor se utiliza (27), [31].

$$I_{pl} = \frac{F_p \cdot L_{pl}^3}{48 \cdot E \cdot y_{max_{pl}}} \quad (27)$$

Donde:

I_{pl} Segundo momento de área de la platina, en mm^4 .

Se determina el segundo momento de área de la platina con (28), [31].

$$I_{pl} = \frac{b_p \cdot e_p^3}{12} \quad (28)$$

Donde:

b_p Ancho de la platina, en mm;

e_p Espesor de la platina, en mm.

La ecuación (28) permite determinar el espesor mínimo que deberá tener la platina, esto se reemplaza en (27):

$$\frac{230 [\text{mm}] \cdot e_p^3}{12} = \frac{49[\text{N}] \cdot 350^3[\text{mm}^3]}{48 \cdot 200 \times 10^3 [\text{Pa}] \cdot 1,2[\text{mm}]}$$

$$h_p = 2 [\text{mm}]$$

El espesor mínimo que deberá tener la platina principal es de 2 mm para que no exista ninguna falla al momento de soportar el peso de los materiales.

14.4.3. Simulación análisis por elementos finitos platina principal

Con el espesor de la platina determinado se procede a realizar la simulación para obtener la deformación que sufrirá la platina con la carga establecida. Esta deformación deberá ser menor a la máxima permisible para que no exista ninguna falla. En la Figura 70 se puede observar la simulación realizada.

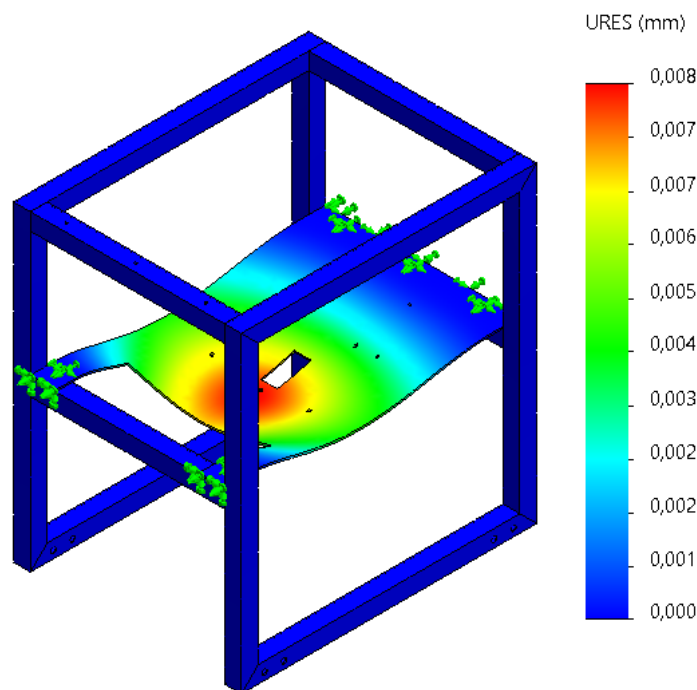
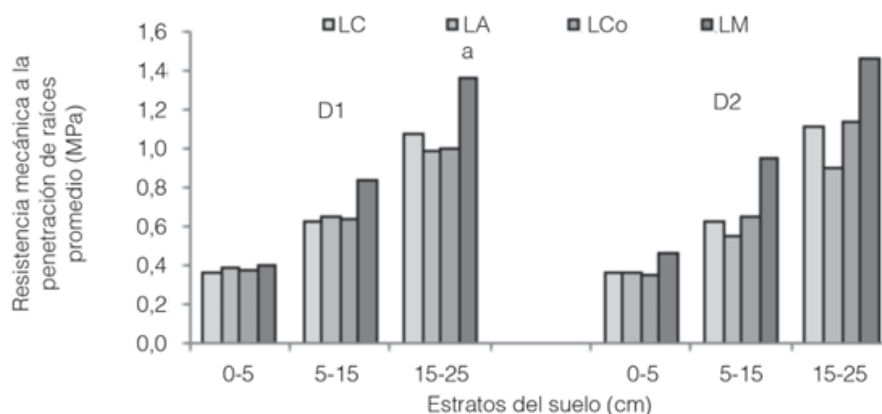


Figura 70: Resultado simulación de platina principal.

Como se puede observar en la Figura 70 la deformación que sufrirá la platina es de 0,008 mm, la cual es menor a la máxima permisible que tiene un valor de 1,2 mm. Con esto se concluye que la platina no tendrá ninguna falla.

14.5. Diseño del sistema broca

Como se especificó en la Tabla 15 el tipo de suelo para la siembra es franco arenoso. El sistema de la broca debe ser capaz de perforarlo, para ello se requiere conocer la resistencia a la penetración con el propósito de determinar la fuerza necesaria para realizar el orificio en el suelo, [36]. En la Figura 71 se puede observar diferentes tipos de labranzas con su respectiva resistencia a la penetración. Para lograr que el sistema trabaje en el peor de los escenarios se selecciona la resistencia mayor, la cual es de 1,45 MPa.



Resistencia mecánica a la penetración de raíces promedio en los estratos del suelo.

LC: sistema de labranza con cincel; LA: sistema de labranza con arado; LCo: sistema de labranza convencional; LM: sistema de labranza mínima; D1: densidad de siembra 1, D2: densidad de siembra 2.

Figura 71: Resistencia a la penetración del suelo franco arenoso, [37].

14.5.1. Diseño broca ahoyadora

La broca ahoyadora del sistema se puede observar en la Figura 72, en la sección de análisis de alternativas se menciona que esta pieza será impresa en PLA, debido a que las brocas existentes no cuentan con las dimensiones esperadas ni tampoco cuentan con un acople para la sujeción al motor.

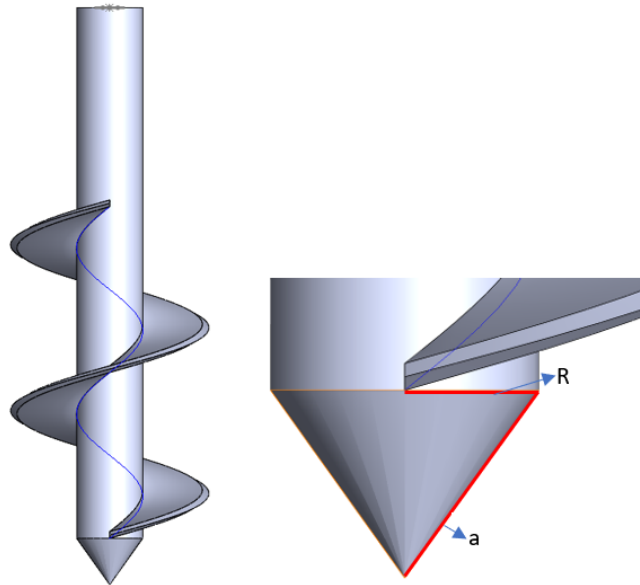


Figura 72: Cono, parte inicial de la broca

Para el cálculo del largo de la broca se utiliza (29), [38].

$$L_b = N_{esp} \cdot P_n \quad (29)$$

Donde:

L_b Longitud de la broca, en mm;

N_{esp} Numero de espiras, adimensional;

P_n Paso, en mm.

La broca debe realizar una perforación de máximo 5 cm, [39], de igual manera tener el largo suficiente para poder acoplarse al eje del motor como se observa en la Figura 52, se espera que la longitud sea de 75 mm. Se eligen los valores de 3 espiras con un paso de 25 mm para cumplir con el largo deseado en la broca.

Se reemplazan los datos en (29):

$$L_b = 3 \cdot 25 \text{ [mm]}$$

$$L_b = 75 \text{ [mm]}$$

El largo del tornillo garantiza que la perforación estará en el rango especificado, así como también el espacio necesario para realizar el acople al motor. Posterior al cálculo del largo

del tornillo, se determina el área del cono por medio de (30), [38].

$$A_c = \pi R(R + a) \quad (30)$$

Donde:

A_c Área del cono, en mm^2 ;

R Radio del cono, en mm;

a Cateto del cono, en mm.

El cono se observa en la Figura 72 al igual que sus parámetros a y R . Tienen un valor equivalente a 8,60 mm y 5 mm respectivamente.

Reemplazando en (30):

$$\begin{aligned} A_c &= \pi \cdot 5 \text{ [mm]} (8,60 + 5) \text{ [mm]} \\ A_c &= 213,6 \text{ [mm]}^2 \end{aligned}$$

Posterior se calcula la fuerza necesaria para realizar la perforación en el suelo por medio de (31), [38].

$$R_c = \frac{F_r}{A_c} \quad (31)$$

Donde:

R_c Resistencia a la penetración, en MPa;

F_r Fuerza necesaria para realizar penetración, en N.

Reemplazando los datos en (31):

$$\begin{aligned} 1,45 \text{ [MPa]} &= \frac{F_r}{213,6 \text{ [mm]}^2} \\ F_r &= 309,7 \text{ [N]} \end{aligned}$$

Con el dato de fuerza obtenido se determina un sistema el cual cumpla con este valor de parámetro, para ello se analiza un actuador lineal.

Para determinar el motor que será acoplado a la broca es necesario determinar el par de

torsión máximo que puede soportar la broca, para ello se utiliza (32), [40].

$$\tau_{perm_b} = \frac{T_b \cdot c_b}{J_b} \quad (32)$$

Donde:

τ_{perm_b} Esfuerzo permisible del material PLA, en MPa;

T_b Par de torsión del eje de la broca, en N·mm;

c_b Radio exterior del eje de la broca, en mm;

J_b Momento polar de inercia del área de la sección transversal, en mm⁴.

En la Figura 52 se puede observar el valor del eje del motor, el parámetro c_b considera este valor para que se pueda acoplar la broca, el cual tiene un valor de 5 mm.

Para determinar τ_{perm_b} se utiliza (33), [40].

$$\tau_{perm_b} = 0,66 \cdot S_{yPLA} \quad (33)$$

Donde:

S_{yPLA} Valor de resistencia a la fluencia del material PLA, en MPa.

El valor de S_{yPLA} es igual a 65,66 MPa como se puede observar en la Figura 73.

Probeta PLA Mallada	Resistencia a la Flexión a la Fluencia [MPa]	Resistencia última a la Flexión [MPa]	Módulo de Chord [MPa]	% de Deformación a la Flexión
Cuadrada 1	66,00	65,80	462,00	4,86
Cuadrada 2	67,50	67,50	515,00	4,99
Cuadrada 3	60,80	60,20	500,00	4,77
Cuadrada 4	66,30	66,10	514,00	4,89
Cuadrada 5	66,70	66,30	486,00	4,72
\bar{x}	65,46	65,18	495,40	4,84
σ	2,67	2,86	19,77	0,09

Figura 73: Valor de resistencia a la fluencia para probetas de PLA, p 68 [41].

Reemplazando los datos en (32):

$$43,20 \text{ [MPa]} = \frac{T_b \cdot 5 \text{ [mm]}}{\frac{\pi}{2} \cdot 5^4 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$T_b = 8482 \text{ [N} \cdot \text{mm]} = 86,5 \text{ [kg} \cdot \text{cm]}$$

El torque del motor a acoplar no deberá exceder los 86,5 kg · cm para que la broca no sufra alguna falla. El motor seleccionado será el mismo al que se use en el sistema de locomoción.

14.5.2. Actuador lineal

Un actuador lineal convierte el movimiento circular de un motor en un movimiento lineal, son ideales en aplicaciones que requieren emplear tracción, empuje, inclinación y elevación. El actuador debe tener una alimentación no mayor a 12 V debido a las especificaciones descritas en la Tabla 15, de igual manera la fuerza mínima que debe tener es 309,7 N, esta fuerza es la determinada en la sección anterior. En la Tabla 22 se detallan las características principales de tres marcas de actuadores.

Tabla 22: Especificaciones actuadores lineales, [42], [43].

Marca	AUTOULET	Rrunzfon	VEVOR
Longitud de carrera	100 mm	100 mm	200 mm
Voltaje de alimentación	12 V	12 V	12 V
Velocidad del recorrido	10 mm/s	10 mm/s	10 mm/s
Grado de protección	IP54	IP54	IP54
Fuerza de empuje	750 N	750 N	900 N
Precio	\$ 50	\$ 57	\$ 65

Con los detalles de la Tabla 22 se analizan las marcas AUTOULET y Rrunzfon, sus actuadores cuentan con una fuerza de empuje de 750 N, esta fuerza es mayor a la obtenida para realizar la perforación en el suelo. La alimentación para ambos actuadores es de 12 V, esto quiere decir que está dentro de los parámetros de diseño. La siguiente característica que entra en análisis es la longitud de carrera, esto se determina con ayuda de la Figura 74. El actuador tendrá su desplazamiento en el eje Y, para ello se determina la longitud de

carrera mínima que deberá tener en dicho eje. La distancia en el eje Y es de 182,5 mm. A esta debe restar la altura del surco la cual es de 100 mm como se especifica en la Tabla 15. Dando un valor de 82,50 mm. Este valor debe ser el valor mínimo de carrera para que el sistema pueda realizar la perforación en el suelo.

Como ambos actuadores cuentan con características iguales su selección se hace con respecto al precio, la marca AUTOULET tiene un precio más accesible en comparación con Rrunzfon, por esta razón se selecciona un actuador marca AUTOULET de 12 V, fuerza de empuje de 750 N y una longitud de carrera de 100 mm.

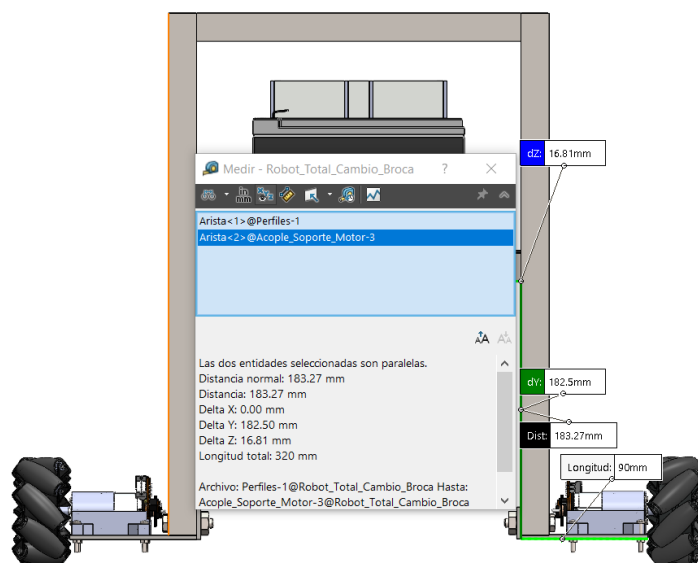


Figura 74: Distancia mínima de carrera del actuador.

El actuador seleccionado se lo puede observar en la Figura 75.



Figura 75: Actuador lineal.

14.6. Diseño dosificador de semillas

En la Tabla 15 se especifica el dosificador, que es tipo cilindro dentado, esta selección es debido a que es el más empleado al momento de realizar dosificación de leguminosas, [25], p. 4. De igual manera se determina el volumen del contenedor de semillas, que está diseñado para dosificar un área de $5,8 \text{ m}^2$, en la Figura 76 se observa las dimensiones del área de trabajo del robot móvil.

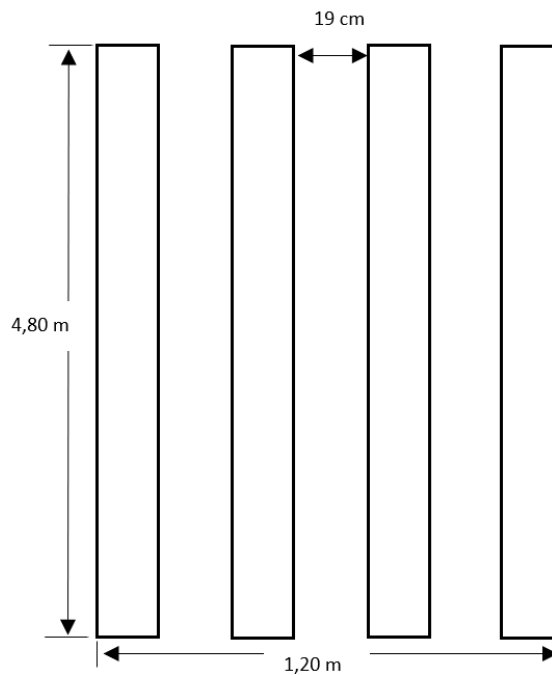


Figura 76: Espacio de trabajo del robot móvil.

14.6.1. Volumen del contenedor de semillas

Para establecer el volumen del contenedor primero se determina el número de semillas que se usan por hilera. Para ello se utiliza (34), [44].

$$S_i = \frac{T_i}{S_s} \quad (34)$$

Donde:

S_i Cantidad de semillas por hilera, adimensional;

T_i Largo de la hilera, en cm;

S_s Separación por sitio, en cm.

La separación por sitio depende de la semilla, para la arveja es 26 cm mientras que para

chocho es de 30 cm, estos valores se obtienen por las normas establecidas por la INIAP, [15]. Se pueden observar en la Tabla 15.

Se reemplazan los datos en (34):

$$S_i = \frac{480 [\text{cm}]}{26 [\text{cm}]}$$

$$S_i = 18$$

El valor obtenido es para la semilla de arveja, este valor se debe multiplicar por 3 debido a que se dosifican 3 semillas por cada sitio de siembra como se detalla en la Tabla 15, dando un valor de 54 semillas por hilera. Este procedimiento se realiza de igual manera para la semilla de chocho, con la variación de la separación por sitio de siembra y de 4 semillas a dosificar, se obtiene 64 semillas por hilera. Como se observa en la Figura 76 existen 4 hileras, por lo tanto, la cantidad de semillas se debe multiplicar por 4, dando un valor total de 216 semillas de arveja y 256 semillas de chocho.

El siguiente paso es determinar el volumen de una semilla, para ello se especifica que la forma de la arveja es esférica, [17] y el chocho tiene forma de un elipsoide, [16]. Para obtener un volumen de una semilla de arveja se utiliza (35) mientras que para el chocho (36).

$$V_a = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_a^3 \quad (35)$$

Donde:

V_a Volumen semilla de arveja, en mm^3 ;

r_a Radio de semilla de arveja, en mm.

$$V_c = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_c \cdot b_c \cdot c_c \quad (36)$$

Donde:

a_c Alto semilla de chocho, en mm;

b_c Largo semilla de chocho, en mm;

c_c Ancho semilla de chocho, en mm;

V_c Volumen semilla de chocho, en mm^3 .

Las medidas se obtienen de manera experimental, para ello se realizó la medición de 5 semillas de arveja y chocho. Los resultados se observan en las Tabla 23 y 24.

Tabla 23: Diámetro semilla de arveja

Número de muestra	Diámetro (mm)
1	7
2	8
3	7
4	7
5	8
Promedio	7,4

Tabla 24: Medidas semilla de chocho

Número de muestra	Alto (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)
1	10	11	5
2	11	9	4
3	10	10	6
4	12	11	5
5	11	10	6
Promedio	10,8	10,2	5,2

El diámetro promedio de la Tabla 23 se reemplaza en (35):

$$V_a = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{7,4}{2}\right)^3 [\text{mm}]^3$$

$$V_a = 212,17 [\text{mm}]^3$$

Los datos de alto, largo y ancho de la semilla de chocho se reemplaza en (36):

$$V_c = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (10,8 \cdot 10,2 \cdot 5,2) [\text{mm}]^3$$

$$V_c = 2399,47 [\text{mm}]^3$$

Para determinar el volumen del contenedor se utiliza el de mayor valor, es decir el volumen

de la semilla de chocho, este se multiplica por el total de semillas dando un volumen igual a $2399,47 \text{ mm}^3$. En la Figura 77 se observa el volumen del contenedor obtenido por medio de SolidWorks, se obtiene un valor de 663410 mm^3 . En conclusión, el volumen del contenedor es el suficiente para almacenar la cantidad de semillas requeridas.

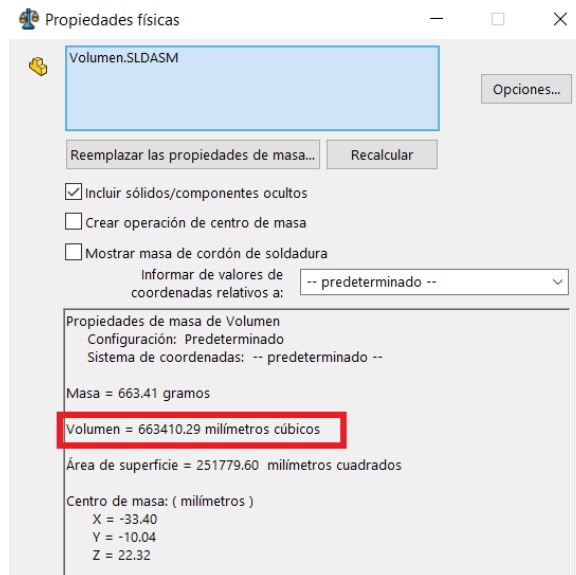


Figura 77: Volumen del contenedor obtenido mediante SolidWorks.

14.6.2. Diseño cilindro dentado

Los dientes del cilindro deben tener el espacio necesario para colocar una semilla por diente, para ello se utiliza la Tabla 23 y Tabla 24. Se concluye que el espacio debe ser de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ debido a que la semilla más grande es la de chocho, se le añaden 2 mm más para asegurar la correcta colocación de una semilla por cada diente. En la Figura 78 se puede observar la dimensión de un diente.

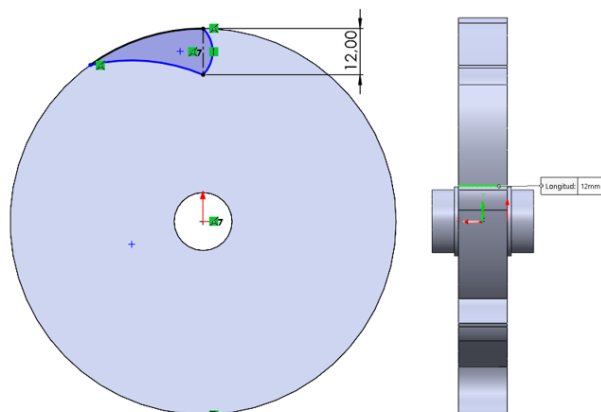


Figura 78: Dimensión dientes del cilindro.

El diámetro del cilindro debe ser el necesario para su acople al contenedor de las semillas como se puede observar en la Figura 79, de igual forma debe garantizar que las semillas no se coloquen por debajo de los dientes. El diámetro para ello es de 76 mm.

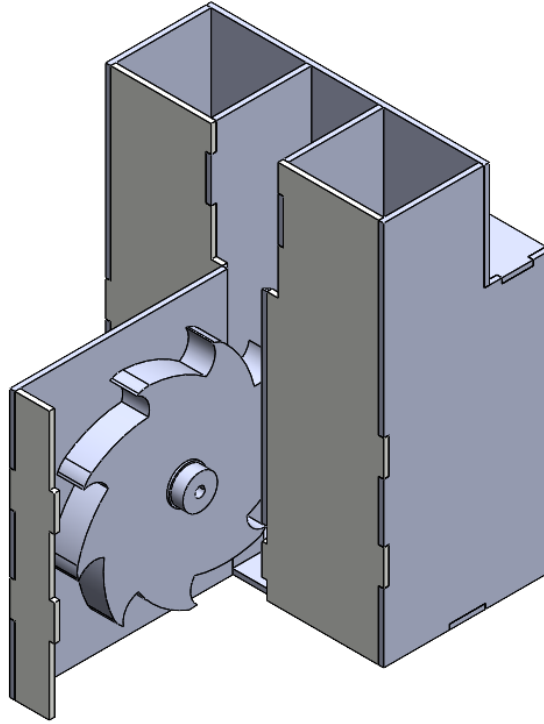


Figura 79: Ubicación del cilindro dentado en el contenedor de semillas.

El siguiente paso es calcular el torque necesario que deberá tener el cilindro dentado, para ello se utiliza, (37), [45].

$$T_c = F_c \cdot D_c \quad (37)$$

Donde:

T_c Torque cilindro dentado, en N·mm;

F_c Peso de arrastre para el cilindro dentado, en N;

D_c Diámetro cilindro dentado, en mm.

El peso de arrastre (F_c) se obtiene por medio de las semillas a dosificar, para ello se determina la masa de una sola semilla de chocho que tiene un valor de 0,35 gr, [46]. Se calculó un total máximo de 256 semillas que tiene una masa aproximada de 89,6 gr. Se duplica el valor de masa para garantizar que el torque del cilindro sea el necesario para

dosificar dando un valor total de 179,2 gr. El valor de masa se lo transforma a peso, se obtiene 1,8 N.

Se reemplaza los datos en (37):

$$T_c = 1,8[\text{N}] \cdot 76[\text{mm}]$$

$$T_c = 137 [\text{N} \cdot \text{mm}] = 1,4 [\text{kg} \cdot \text{cm}]$$

El parámetro T_c es el torque que deberá tener el motor del dosificador, en la Tabla 25 se analizan tres alternativas.

Tabla 25: Características del motor, [47], [48].

Modelo	JGA25-370	King Right 12 V	Pololu 6Dx14L
Torque	2,2 kg·cm	1,2 kg·cm	1,4 kg·cm
Alimentación	12 V	12 V	12 V
Corriente de carga	60 mA	40 mA	40 mA
Velocidad sin carga	399 RPM	150 RPM	214 RPM
Caja reductora	1/21	1/34	1/22
Precio	\$15	\$14	\$14

El motor seleccionado es un JGA25-370 debido a que posee un torque mayor al mínimo determinado de manera analítica, con un valor de 2,2 kg·cm.

14.6.3. Diseño salida de semillas

Se plantea el sistema creado por Lan, Kocher y Smith, [49]. Cuenta con una salida tipo embudo con un diámetro específico para garantizar el paso de una sola semilla. Para la lectura se utiliza un sensor optoelectrónico implementado con led's IR. Este sistema permite determinar el tiempo de lectura del sensor, en base a la ubicación del mismo y la velocidad de salida de las semillas. El sistema se puede observar en la Figura 80.

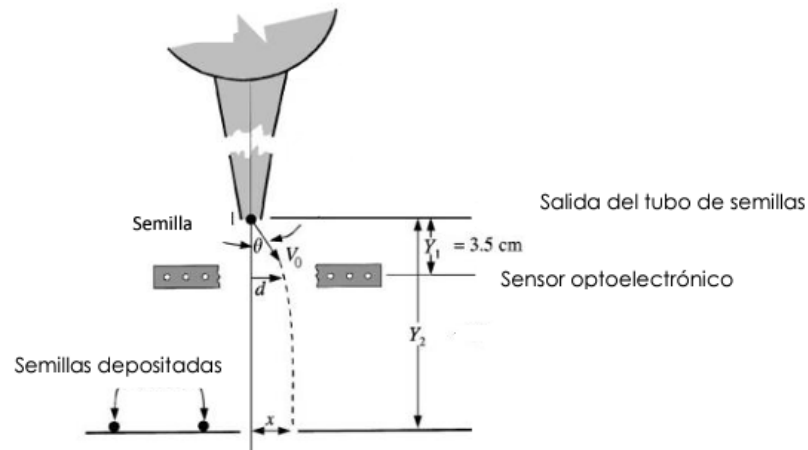


Figura 80: Modelo desarrollado por Lan, Kocher y Smith, [49].

Para determinar la velocidad de salida de las semillas se utiliza (38), [49].

$$V_o = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_s} \quad (38)$$

Donde:

V_o Velocidad de salida de las semillas, en m/s;

g Gravedad, en m/s^2 ;

h_s Altura del sistema con respecto al suelo, en m.

El valor de h_s se obtiene realizando la medición de manera manual, dando un valor de 40 mm.

Se reemplaza los datos en (38):

$$V_o = \sqrt{2 \cdot 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0,04 [m]}$$

$$V_o = 0,9 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Esta velocidad permite establecer el tiempo de lectura que deberá tener el sensor por medio de (39), [49].

$$y_1 = V_o \cdot t_1 + 0,5 \cdot g \cdot t_1^2 \quad (39)$$

Donde:

y_1 Ubicación del sensor respecto a la salida, en m;

t_1 Tiempo de lectura del sensor, en s.

La ubicación del sensor no debe exceder los 35 mm, [49]. En la Figura 81 se puede observar la ubicación del sensor con respecto a la salida de las semillas, la cual tiene un valor de 23,4 mm.

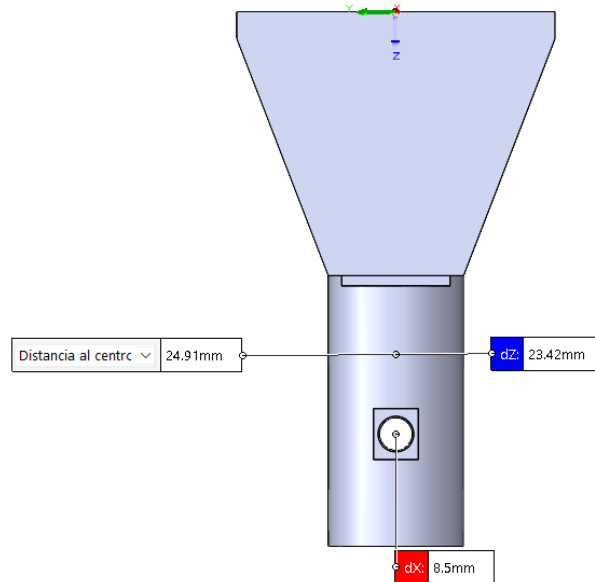


Figura 81: Ubicación del sensor en el sistema de salida

Se reemplazan los datos en (39):

$$0,0234 \text{ [m]} = 0,9 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot t_1 + 0,5 \cdot 9,8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot t_1^2$$

$$t_1 = 0,023 \text{ [s]}$$

Esto permite deducir que el tiempo de lectura que debe tener el sensor es de 23 milisegundos.

15. Diseño electrónico

En esta sección se encuentra el dimensionamiento de todos los elementos electrónicos que permiten el funcionamiento del robot móvil.

15.1. Dimensionamiento de motores

El sistema de locomoción seleccionado es omnidireccional, el cual utiliza cuatro motores que deberán movilizar un peso igual a 98 N. Este peso se lo obtiene por medio de la Tabla

20, el factor de seguridad no se considera para obtener la masa total del robot móvil que es igual a 10 kg. Otro parámetro para el dimensionamiento de los motores es el terreno por el cual el robot móvil se desplazará, en este caso es una superficie de tierra. Es necesario conocer el coeficiente de resistencia a la rodadura del mismo, para ello se analiza la siguiente Tabla 26.

Tabla 26: Coeficientes de resistencia a la rodadura, p.18, [50].

Superficie de contacto	Coeficiente de resistencia a la rodadura
Concreto o asfalto	0,013
Grava apisonada	0,02
Camino sin pavimentar	0,05
Tarmac	0,025
Césped, tierra y arena	0,1 - 0,35

Considerando que el robot móvil se desplazará por una superficie de tierra de la Tabla 26 se establece que su coeficiente de resistencia a la rodadura es 0,35. Establecidos los parámetros de coeficientes de resistencia a la rodadura y el peso total del robot móvil se determina la fuerza a la resistencia a la rodadura con (40).

$$F_r = w \cdot c_r \quad (40)$$

Donde:

w Peso total de la estructura, en N;

c_r Coeficiente de resistencia a la rodadura, adimensional;

F_r Fuerza de resistencia a la rodadura, en N.

Se reemplaza los valores en (40):

$$F_r = 98 \text{ [N]} \cdot 0,35$$

$$F_r = 34,3 \text{ [N]}$$

Para calcular el torque necesario que deberá tener el motor se utiliza el radio de llanta que es igual a 40 mm como se detalla en la Tabla 15. Para el cálculo del torque con (41)

$$\tau_m = F_r \cdot R_w \quad (41)$$

Donde:

τ_m Torque necesario del motor, en N · mm;

R_w Radio de la rueda, en mm.

Reemplazando los valores conocidos en (41):

$$\begin{aligned}\tau_m &= 34,3 \text{ [N]} \cdot 40 \text{ [mm]} \\ \tau_m &= 1372 \text{ [N} \cdot \text{mm]} = 14 \text{ [kg} \cdot \text{cm]}\end{aligned}$$

La conversión se realiza debido a que esas son las unidades que presentan los diferentes datasheets de los motores. El torque obtenido se debe distribuir a los cuatro motores que tendrá el robot móvil, obteniendo un valor de 3,5 kg · cm por llanta. En la Tabla 27 se observa tres motores DC y sus especificaciones principales.

Tabla 27: Características de motores DC, [47], [48].

Modelo	JGA25-370	Pololu 25Dx48L	Pololu 25Dx52L
Torque	3,7 kg·cm	3,9 kg·cm	4,7 kg·cm
Alimentación	12 V	12 V	12 V
Corriente de carga	240 mA	250 mA	80mA
Velocidad sin carga	130 RPM	1000 RPM	230 RPM
Caja reductora	1/22	1/35	1/25
Precio	\$23	\$26	\$30

El motor JGA25-370 y el Pololu 25Dx48L cuentan con el valor de torque deseado, el consumo de corriente para el primer motor es menor, al igual que el precio, debido a eso se selecciona la primera opción.

15.1.1. Modelo matemático motor DC

Un motor DC se compone de una parte mecánica y eléctrica dando un modelo electro-mecánico como se observa en la Figura 82.

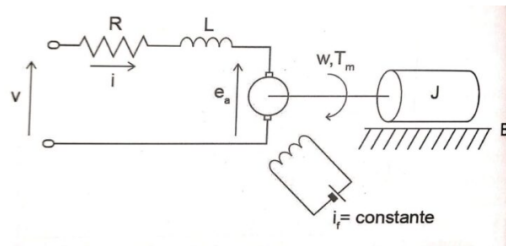


Figura 82: Esquema motor DC, [51].

El rotor del motor posee una resistencia y su bobina una inductancia, por lo que su modelo matemático estará sujeto a (42), [52].

$$L_a \frac{di(t)}{dt} = v_a(t) - R_a i(t) - E_m(t) \quad (42)$$

Donde:

R_a Resistencia del bobinado del rotor, en Ω ;

L_a Inductancia del bobinado del rotor, en H;

v_a Voltaje de alimentación del motor, en V;

E_m Fuerza contra electromotriz, en V;

i Corriente de campo, en A.

La parte mecánica del motor está dada por (43), [52].

$$J \frac{dw_a(t)}{dt} = T_m(t) - Bw_a(t) \quad (43)$$

Donde:

T_m Torque del motor, en N·m;

B Coeficiente de rozamiento, en $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$;

w_a Velocidad angular del motor, en rad/s;

J Momento de inercia equivalente del eje rotor con la carga a colocar, en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

La relación que existe entre (42) y (43) está dada por el voltaje en la armadura y la

velocidad angular del eje, esto se representa con (44), [52].

$$E_m(t) = K_a w_a(t) \quad (44)$$

Donde:

K_a Constante de la fuerza electromotriz, en V/rad·s.

Otra conexión que existe entre la parte mecánica y electrónica es la relación entre el torque y la corriente del motor, la misma que está dada por (45), [52].

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (45)$$

Donde:

K_m Constante de torque electromagnética, en N·m/A.

15.1.2. Función de transferencia motor DC

Para encontrar la función de transferencia con relación a la velocidad angular y el voltaje es necesario pasar a Laplace las ecuaciones (42) al (45) donde como resultado:

$$L_a s i(s) = v_a(s) - R_a i(s) - E_m(s) \quad (46)$$

$$J s w_a(s) = T_m(s) - B w_a(s) \quad (47)$$

$$E_m(s) = K_a w_a(s) \quad (48)$$

$$T_m(s) = K_m i(s) \quad (49)$$

El siguiente paso es reemplazar (48) y (49) en (46), dando como resultado:

$$\frac{T_m(s)}{K_m} (L_a s + R_a) = v_a(s) - K_a w_a(s) \quad (50)$$

Es necesario dejar todo en función del voltaje y la velocidad angular, para ello se reemplaza (47) en (50) dando como resultado.

$$\frac{w_a(s)[(Js + B)(L_a s + R_a)]}{K_m} = v_a(s) - K_a w_a(s) \quad (51)$$

Se desarrolla la ecuación (51) hasta encontrar la función de transferencia (52).

$$\frac{w_a(s)}{v_a(s)} = \frac{K_m}{JL_a s^2 + s(JR_a + L_a B) + BR_a + K_a K_m} \quad (52)$$

La función de transferencia permite realizar el control PID.

15.2. Módulos de control motores

Los motores seleccionados requieren un control el cual se lo realiza por medio de drivers, utilizan un voltaje y corriente de control, convierten una corriente baja para amplificarla y esta sea capaz de mover el motor DC, el diagrama de funcionamiento se lo puede observar en la Figura 83, [53].

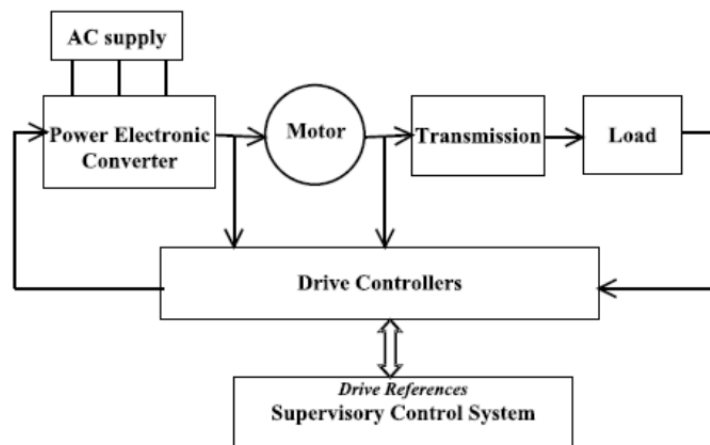


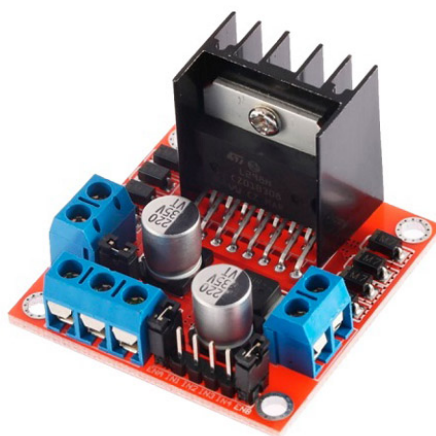
Figura 83: Diagrama funcionamiento driver motor DC, [53].

Existen diferentes drivers los cuales dependen del voltaje de funcionamiento de los motores así como también de su corriente, en la Tabla 29 se muestran las principales características de tres diferentes drivers.

Tabla 28: Características driver motor DC, [54], [55].

Modelo	L293D STM	L293D	L298N
Canales	2 canales	4 canales	2 canales
Voltaje lógico	0 - 1,5 V	0 - 5 V	0 - 5 V
Corriente de salida máxima	1 A	1,2 A	2 A
Voltaje operativo máximo	36 V	36 V	35 V
Dimensiones	70x55x20 mm	70x55x20 mm	43x43x27 mm
Precio	\$4,50	\$5,50	\$5,50

Con las características de los drivers se procede a escoger el modelo L298N, debido a que la corriente de salida es mayor, otro punto para su selección es su voltaje lógico, Arduino trabaja con señales de salida de 5 V, esto permitirá que la señal enviada al driver sea la correcta, por otro lado sus dimensiones son inferiores haciendo que este ocupe menos espacio en comparación a los otros, se lo puede observar en Figura 84.

**Figura 84:** Módulo controlador L298.

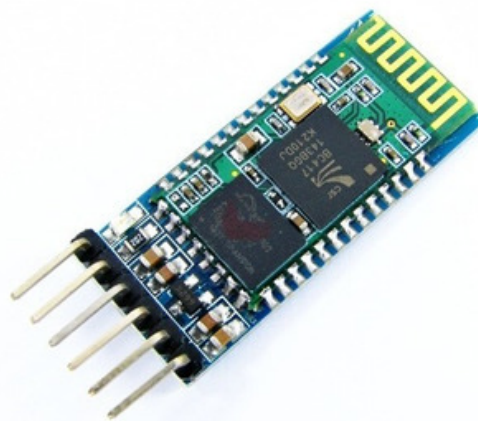
15.3. Dispositivos de comunicación

El requerimiento del robot móvil es que sea teleoperado, es decir, recibir las instrucciones de manera inalámbrica. Para ello se analiza dos opciones de comunicación, módulos RF y módulos Bluetooth. Las características de estos dispositivos se pueden observar en la Tabla 29.

Tabla 29: Características módulos de comunicación, [56], [57].

Modelo	NRF24L01	HC-05
Voltaje de operación	5 V	5 V
Consumo de corriente	115 mA	50 mA
Interfaz	SPI	Bluetooth
Alcance	1000 m	10 m
Dimensiones	16,5×45,5 mm	37×16 mm
Precio	\$4,5	\$7

Dada las características de alcance de transmisión el módulo RF es la mejor opción, pero el protocolo de comunicación de este es SPI, esto quiere decir que tiene una configuración full duplex, la cual utiliza, Chip Select (CS), reloj (SCK), Master Out / Slave In (MOSI) y Master In / Slave Out (MISO). Por lo que requiere 4 pines para realizar el protocolo, la comunicación del módulo Bluetooth tiene una comunicación de dos hilos TX y RX. Así mismo la corriente de consumo es menor con referencia al módulo RF, debido a esto la selección para la realizar la comunicación maestro, esclavo es con módulo HC-05 el cual se lo puede observar en Figura 85. [58]

**Figura 85:** Módulo bluetooth HC-05.

15.4. Componentes para mando del robot móvil

Para enviar las señales de control del robot móvil se debe implementar una palanca de mando. Este tipo de palanca implementa un joystick el cual tiene un funcionamiento en

base a la variación de un potenciómetro, debido a esto la lectura de posición se la hace por medio de los pines analógicos. En la Tabla 31 se presentan las características de tres tipos de módulos joystick.

Tabla 30: Características módulos joystick, [59].

Modelo	Mgsystem Dual Joystick	Shield Joystick	Módulo Joystick
Pines de comunicación	5	4	5
Voltaje de operación	3,3-5 V	3,5-5 V	3,3-5 V
Ejes de control	2 (eje X, eje Y)	2 (eje X, eje Y)	2 (eje X, eje Y)
Precio	\$9,50	\$7	\$1,50

La primera opción presenta un módulo con dos joysticks, para el control del robot móvil se requiere únicamente uno, esa opción queda descartada. La segunda opción es una placa shield para arduino uno, no tiene aplicación para el controlador seleccionado. La tercera opción es un módulo que cuenta con un solo joystick, su precio es menor en comparación con las otras opciones, debido a esto se hace la selección de este módulo, se lo puede observar en la Figura 86.



Figura 86: Joystick analógico.

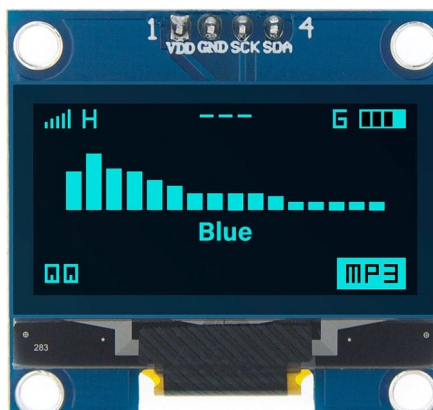
15.4.1. Visualizador para el control inalámbrico

Se requiere una pantalla que permita visualizar las siguientes variables: movimiento del robot (adelante, atrás, derecha, izquierda), semilla a dosificar, semillas dosificadas y voltaje del control. Para ello se analizan las pantallas presentadas en Tabla 31 donde se detalla las principales características de cada una.

Tabla 31: Características pantallas oled, [60], [61], [62].

Modelo	Oled SH1106	Oled Ssd1306	Oled 0,91
Comunicación	I2C	Spi	I2C
Voltaje de operación	3,3-5 V	3,5-5 V	3,3-5 V
Resolución	128×64 píxeles	128×64 píxeles	128×32 píxeles
Precio	\$8	\$9,50	\$1,50

Se selecciona la pantalla Oled SH1106, tiene una comunicación I2C, es decir que utiliza los pines SCA, SCL para este protocolo, 2 pines analógicos de igual manera su resolución es de 128×64 píxeles, se la puede observar en la Figura 87.

**Figura 87:** Pantalla Oled SH1106.

15.5. Sensor para detección de hilera

Se requiere un sensor que detecte la hilera cuando el robot empiece a realizar la siembra, para ello se analizan las características de tres sensores presentados en la Tabla 32.

Tabla 32: Características de sensores ultrasónicos, [63].

Modelo	HC-SR04	US-016	GP2Y0A710
Voltaje de operación	5 V	5 V	3,3-5 V
Corriente de trabajo	15 mA	3,8 mA	50 mA
Rango de medición	2 a 45 cm	4 a 30 cm	10 a 55 cm
Precio	\$8,50	\$8	\$7,50

El sensor HC-SR04 posee un rango de medición mayor a las demás alternativas, se lo selecciona para realizar la detección de la hilera.

15.6. Dimensionamiento batería

En las especificaciones del robot se detalla que este debe ser autónomo e inalámbrico. Para que este sea autónomo requiere una batería de 12 V que alimente al robot móvil. Al ser inalámbrico el control de mando requiere una batería de 5 V, se dimensionan dos baterías.

15.6.1. Batería robot móvil

Para dimensionar la batería del robot se debe determinar el consumo de corriente y voltaje de todos los elementos, esto se puede observar en la Tabla 33.

Tabla 33: Consumo de corriente y voltaje elementos robot móvil

Elemento	Voltaje	Corriente	Cantidad	Total
Motor DC (locomoción)	12 V	240 mA	4	1 A
Motor DC (dosificador)	12 V	60 mA	1	0,06 A
Motor DC (broca)	12 V	240 mA	1	0,24 A
Arduino nano	5 V	350 mA	1	0,35 A
L298N	5 V	3,6 mA	2	0,04 A
HC-05	5 V	50 mA	1	0,05 A
HC-SR04	5 V	15 mA	1	0,015 A
Actuador lineal	12 V	1 A	1	1 A
Total				2,8 A

El consumo máximo de voltaje es de 12 V, para que los elementos de 5 V tengan alimentación se debe usar un regulador. La corriente de consumo es de 2,8 A. La batería a seleccionar debe cumplir mínimo este valor de corriente con el fin de garantizar la autonomía de una hora. Se establece que la batería debe tener 12 V y 9 Ah, esta corriente se justifica en el cálculo de la duración de la batería sometida al consumo establecido en la Tabla 33. Primero se determina la potencia de la batería con (53).

$$P_c = V_b \cdot I_c \quad (53)$$

Donde:

P_c Potencia consumida, en W;

V_b Voltaje de batería del robot móvil, en V;

I_c Corriente consumida, en A.

Reemplazando los datos en (53):

$$P_c = 12 \text{ [V]} \cdot 2,8 \text{ [A]}$$

$$P_c = 34 \text{ [W]}$$

Se determina la potencia que tendrá la batería con (54).

$$P_b = V_b \cdot I_b \tag{54}$$

Donde:

P_b Potencia batería, en W;

I_b Corriente de la batería, en A.

Se reemplaza en (54):

$$P_b = 12 \text{ [V]} \cdot 9 \text{ [A]}$$

$$P_b = 108 \text{ [W]}$$

Con las potencias tanto de la batería como potencia consumida se puede calcular el tiempo de duración de la misma con (55).

$$t_b = \frac{P_b}{P_c} \tag{55}$$

Donde:

t_b Tiempo de funcionamiento de la batería, en h.

Se reemplazan los datos en (55):

$$t_b = \frac{108 \text{ [W]}}{34 \text{ [W]}}$$

$$t_b = 3 \text{ h}$$

Las horas de funcionamiento es con todos los elementos trabajando en simultáneo, en la práctica no todos los componentes electrónicos estarán actuando a la vez, el funcionamiento de cada elemento dependerá de las instrucciones que el operador seleccione haciendo que la duración de la batería aumente. Con las horas de funcionamiento la batería sufrirá descargas, debido a eso es necesario determinar el tipo de cargador, se usa la hoja de datos donde se especifica el voltaje de carga y la corriente durante un ciclo, [64]. Como se puede observar en la Figura 88 el valor de la corriente es de 2,7 A y de voltaje es 14,9 V.

40 °C	25 °C
102%	100%
Cycle use	
14.5-14.9V(-30mV/°C), max. Current: 2.7A	

Figura 88: Corriente máxima de descarga, [64].

El fabricante de la batería ofrece dos opciones de cargadores como se puede observar en la Figura 89. El voltaje de los cargadores está de acuerdo al ciclo de trabajo de la batería, el parámetro de selección es la corriente de carga, la cual tiene que ser mayor a 2,7 A.

Specification for EP6012A[S]

Input Voltage	100-240VAC, 50-60Hz
Input Current	1.1A
Back current drain	1.3mA
Charge voltage	Rating 12V, Bulk limited voltage : 14.7V
Ripple current	Current-ripple: <= 0.13A rms
Bulk charge current	3.3A for EP6012A, 2.0A for EP6012AS
Operate Temperature	-20°C ~ 50°C ,
Cooling	Natural convection. Do not cover the charger.
Charge principle	Auto 4 stages: Ud-I-Uo-Up
Battery type	All types of 12V lead-acid batteries.(SLA, Gel, AGM....)
Battery capacity	7-80Ah for EP6012A, 4-40Ah for EP6012AS
Size	120X67X41mm
Enclosure	IP54 (Dust protected, Water splashing resistance)
Weight	270g

Figura 89: Especificaciones cargadores de 12 V, [65].

Para la batería implementada se selecciona el cargador EP6012A que posee una corriente de carga de 3,3 A. En la Figura 90 se observa el diagrama de alimentación del robot móvil, se requiere dimensionar un convertidor DC-DC debido a que la alimentación para el controlador es de 5 V, así como también del módulo Bluetooth. Para ello se analizan algunas alternativas de dicho convertidor.

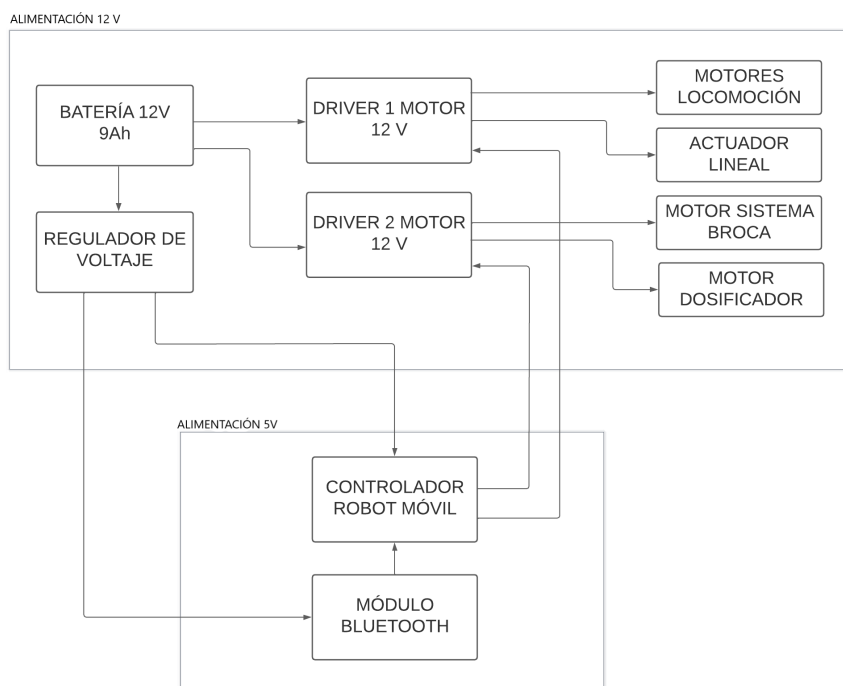


Figura 90: Diagrama de alimentación robot móvil.

15.6.2. Dimensionamiento regulador de voltaje

Existen varios reguladores conocidos como step down o step up, estos permiten regular voltaje desde los 3,3 V a los 35 V. En la siguiente Tabla 34 se especifican las características del regulador utilizado.

Tabla 34: Características Regulador de voltaje, [66], [67].

Modelo	Regulador DC-DC 12-35V	Regulador XI4015	LM2596
Voltaje de entrada	10-32 V	5-32 V	4,5- 40 V
Corriente de salida	10 A	5 A	3 A
Voltaje de salida	3,3-35V	5-35 V	1,23-37 V
Dimensión	65 × 35 × 23,5 mm	51 × 26,3 × 14 mm	43 × 21 × 13 mm
Precio	\$9,50	\$7	\$8,50

El regulador DC-DC 12-35V es el que se encuentra en el mercado, sus especificaciones de voltaje y corriente de salida permiten alimentar de manera adecuada al controlador y módulo Bluetooth. En la Figura 91 se puede observar al regulador seleccionado.

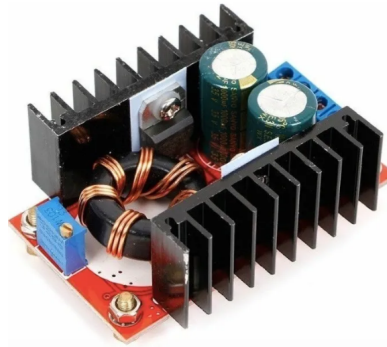


Figura 91: Regulador DC DC 12-35 V.

15.6.3. Batería control inalámbrico

En la Tabla 35 se determina el consumo máximo de corriente y voltaje de los elementos que componen al control inalámbrico.

Tabla 35: Consumo de corriente de elementos control

Elemento	Voltaje	Corriente	Cantidad	Total
Oled	3,3-5 V	8 mA	1	0,008 A
Arduino nano	5 V	350 mA	1	0,35 A
Joystick	5 V	0,5 mA	1	0,0005 A
HC-05	5 V	50 mA	1	0,05 A
Total				0,41 A

El consumo de corriente es de 0,41 A y de voltaje es de 5 V. Las baterías de litio poseen un voltaje nominal de 3,3 V y 7,2 V. Para su implementación dentro del mando del robot requeriría un elevador de voltaje, por ello queda descartada su utilización. Por lo cual, un cargador portable de 5 V a 1 A es la seleccionada con dimensiones 8,9x2,4x2,4 cm, se la observa en la Figura 92.



Figura 92: Cargador portable 5V.

En la Figura 93 se observa el diagrama de bloques de la conexión del mando inalámbrico.

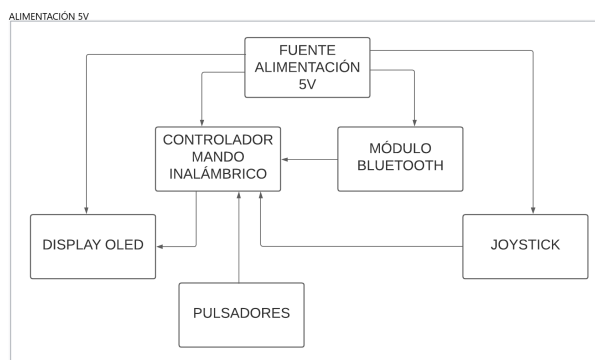


Figura 93: Diagrama de bloques alimentación del mando inalámbrico.

15.7. Resumen elementos electrónicos

En la Tabla 36 se presentan los componentes electrónicos seleccionados.

Tabla 36: Elementos electrónicos seleccionados

Elemento	Cantidad	Descripción
Motores DC sistema de locomoción	4	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: JGA25-370 ■ Torque: 3,7 kg · cm
Motor DC dosificador	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: JGA25-370 ■ Torque: 2,2 kg · cm
Motor DC broca	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: JGA25-370 ■ Torque: 3,7 kg · cm
Controlador	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: Arduino nano ■ Microcontrolador: Atmega328

Elemento	Cantidad	Descripción
Actuador lineal	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: AUTOULET ■ Fuerza de empuje: 750 N ■ Longitud de carrera: 100 mm
Módulo Bluetooth	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: HC-05 ■ Voltaje de alimentación: 5 V
Drivers motores DC	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: L298N ■ Voltaje lógico: 0-5 V
Pantalla Oled	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: SH1106 ■ Voltaje de operación: 3,3-5 V
Joystick	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: Módulo joystick ■ Voltaje de operación: 3,3-5 V
Batería robot móvil	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: 12 V 9 Ah ■ Peso: 2,4 kg
Batería control	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelo: 5 V 1 Ah ■ Batería portable

16. Programación

En esta sección se detalla los modos de operación del robot móvil los cuales son tres: manual, semilla arveja y semilla chocho.

16.1. Modos de funcionamiento

El programa consta de tres modos de funcionamiento en la Figura 94 se observa el diagrama de flujo del menú principal, el cual permite seleccionar entre manual, arveja y chocho.

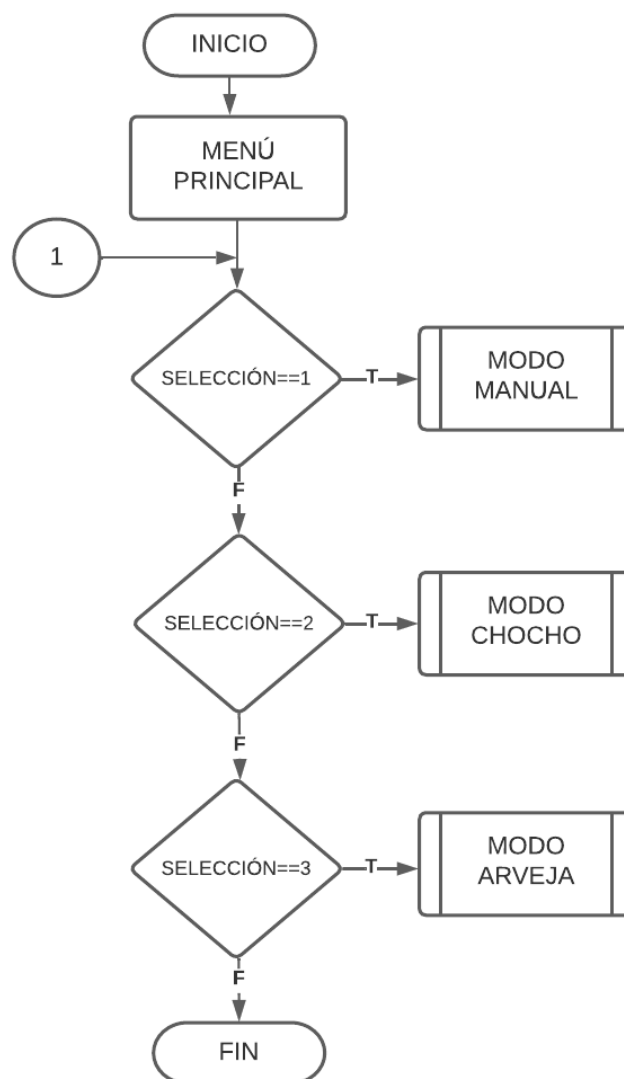


Figura 94: Diagrama de flujo del menú principal.

El modo manual permite realizar un movimiento libre del robot móvil, con el fin de es-

tablecer el posicionamiento inicial dentro de los surcos para realizar la siembra, también ejecuta la función del vaciado del contenedor y colocar en la posición inicial de la broca. En la Figura 95 se puede observar el diagrama de flujo de este modo.

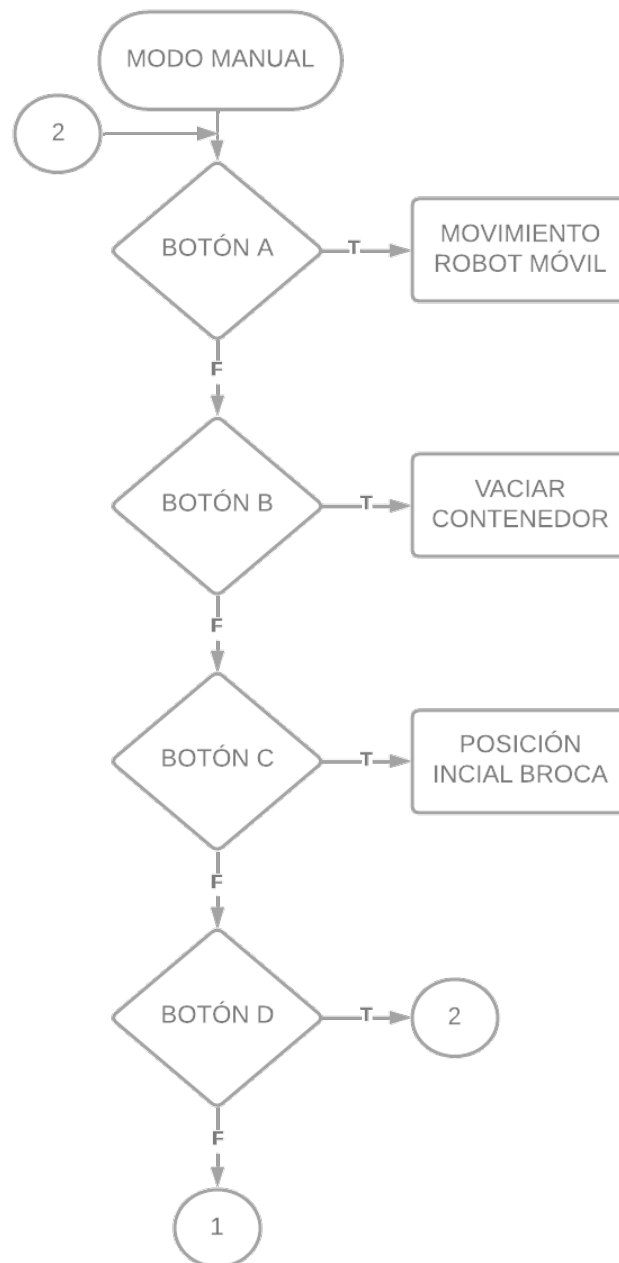


Figura 95: Diagrama de flujo modo manual.

El modo arveja así como el modo chocho tienen la misma rutina, la diferencia está en la dosificación de la semilla y la distancia entre sitio de siembra. En ambos modos se realiza el control PID de los motores, así como también el control del dosificador por medio de sensores IR. Cuando se termina la rutina se retorna al menú inicial para volver a seleccionar

el modo de funcionamiento. En la Figura 96 se visualiza el diagrama de flujo del modo arveja y chocho.

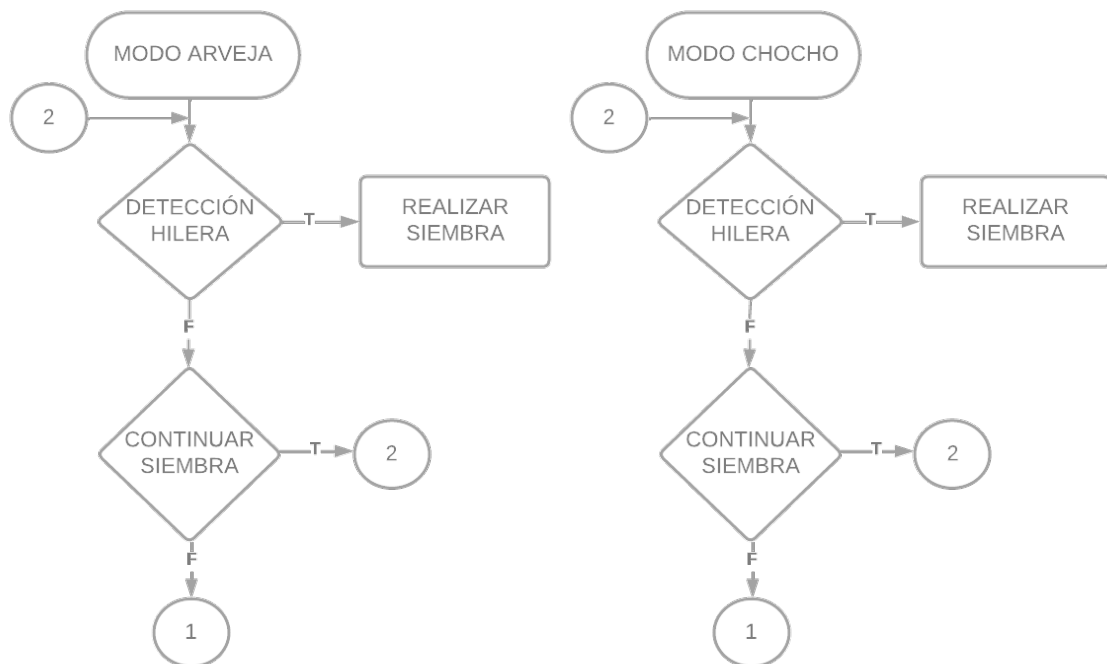


Figura 96: Diagrama de flujo modo arveja y chocho.

16.2. Distancia entre sitio de siembra

Para determinar la distancia entre sitios se debe conocer el tiempo que deberá recorrer el robot hasta alcanzar dicha distancia, para el cálculo se emplea (56).

$$t_m = \frac{d_s}{v_m} \quad (56)$$

Donde:

d_s Distancia recorrida por el robot, en m;

v_m Velocidad de desplazamiento del robot, en m/s;

t_m Tiempo de desplazamiento del robot, en s.

Para determinar la velocidad del robot se considera las RPM a la que gira el motor, para ello se utiliza un encoder, el mismo permite realizar la medición de los pulsos por segundo que

transmite el eje del motor utilizando (57).

$$v_{eje} = F_r \left(\frac{1 [\text{RPM}]}{r_d \cdot 11} \right) \left(\frac{60 [\text{s}]}{1 [\text{min}]} \right) \quad (57)$$

Donde:

v_{eje} Velocidad de giro del eje de carga del motor, en RPM;

F_r Frecuencia del encoder, en pulsos/s;

r_d Relación de reducción de la caja reductora del motor, adimensional.

La relación de reducción está determinada por el motor, en este caso es de 1/22 como se especifica en la Tabla 27. Los datos que se obtienen de (57) se observan en la Figura 97, cabe mencionar que estos datos son reflejados por medio de la lectura del encoder. Las RPM se mantienen en un promedio de 130.

RPM: 131.13
 RPM: 129.90
 RPM: 131.13
 RPM: 131.13
 RPM: 129.90
 RPM: 131.13
 RPM: 131.13
 RPM: 129.90
 RPM: 132.37
 RPM: 129.90

Figura 97: Revoluciones por minuto del motor DC.

Lo siguiente es calcular la velocidad de desplazamiento por medio de (58).

$$v_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_w \cdot v_{eje}}{60} \quad (58)$$

Reemplazando los datos en (57) se obtiene:

$$v_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,04[\text{m}] \cdot 130[\text{RPM}]}{60}$$

$$v_m = 0,5 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

La distancia entre sitio depende de la semilla, para la semilla de arveja se selecciona 30 cm

como se especifica en Tabla 15. Se reemplazan los datos en (56):

$$t_m = \frac{0,30 \text{ [m]}}{1 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

$$t_m = 0,6 \text{ [s]}$$

De esta manera se puede establecer el tiempo que debe estar en funcionamiento los motores del sistema de locomoción para alcanzar la distancia requerida entre cada sitio de siembra.

16.3. Control motores DC

Para el control del sistema de locomoción se implementa un controlador PID, más conocido como un controlador de tres términos: proporcional, integral y derivativo. Este es de gran ayuda cuando el modelo matemático de la planta es muy complejo o desconocido logrando buscar conjuntos óptimos de valores de parámetros que satisfagan determinadas especificaciones de respuesta transitoria. Un sistema de control posee una respuesta que cuenta con dos partes: transitoria y estacionaria. La primera va del estado inicial al estado final mientras que la segunda se comprende por el comportamiento que tiene la salida del sistema cuando tiende al infinito, [68]. Para la simulación del sistema se utiliza una entrada escalón, esto permite visualizar la rapidez con la que responde un sistema a cambios abruptos, [69]. En la Figura 98 se observa la curva de respuesta a una entrada escalón.

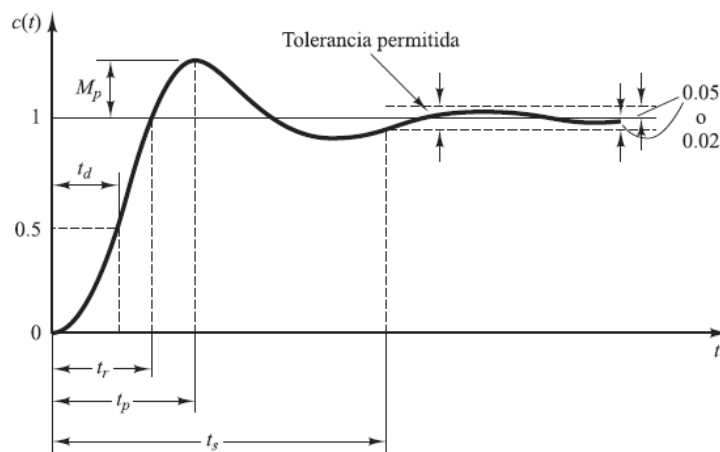


Figura 98: Respuesta de un sistema a una entrada escalón, [68].

16.3.1. Controlador P

Utiliza una ganancia proporcional la cual es directamente proporcional a la señal de error del sistema. Debido a esto cuando el error es grande se produce una salida grande del controlador. La función de transferencia de este controlador está dada por (59), [70].

$$G_p(s) = K_p \cdot e \quad (59)$$

Donde:

$G_p(s)$ Función de transferencia controlador P, adimensional;

K_p Ganancia proporcional del sistema, adimensional;

e Señal de error del sistema, adimensional.

16.3.2. Controlador I

Con este control se emplea una ganancia integral la cual es proporcional a la integral de la señal de error. Debido a que es una integral la salida de este controlador se afecta por la acumulación de errores pasados. La función de transferencia de este controlador está dada por (60), [70].

$$G_i(s) = K_i \int_0^t e \cdot dt \quad (60)$$

Donde:

$G_i(s)$ Función de transferencia controlador I, adimensional;

K_i Ganancia integral, adimensional.

16.3.3. Controlador D

La ganancia derivativa es proporcional al cambio del error con el tiempo, debido a esto la salida del controlador es grande cuando el sistema se inicia debido a que no existe un error como tal. La función de transferencia de este controlador está dada por (61), [70]

$$G_d(s) = K_d \frac{de}{dt} \quad (61)$$

Donde:

$G_i(s)$ Función de transferencia controlador D, adimensional;

K_d Ganancia derivativa, adimensional.

16.4. Simulación del controlador PI, PD y PID

En esta sección se analiza tres controladores PI, PD y PID. Con el propósito de seleccionar el controlador que tenga la mejor respuesta para el sistema, para la estimación de los parámetros de control se utiliza el software Simulink, este permite realizar una simulación del sistema que tiene una función de transferencia descrita en (52). En la Figura 99 se observa el sistema a lazo abierto y sin controlador, en la Figura 100 se presenta la respuesta del sistema de locomoción en lazo abierto, es decir, sin considerar un controlador.

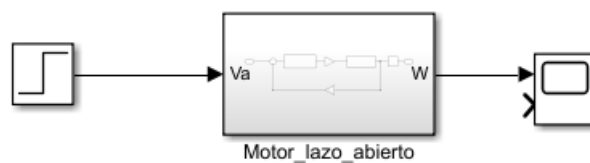


Figura 99: Sistema sin controlador con lazo abierto.

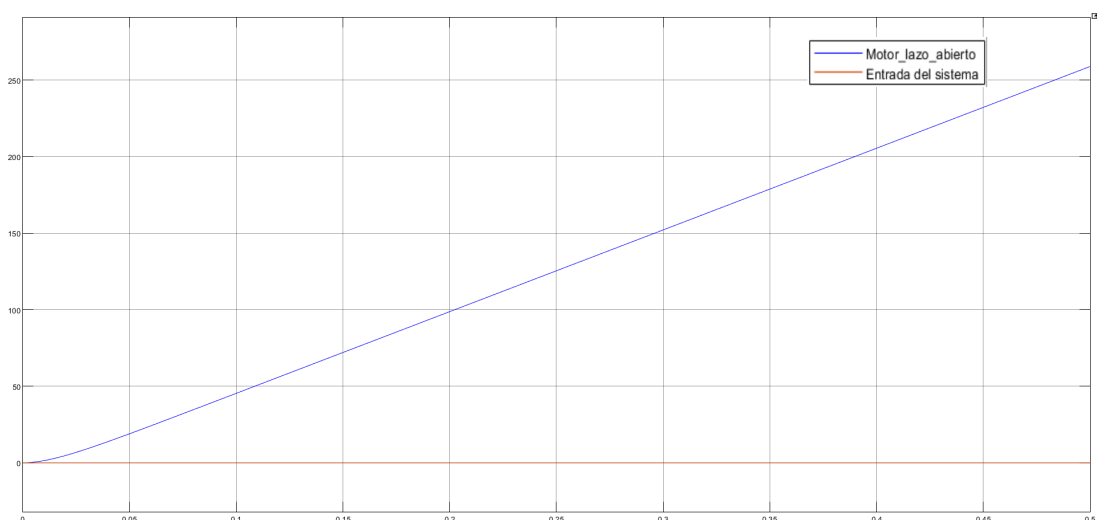


Figura 100: Respuesta del sistema sin controlador con lazo abierto.

Para realizar el análisis de los controladores se debe considerar al sistema en lazo cerrado sin la implementación de un controlador como se observa en la Figura 102.

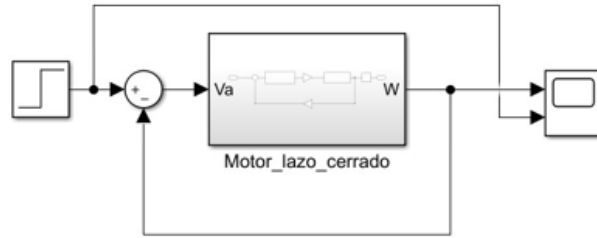


Figura 101: Diagrama de bloques del sistema sin controlador con lazo cerrado.

La respuesta del sistema sin controlador y con lazo cerrado que se observa en la Figura permite realizar el análisis del comportamiento de los controladores.

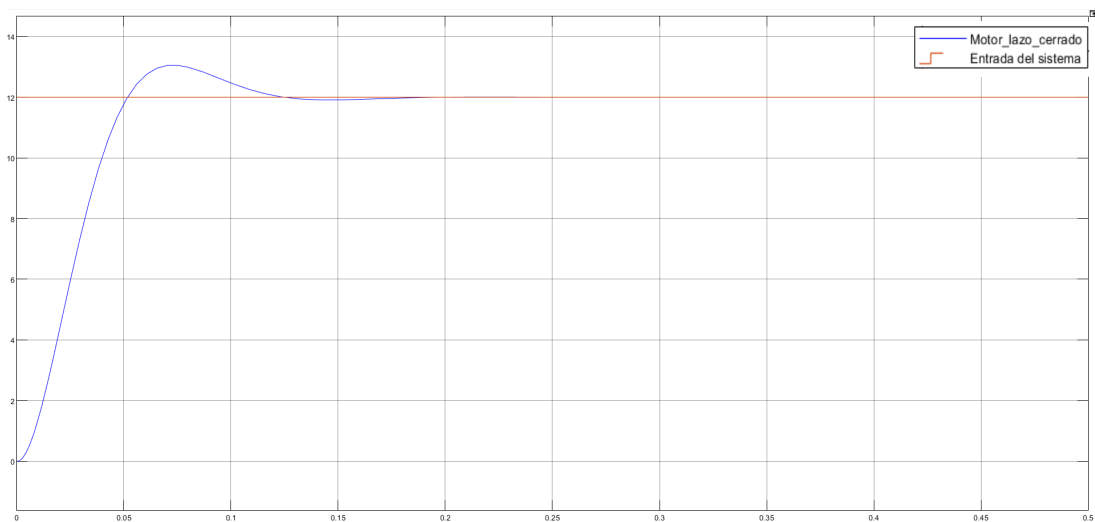


Figura 102: Respuesta del sistema sin controlador y con lazo cerrado.

■ Controlador PI

El primer controlador es el PI que se observa en la Figura 103, se realiza la simulación de este controlador con la función de transferencia de la velocidad angular respecto al voltaje de alimentación.

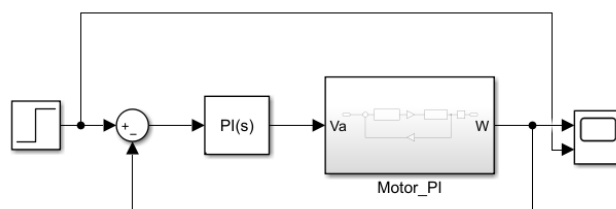


Figura 103: Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado más controlador PI.

El software Simulink proporciona una herramienta denominada Tuner, la cual proporciona un método de ajuste PID de bucle único rápido y ampliamente aplicable para los

bloques de controlador PID. Para acceder a esta herramienta se debe realizar doble click sobre el controlador haciendo que se despliegue una pantalla la cual se observa en la Figura 104, se debe presionar la opción Tuner y esta se encarga de generar de manera automática los valores de K_p , K_d y K_i .

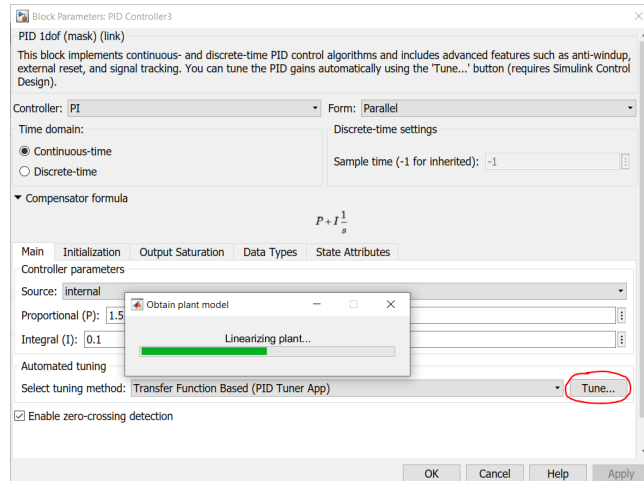


Figura 104: Herramienta Tune para obtención de parámetros de control.

Se obtienen valores de $K_p = 1,5$ y $K_i = 0,1$ dando una respuesta del sistema como se observa en la Figura 105, se realiza la comparación con el sistema sin ningún controlador lo cual permite concluir que el tiempo de subida y el tiempo de asentamiento se reduce haciendo que el sistema se establezca más rápido con el controlador PI. La sobreelongación es mayor con el controlador PI.

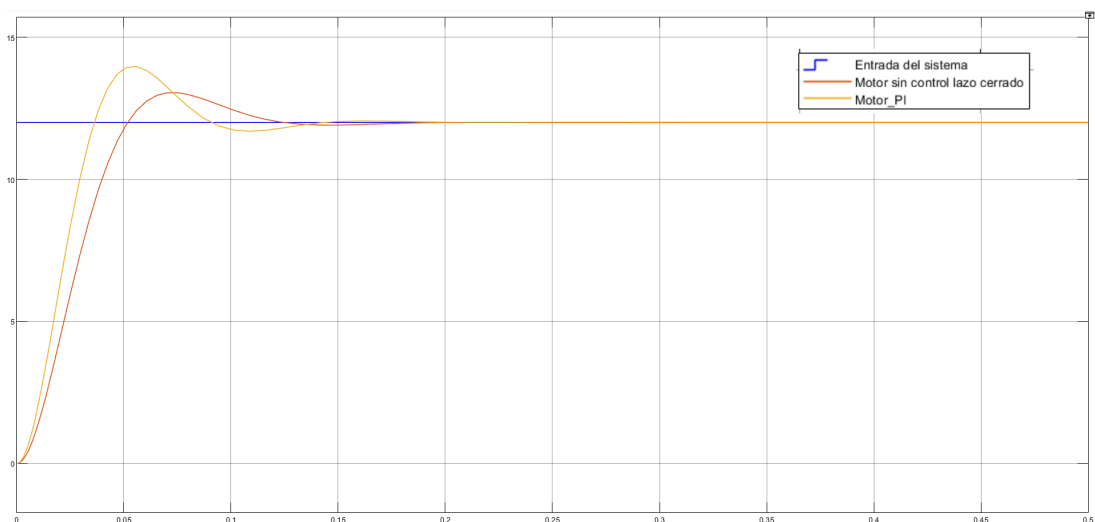


Figura 105: Respuesta del sistema con controlador PI vs., respuesta del sistema sin controlador.

■ Controlador PD

El controlador PD se observa en la Figura 106, de igual manera se utiliza la herramienta Tuner para estimar los parámetros de control, se obtiene valores de $K_p=1,5$ y $K_d=0,01$.

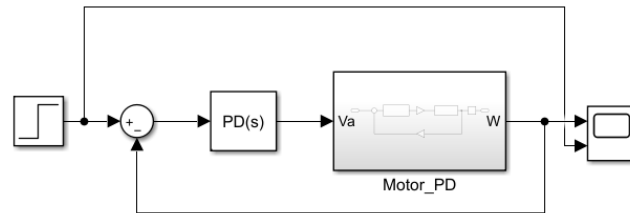


Figura 106: Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con controlador PD.

La respuesta del sistema con controlador PD se observa en la Figura 107. Se realiza la comparación con el sistema sin ningún controlador lo cual permite concluir que el tiempo de subida y el tiempo de asentamiento se reduce haciendo que el sistema se estabilice más rápido con el controlador PD. La sobreelongación se reduce con este controlador en comparación al PI.

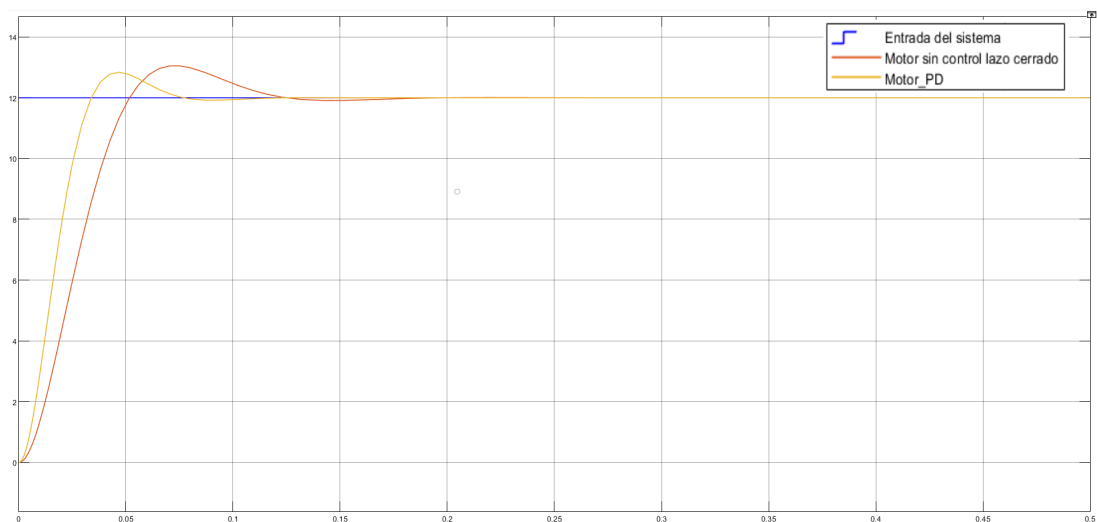


Figura 107: Respuesta del sistema con controlador PD vs., respuesta del sistema sin controlador

■ Controlador PID

El siguiente controlador a analizar es el PID que se observa en la Figura 108, de igual manera se utiliza la herramienta Tune para determinar los parámetros de control, los cuales son $K_p=1,5$; $K_d=0,01$; $K_i=0,1$.

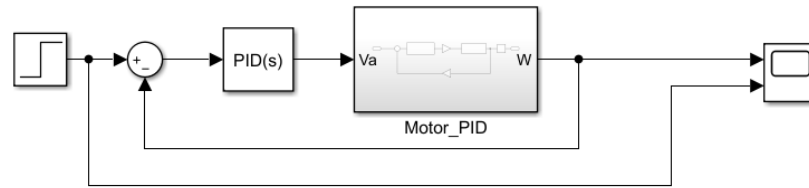


Figura 108: Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con controlador PID.

La respuesta del sistema se puede observar en la Figura 109, el tiempo de subida, tiempo de asentamiento y la sobreelongación es similar al controlador PD. Debido a esto se analiza los tres controladores en una sola gráfica para realizar la selección.

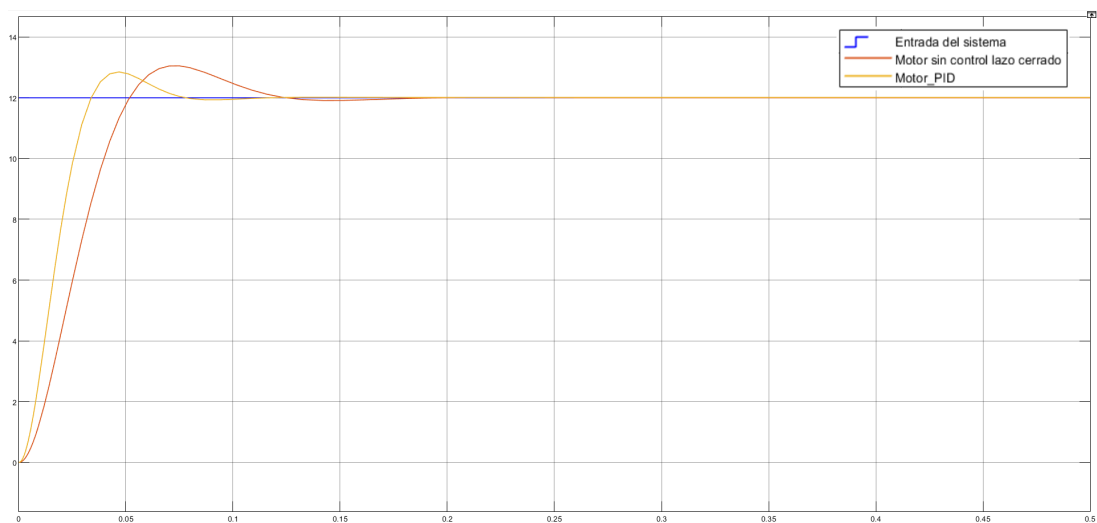


Figura 109: Respuesta del sistema con controlador PID vs., respuesta del sistema sin controlador

En la Figura 110 se observan las tres respuestas del sistema con los diferentes controladores. El PD y PID cuentan con la misma sobreelongación, tiempo de subida y de asentamiento, en comparación con el sistema sin controlador estos parámetros se reducen haciendo que el sistema se establezca en menor tiempo.

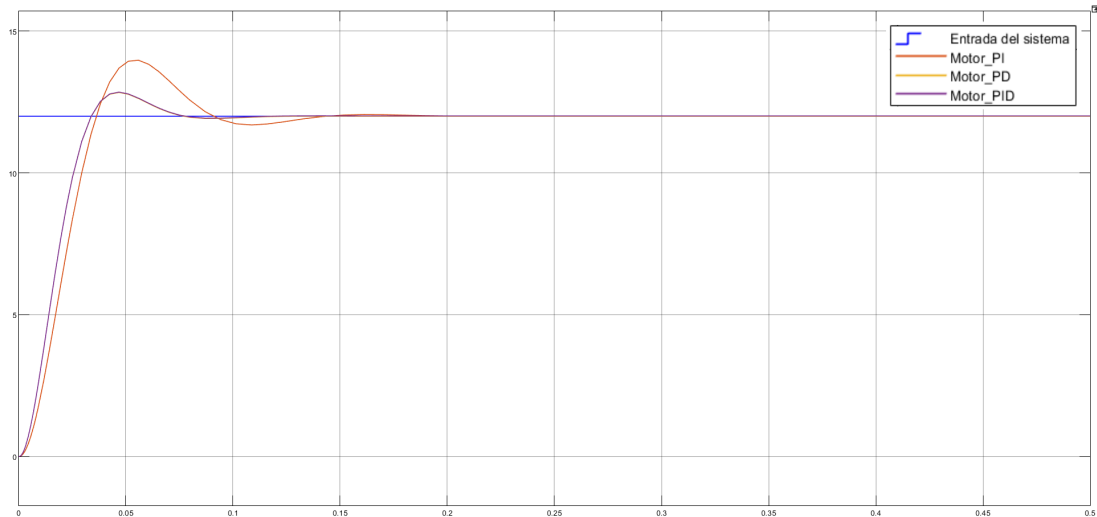


Figura 110: Gráfica de los tres controladores.

Se selecciona el controlador PID debido a que puede aplicarse a la mayoría de sistemas, más aún cuando se desconoce el modelo matemático de la planta.

16.5. Implementación del controlador PID en el sistema de locomoción

Se procede a realizar el control de un motor, esto se hace para que los cuatro motores posean el mismo PWM. Primero se realiza el control con los parámetros de la simulación y se obtiene la respuesta reflejada en la Figura 111.



Figura 111: Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,01$; $K_i=0,1$.

Como se observa en la Figura 111 el sistema presenta oscilaciones, esto indica que el parámetro que debe ajustarse es el derivativo ya que este se encarga de estabilizar la respuesta haciendo que no oscile demasiado, se procede con un $K_d=0,1$. La respuesta del sistema se observa la Figura 112.

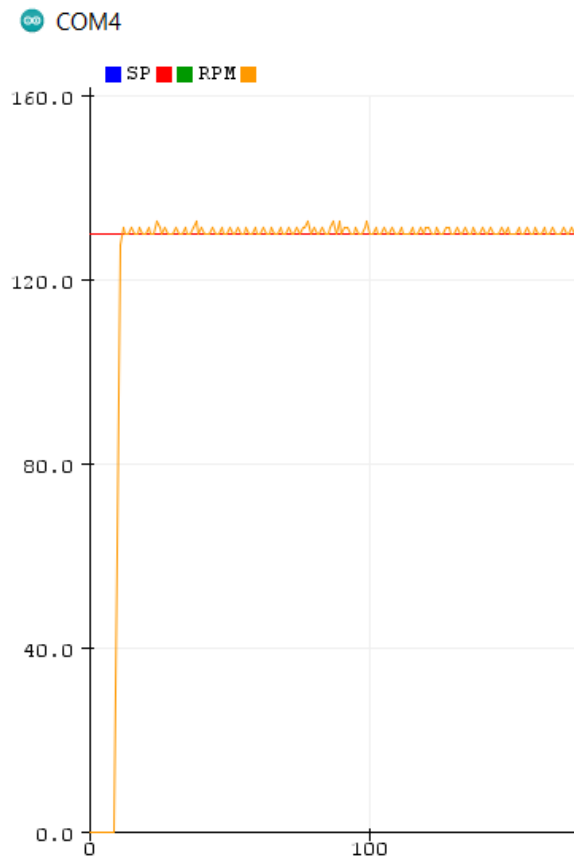


Figura 112: Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,1$; $K_i=0,1$

Como se observa en la Figura 112 las oscilaciones aumentaron con un K_d mayor, esto se produce debido a que la salida del controlador es proporcional al cambio del error con el tiempo, al iniciar el sistema debe tener una ganancia derivativa menor para que el error se reduzca. Se procede con un $K_d=0,001$. La respuesta del sistema se puede observar en la Figura 113

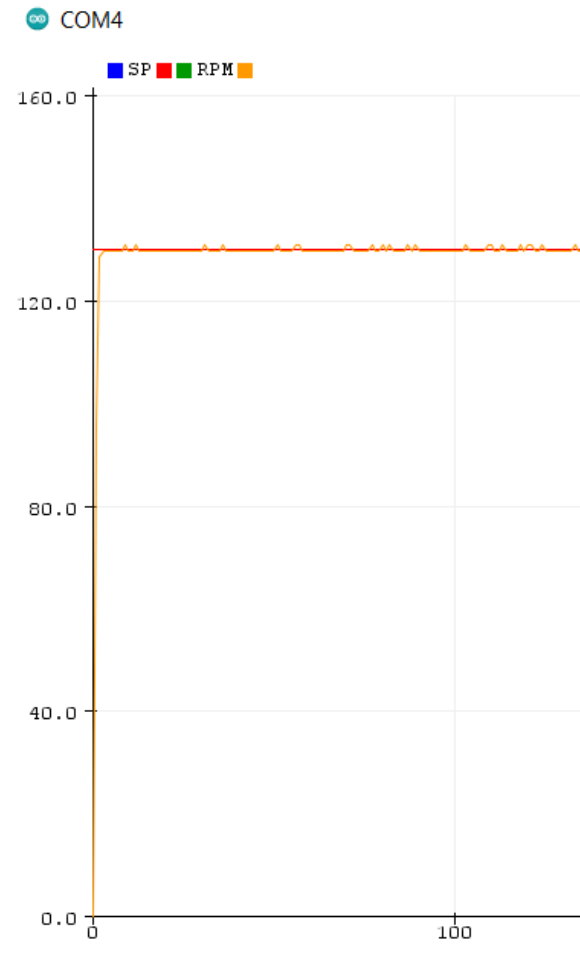


Figura 113: Respuesta del motor con control PID con un $K_p=1,5$; $K_d=0,001$; $K_i=0,1$

El controlador PID garantiza que las RPM sean estables, lo cual permite que el posicionamiento en cada sitio de siembra así como también la colocación de la semilla sea con exactitud.

16.6. Control dosificación de semillas

Para mantener un control de las semillas dosificadas se utiliza el principio de funcionamiento de un sensor de conteo, el cual se puede observar en la Figura 114. Estos sensores cuentan con sensores IR (emisor, receptor) los cuales detectan cuando un obstáculo se atraviesa por la señal emitida entre ambos. Esto permite realizar un conteo del número de semillas que se dosifican por sitio de siembra.



Figura 114: Sensor para conteo de semillas.

El sensor IR utiliza dos Led's, el primero es un emisor que envía un haz de luz infrarrojo que es imperceptible para el ojo humano. El segundo es un receptor que tiene el funcionamiento de un transistor, entra en saturación cuando el haz de luz se interrumpe, permitiendo el paso de voltaje para el envío de la señal. El esquema del funcionamiento se puede observar en la Figura 115.

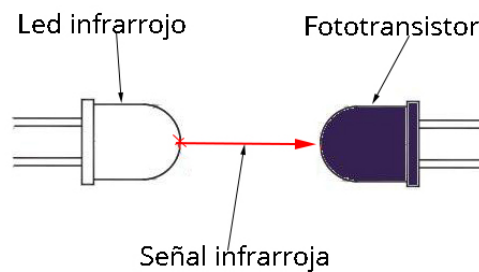


Figura 115: Principio de funcionamiento de sensor IR.

16.7. Interfaz de control del robot móvil

El mando del robot se realiza por medio del control inalámbrico, el cual permite la selección del modo de funcionamiento por medio del menú como se puede observar en la Figura 117, a través de la pantalla se visualiza la opción que el usuario va a seleccionar.

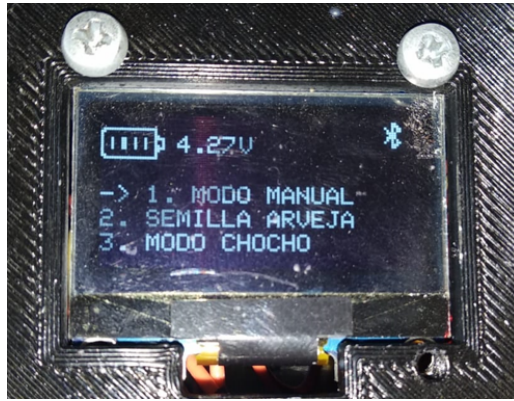


Figura 116: Menú de inicio del mando inalámbrico.

Para la selección del modo de operación se utiliza el joystick, el movimiento del mismo permite la navegación dentro del menú como se observa en la Figura 117.



Figura 117: Movimiento del joystick para navegación dentro del menú.

Cuando se realiza la selección del modo de funcionamiento la pantalla cambia y muestra el modo en el cual está trabajando el robot móvil como se muestra en la Figura 118.

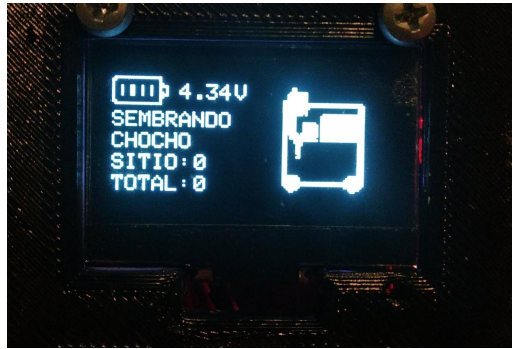


Figura 118: Visualización del modo chocho.

Como se observa en la Figura 118 la pantalla permite visualizar el total de semillas sembradas así como también las semillas dosificadas por sitio, una vez terminada la siembra en la hilera se muestra un mensaje para realizar la selección de continuar o no la siembra, como se observa en la Figura 119.

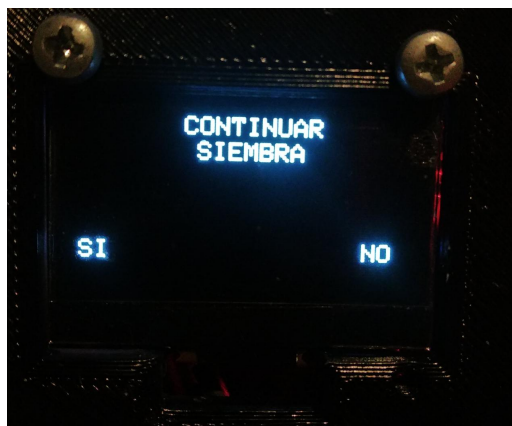


Figura 119: Mensaje para continuar la siembra.

17. Pruebas de funcionamiento

17.1. Pruebas de comunicación

La primera prueba realizada fue la distancia de conexión entre los módulos Bluetooth, esta prueba se hizo con línea de vista despejada y con obstáculos. Se comprobó si existía comunicación a diferentes distancias, los resultados se observan en la Tabla 37.

Tabla 37: Prueba de comunicación entre módulos Bluetooth

Línea de vista despejada		
Número de prueba	Distancia [m]	Comunicación
1	1	Si
2	2	Si
3	3	Si
4	5	Si
5	7	Si
6	9	No
7	10	No
Línea de vista con obstáculos		
Número de prueba	Distancia [m]	Comunicación
1	1	Si
2	2	Si
3	3	Si
4	5	No
5	7	No
6	9	No
7	10	No

Esta prueba permitió determinar la distancia de conexión entre el control y el robot móvil, la cual no debe exceder los 7 metros con línea de vista despejada y 3 metros cuando se presenten obstáculos.

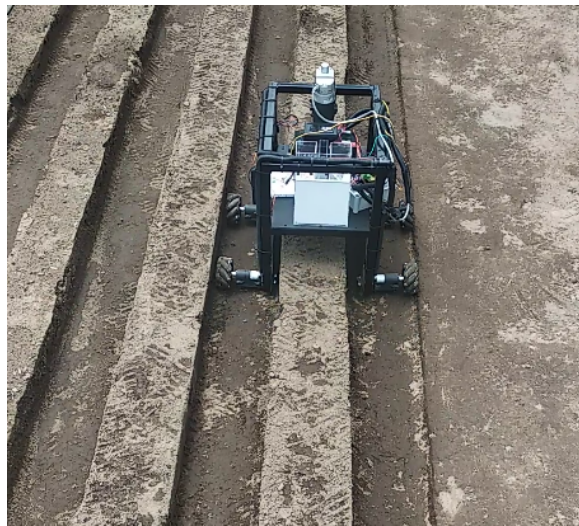
17.2. Prueba de desplazamiento del robot móvil

Posterior a la prueba de comunicación, se realizó el desplazamiento del robot móvil. El propósito de esta prueba es conocer el tiempo que se demora en recorrer cada hilera cuando no está realizando la siembra, así como también si el desplazamiento se realiza de manera correcta, es decir, que no se produzcan colisiones con la hilera o si se presentan cúmulos de tierra que impidan el movimiento del robot móvil. En la Tabla 38 se observan los resultados de la prueba, donde 3 es insatisfactorio, 2 poco satisfactorio y 1 es satisfactorio.

Tabla 38: Pruebas desplazamiento por hilera

Prueba desplazamiento sin siembra				
Hilera	Desplazamiento	Tiempo	Calificación	Velocidad
Hilera 1	1	11,2 s	2	0,42 m/s
	2	10,9 s	1	0,44 m/s
	3	11,3 s	2	0,42 m/s
Hilera 2	1	11,6 s	2	0,41 m/s
	2	11,3 s	1	0,42 m/s
	3	11,1 s	1	0,43 m/s
Hilera 3	1	10,8 s	2	0,44 m/s
	2	11,2 s	2	0,42 m/s
	3	11,3 s	2	0,42 m/s
Hilera 4	1	10,9 s	1	0,44 m/s
	2	10,8 s	1	0,44 m/s
	3	10,9	1	0,44 m/s

En la Figura 120 se puede observar el desplazamiento por la hilera 4.

**Figura 120:** Desplazamiento del robot móvil por hilera 4.

El robot móvil presenta dificultades en su desplazamiento cuando la tierra se encuentra húmeda y con cúmulos de lodo, si la tierra se encuentra seca el desplazamiento se realiza sin ningún tipo de problema.

17.3. Prueba de calibración del sistema de perforación

La siguiente prueba fue la calibración del sistema de la broca para garantizar que la penetración no exceda los 5 cm. Esta se realizó en cada hilera y los resultados se observan en la Tabla 39.

Tabla 39: Pruebas perforación por hilera

Prueba calibración de la broca			
Hilera	Perforación	Profundidad	Distancia entre sitio
Hilera 1	1	3 cm	1 m
	2	4 cm	1 m
	3	4 cm	1 m
Hilera 2	1	4 cm	1 m
	2	3 cm	1 m
	3	4 cm	1 m
Hilera 3	1	4 cm	1 m
	2	4 cm	1 m
	3	4 cm	1 m
Hilera 4	1	4 cm	1 m
	2	4 cm	1 m
	3	4 cm	1 m

El resultado y medición de las perforaciones se pueden observar en la Figura 121. Esta prueba permitió calibrar el actuador lineal para que la perforación en el sitio de siembra no exceda los 5 cm. La profundidad de siembra está en el rango de los 3 a 4 cm.



Figura 121: Prueba de penetración en el suelo

17.4. Prueba de dosificación de semillas

Posterior se realizó la prueba de la dosificación de las semillas por cada sitio de siembra, para esto la hilera 1 y 2 se utilizó para la semilla de arveja mientras que la hilera 3 y 4 para chocho. Para esta prueba no se consideró la separación establecida entre cada sitio de siembra, se realizó a una separación de 40 cm. El resultado se puede ver en la Tabla 40.

Tabla 40: Pruebas dosificación en sitio de siembra

Semilla arveja			
Hilera	Sitio	Semillas	Profundidad
Hilera 1	1	4	4 cm
	2	4	4 cm
	3	3	4 cm
	4	4	3 cm
	5	3	3 cm
Hilera 2	1	4	4 cm
	2	3	4 cm
	3	3	3 cm
	4	3	4 cm
	5	4	4 cm
Semilla chocho			
Hilera 3	1	5	4 cm
	2	5	4 cm
	3	6	3 cm
	4	5	3 cm
	5	4	3 cm
Hilera 4	1	4	4 cm
	2	4	3 cm
	3	5	3 cm
	4	6	4 cm
	5	5	4 cm

En la Figura 122 se observa la dosificación de arveja, por otro lado en la Figura 123 se observa la dosificación de chocho.



Figura 122: Dosificación de arveja en sitio de siembra.



Figura 123: Dosificación de chocho en sitio de chocho.

La prueba final consistió en realizar la dosificación de arveja en las cuatro hileras, de igual manera la semilla de chocho. Esta prueba permitió determinar el total de semillas utilizadas y el tiempo que se demora en realizar la siembra. En Tabla 41 se observa el resultado de la siembra en la hilera 1.

Tabla 41: Sembrado de arveja hilera 1

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
	1	4		-
	2	4		26 cm
	3	3		26 cm
	4	4		26 cm
	5	4		27 cm

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 1	6	4	6 min	26 cm
	7	3		26 cm
	8	3		27 cm
	9	3		27 cm
	10	3		26 cm
	11	3		27 cm
	12	4		27 cm
	13	4		26 cm
	14	3		26 cm
	15	3		27 cm
	16	3		26 cm
	17	4		27 cm
	18	3		27 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 1 es de 62, y el tiempo que se empleó en sembrar 18 sitios de siembras fue de 6 minutos. En la Tabla 42 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 2.

Tabla 42: Sembrado de arveja hilera 2

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 2	1	3	7 min	-
	2	2		26 cm
	3	3		26 cm
	4	4		27 cm
	5	3		26 cm
	6	4		26 cm
	7	3		26 cm
	8	4		26 cm
	9	5		27 cm
	10	3		26 cm
	11	3		27 cm
	12	5		27 cm

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
	13	3		26 cm
	14	3		26 cm
	15	4		27 cm
	16	3		27 cm
	17	4		26 cm
	18	3		26 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 2 es de 62, y el tiempo que se empleó en sembrar 18 sitios de siembras fue de 7 minutos. En la Tabla 43 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 3.

Tabla 43: Sembrado de arveja hilera 3

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
	1	3		-
	2	3		26 cm
	3	3		26 cm
	4	3		27 cm
	5	3		27 cm
	6	3		26 cm
	7	4		27 cm
	8	3		26 cm
Hilera 3	9	3	7 min	27 cm
	10	3		26 cm
	11	4		26 cm
	12	4		26 cm
	13	4		26 cm
	14	3		26 cm
	15	3		25 cm
	16	3		26 cm
	17	3		26 cm
	18	4		26 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 3 es de 59, y el tiempo que se empleó en

sembrar 18 sitios de siembras fue de 7 minutos. En la Tabla 44 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 3.

Tabla 44: Sembrado de arveja hilera 4

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 4	1	3	7 min	-
	2	3		26 cm
	3	3		26 cm
	4	4		27 cm
	5	4		27 cm
	6	3		26 cm
	7	3		27 cm
	8	3		26 cm
	9	4		27 cm
	10	5		26 cm
	11	3		26 cm
	12	3		26 cm
	13	3		26 cm
	14	4		26 cm
	15	3		25 cm
	16	4		26 cm
	17	4		26 cm
	18	4		26 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 4 es de 63, y el tiempo que se empleó en sembrar 18 sitios de siembras fue de 7 minutos. El total de semillas utilizadas es de 246 y el tiempo fue de 27 minutos. De igual manera se realizó la siembra para la semilla de chocho en las cuatro hileras. En la Tabla 45 se observa el resultado de la siembra en la hilera 1.

Tabla 45: Sembrado de chocho hilera 1

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 1	1	5	6 min	-
	2	5		30 cm
	3	5		31 cm
	4	4		30 cm
	5	5		30cm
	6	5		31 cm
	7	5		31 cm
	8	4		31 cm
	9	5		31 cm
	10	5		30 cm
	11	5		30 cm
	12	5		30 cm
	13	4		30 cm
	14	4		31 cm
	15	5		31 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 1 es de 71, y el tiempo que se empleó en sembrar 15 sitios de siembras fue de 6 minutos. En la Tabla 46 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 2.

Tabla 46: Sembrado de chocho hilera 2

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 2	1	5	5 min	-
	2	5		30 cm
	3	5		30 cm
	4	5		30 cm
	5	4		31cm
	6	4		31 cm
	7	4		30 cm
	8	4		30 cm
	9	5		31 cm

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
	10	4		31 cm
	11	5		30 cm
	12	4		31 cm
	13	4		30 cm
	14	4		30 cm
	15	4		30 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 2 es de 66, y el tiempo que se empleó en sembrar 15 sitios de siembras fue de 5 minutos. En la Tabla 47 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 3.

Tabla 47: Sembrado de chocho hilera 3

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
	1	4		-
	2	4		31 cm
	3	4		30 cm
	4	5		30 cm
	5	5		31cm
	6	5		31 cm
	7	5		30 cm
Hilera 3	8	5	6 min	30 cm
	9	5		31 cm
	10	5		30 cm
	11	5		30 cm
	12	5		31 cm
	13	5		30 cm
	14	5		30 cm
	15	4		30 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 3 es de 71, y el tiempo que se empleó en sembrar 15 sitios de siembras fue de 6 minutos. En la Tabla 48 se visualiza el resultado de la siembra en la hilera 4.

Tabla 48: Sembrado de chocho hilera 4

Hilera	Sitio	Semillas	Tiempo	Separación
Hilera 4	1	4	6 min	-
	2	4		31 cm
	3	5		30 cm
	4	5		31 cm
	5	5		31cm
	6	5		31 cm
	7	4		30 cm
	8	4		30 cm
	9	5		30 cm
	10	5		30 cm
	11	4		30 cm
	12	4		30 cm
	13	5		30 cm
	14	4		30 cm
	15	4		30 cm

El total de semillas utilizadas en la hilera 4 es de 67, y el tiempo que se empleó en sembrar 15 sitios de siembras fue de 6 minutos. El total de semillas de chocho utilizadas es de 275 con tiempo empleado en la siembra de 23 minutos.

18. Análisis de costos

Se analiza el costo de la fabricación del proyecto, en la Tabla 49 se detalla cada componente utilizado y su precio.

Tabla 49: Análisis de costos del proyecto

Materiales	Cantidad	Precio unitario	Total
Perfile 6 metros	1	\$33,6	\$33,6
Platinas	6	\$13,67	\$82,02

Materiales	Cantidad	Precio unitario	Total
Fabricación perfiles y platinas	1	\$75,5	\$75,5
Motores DC	8	\$20	\$160
Drivers motores DC	2	\$5,5	\$11
Sensor IR	1	\$3	\$3
Impresiones 3D (9 piezas 24 horas de impresión)	1	\$24	\$3,5
Actuador lineal	1	\$30	\$30
Regulador de voltaje	1	\$9,8	\$9,8
Módulos Bluetooth	2	\$7	\$14
Módulo joystick	1	\$1,5	\$1,5
Pantalla Oled	1	\$6,5	\$6,5
Batería 12V y cargador	1	\$25	\$25
Batería 5V y cargador	1	\$5	\$5
Caja eléctrica JSL	1	\$20	\$20
Corte acrílico	1	\$11	\$11
Mecanum Whells	4	\$18,75	\$75
Pernos M6	8	\$1,5	\$12

Materiales	Cantidad	Precio unitario	Total
Pernos M3	12	\$0,85	\$6,8
Visualizador de voltaje robot móvil	1	\$2,5	\$2,5
Prensa estopa	3	\$0,87	\$2,61
Horas de trabajo (30h)	1	\$750	\$750
Total			\$1420,83

El costo para la fabricación tanto del robot móvil como el control inalámbrico tiene un valor de \$1420,83. Se detallan los beneficios de la implementación del robot móvil:

- Se tiene un control de las semillas utilizadas en la siembra logrando una disminución en el uso de este insumo.
- Se evita la tarea de señalar el sitio de siembra de manera manual, la maquina lo realiza de manera automática.
- La capacitación al usuario no es compleja, el manual de usuario ofrece la información necesaria.
- Al ser una maquina sembradora su peso es solo de 10 kg, haciendo que su traslado no sea difícil.
- Se realiza la dosificación de dos tipos de semillas sin la necesidad de cambiar el tipo de dosificador.
- La máquina sirve de herramienta para ejecutar una tarea repetitiva.

18.1. Análisis de costos en la utilización de insumos

Se analiza un caso de producción de arveja en invernadero de 150 m² sector Tumbaco-Pichincha, este proyecto presento como resultado el costo beneficio en un área de siembra

de 7,5 m². Dentro de este proyecto se utilizó siembra manual, [71]. El resultado de la producción se puede observar en la Figura 124.

Producción de arveja en invernadero					
Labor o actividad	Unidades	Costo de tecnología.			
		Cant.	Costo	Total/ha	%
4) Insumos					
Semilla	Kg	120	\$ 2,00	\$ 240,00	
Abonos foliares	Vitalof floración/kg	4	\$ 3,75	\$ 15,00	
Insecticidas	Dipel/kg	1,5	\$ 42,00	\$ 63,00	
	Neem/litro	1,5	\$ 26,00	\$ 39,00	
Codornaza	Kg	4000	\$ 0,04	\$ 160,00	
	Subtotal			\$ 517,00	35,82

Figura 124: Costo de insumos para siembra de arveja, [71].

La Figura 124 permite visualizar que se utilizó 120 kg/h, es decir, 12 gr/m². Para determinar el total de semillas usadas en el área de siembra se utiliza la siguiente relación (62).

$$total_1 = \frac{7,5[m^2] \cdot 12[gr]}{1[m^2]} \quad (62)$$

El total de semillas usadas en el área de siembra fue de 90 gr. El prototipo utiliza un total de 246 semillas para un área de 5,8 m², la masa de una semilla de arveja es de 0,25 gr, [72]. Este dato permite determinar el total de semillas utilizadas en masa dando un resultado de 61,5 gr. Para determinar la masa usada por el robot móvil en un área de 7 m² se utiliza la siguiente relación.

$$total_2 = \frac{7,5[m^2] \cdot 61,5[gr]}{5,8[m^2]} \quad (63)$$

El prototipo utilizaría alrededor de 79 gr, es decir, que se reduce las semillas por metro cuadrado. Si este valor se lo escala a la hectárea se utilizaría un total de 105 kg/h, 15 kg menos reduciendo el costo de insumo a un valor de \$210. En la Tabla 50 se detalla los resultados de este análisis.

Tabla 50: Análisis del consumo de semillas

Proceso	Área de siembra	Semillas usadas
Siembra manual	7,5 m ²	90 gr
Siembra con el robot móvil	7,5 m ²	79 gr
Siembra manual	1 hectárea	120 kg
Siembra con el robot móvil	1 hectárea	105 kg

Los valores determinados son obtenidos en base a las pruebas realizadas, estos pueden variar cuando se realice la siembra, pero permiten visualizar que existe una reducción en el costo de los insumos al disminuir el uso de semillas por metro cuadrado.

18.2. Análisis de costo en mano de obra

En la Figura 125 se detalla el costo que tiene la mano de obra para realizar la siembra en una hectárea, para este análisis se considera a una jornada como ocho horas laborales, es decir, para cumplir con el total de siembra se usan 40 horas.

Producción de arveja en invernadero					
Labor o actividad	Unidades	Costo de tecnología.			
		Cant.	Costo	Total/ha	%
3) Mano de obra					
Siembra	Jornal	5	\$ 10,00	\$ 50,00	
Fertilización	Jornal	4	\$ 10,00	\$ 40,00	
Deshierba	Jornal	15	\$ 10,00	\$ 150,00	
Riego	Jornal	8	\$ 10,00	\$ 80,00	
Cosecha	Jornal	30	\$ 10,00	\$ 300,00	
Subtotal				\$ 620	42,96

Figura 125: Costo de mano de obra para siembra de arveja, [71].

El costo de utilización del robot móvil depende de las recargas realizadas, lo cual sucede después de tres de horas de funcionamiento, toma alrededor de 30 minutos recargarla. En una jornada laboral requerirá dos recargas. Con esto se puede calcular el consumo en kW/h, en Ecuador es de 0,92cUSD/kW, [73]. En la Tabla 51 se detalla el consumo.

Tabla 51: Análisis del consumo eléctrico del robot móvil

Potencia (kW)	Consumo en 5 jornadas (kWh)	Precio
0,045	0,225	\$0,20

El costo de la mano de obra se disminuye sustancialmente al implementar el robot móvil debido a que solo necesitaría un operador. Se lograría distribuir a las personas para que realicen las demás actividades reduciendo el tiempo que tomaría concluir la siembra en su totalidad.

19. Conclusiones

- El robot móvil está diseñado para trabajar en un terreno ya preparado para realizar la siembra, el mismo que debe cumplir normas de la INIAP para leguminosas como: altura de surco 10 cm y ancho del mismo 15 cm.
- Las dimensiones del robot móvil son $350 \times 450 \times 443$ mm, permitiéndole realizar el desplazamiento por cada hilera sin presentar inconvenientes.
- La estructura está diseñada para que el robot móvil pueda trabajar bajo un ambiente controlado, es decir, en un invernadero. No puede trabajar en condiciones de lluvia, puede realizar dos etapas de siembra: perforación y dosificación, su posicionamiento inicial en la hilera debe ser manual.
- El rango de comunicación entre el control y el robot debe ser de máximo 5 metros, con línea de vista despejada o no.
- La velocidad de desplazamiento del robot móvil es de 0,43 m/s, la cual tiene una diferencia de 0,1 con respecto a la velocidad determinada analíticamente que tiene un valor de 0,5 m/s.
- El contenedor de semillas cumple con la capacidad para realizar la siembra en un área de 5 m^2 .
- El diseño del cilindro dentado permite dosificar entre una a dos semillas por cada diente, lo que permitió cumplir con los parámetros de la INIAP necesarios por cada sitio de siembra, de 3 a 4 (arveja) y 3 a 5 (chocho).
- Se implementó un sensor a la salida de las semillas que permite realizar un inventario, dando una optimización en los recursos utilizados, así se pudo determinar que el

promedio de semillas de arveja utilizadas por hilera es de 63, mientras que de chocho son 72.

- El control PID implementado en los motores permite realizar un posicionamiento entre sitio de siembra más exacto dando como resultado una distancia de 26 cm para arveja y para chocho 30 cm.
- La perforación no debe sobrepasar los 5 cm de profundidad debido a que se produce una afectación en la hilera, el caso más crítico fue el desbordamiento de tierra.
- El terreno para realizar la perforación debe tener características de franco arenoso, aunque el diseño del sistema de broca cumple con parámetros de funcionamiento fuera de estas características, se podría ver afectado a largo plazo al ser utilizado en condiciones fuera de las deseas del suelo.
- El tiempo de autonomía del robot móvil es de tres horas, la recarga toma un tiempo de 30 minutos.

20. Recomendaciones

- Al finalizar la siembra, se debe realizar la limpieza del robot móvil, como se especifica en el manual de usuario.
- El robot móvil debe estar sobre el soporte cuando no está en uso, esto se debe realizar para evitar forzar los motores.
- La limpieza del contenedor se debe realizar cada dos siembras para evitar el cúmulo de polvo y tierra.
- Se debe verificar el nivel de carga del robot previo a realizar la siembra, en el manual de usuario se especifica como se lo debe realizar.
- Al iniciar la siembra primero se debe colocar al sistema de broca en la posición inicial como lo muestra el manual de usuario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G.González, T.Carrillo, y G.María, “Implementación De Un Prototipo De Robot Sembrador De Papa En Terrenos Sin Inclinação Para Pequeños Productores,” Ph.D. dissertation, 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13686>
- [2] ESPAC, “Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua,” *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, p. 23, 2014.
- [3] C.Caicedo y E.Peralta, “Chocho, fréjol y arveja, leguminosas de grano comestibles con un gran mercado potencial en Ecuador,” *INIAP*, pp. 4–20, 1999.
- [4] G.Feijoo y A.Sebastián, “Importancia de la agricultura para el desarrollo de las comunidades rurales de la parroquia malvas del cantón Zaruma,” pp. 3–43, 2021.
- [5] F.Iturralde, “Importancia del sector agrícola en una economía dolarizada,” pp. 13–22, 2017.
- [6] C.Suárez, M.Moreira, y J.Vera, “Manual cultivo de cacao,” no. 52, p. 97, 1994. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1621>
- [7] E.García y F.Flego, “Agricultura de precisión,” *Tecnología Agropecuaria*, pp. 24–31, 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.maquinac.com/wp-content/uploads/2015/07/Agricultura-de-Precision-Universidad-de-Palermo.pdf>
- [8] A.Manchado, “Desarrollo de un robot para la caracterización y el tratamiento de las plantas en agricultura de precisión,” p. 55, 2019. [En línea]. Disponible: http://oa.upm.es/56778/1/TFG_ALEJANDRO_MANCHADO_RUBIO.pdf
- [9] J.García, “Los robots en el sector agrícola,” pp. 5–13, 2012. [En línea]. Disponible: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299011/2-2015/Robot-en-La-Agricultura.pdf>
- [10] L.García, “Navegación autónoma de robots en agricultura, un modelo de agentes,” Ph.D. dissertation, Universidad Complutense de Madrid, 2004.

- [11] C.Gómez y A.Juan, “Robótica móvil estudio y caracterización del robot móvil kjunior desarrollo de aplicación de robot laberinto,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.
- [12] T.Bräunl, *Robots and controllers*, 2022.
- [13] AUSID, “Guía de siembra directa.” *Uruguay*, vol. 5, pp. 6–12, 2009. [En línea]. Disponible: www.mgap.gub.uy/presponsable
- [14] E.Marchesi, “Conceptos generales sobre siembra directa,” *Tecnologías para siembras sin laboreo*, vol. 240, pp. 10–35, 2000. [En línea]. Disponible: http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/ad/2000/ad_240.pdf
- [15] E. . A. M.Peralta, “Manual agrícola de leguminosas,” *INIAP*, pp. 25–40, 2000. [En línea]. Disponible: <http://181.112.143.123/bitstream/41000/2827/1/iniapsc322est.pdf>
- [16] Iniap, “Manejo del cultivo del chocho,” *Programa Conjunto de Seguridad Alimentaria y Nutricional*, vol. 53, no. 9, p. 2, 2013.
- [17] INIA. Estación Experimental Agraria Santa Ana, “Nueva variedad de arveja,” *Instituto Nacional de Innovación Agraria*, pp. 9–10, 2004. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/669>
- [18] D.Araque, “Diseño y construcción de un prototipo de robot tetrápodo sembrador de semillas para leguminosas,” Ph.D. dissertation, Espe, 2018. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15131/1/T-ESPE-040459.pdf>
- [19] D.Chávarro, “Análisis de compactación en suelo franco arenoso usando herramientas de sistemas de información geográfica en el centro de formación agroindustrial la angostura - Campoalegre, Huila,” pp. 3–6.
- [20] M.Ferrero, “Evaluación de la calidad de un suelo franco limoso bajo diferentes usos en el sudeste de Córdoba,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Villa María, 2015.
- [21] C. I.Cerisola, M. G.García, y R. R.Filgueira, “Soil porosity distribution of a clay loam soil (Alfisol) in semi-arid conditions after 15 years under direct drilling,” *Ciencia del Suelo*, vol. 23, no. 2, p. 3, 2005.

- [22] M.Garzón, “Mantenimiento de torres de perforación petrolera,” Ph.D. dissertation, Escuela Politécnica Nacional, 2006.
- [23] A.Uribe y J.Padilla, “Diseño de un equipo portátil de perforación de suelos humíferos y mixtos de hasta 100 metros de profundidad,” Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA, 2017.
- [24] Y.Zamrodah, “Dosificadores a chorrillo, análisis de desempeño entre dos diseños usando semilla de trigo,” vol. 15, no. 2, pp. 10–23, 2016.
- [25] J.Ashburner, “Selección y uso de sembradora de cereales,” *INIAP -Estación Experimental Santa Catalina*. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1439>
- [26] E.Cardona, D.Steeven, V.Ospina, y D.Mateo, “Raspberry pi: la tecnología reducida en placa,” *Raspberry*, pp. 2–5, 2019.
- [27] H.Almeida y L. I.and, “Evaluación de la plataforma Arduino e implementación de un sistema de control de posición horizontal,” pp. 2–3, 2013.
- [28] DIPAC, “Dipac, productos de acero,” p. 22, 2020.
- [29] F.Beer y DeWolf John, *Mécanica de Materiales*, 2020, vol. 238.
- [30] R.L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 2004, vol. 4.
- [31] R.Budynas y K.Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 2011.
- [32] Infra, “Manual de electrodos para soldar,” *Electrodos Infra*, vol. 39, no. 5, pp. 6–20, 2008. [En línea]. Disponible: http://www.electrodosinfra.com.mx/pdf/manual_general/manual_general.pdf
- [33] All studies Estudios Universitarios, “Acero Estructural,” *Acero Estructural*, vol. 7514, no. 506, p. 6. [En línea]. Disponible: <http://allstudies.com/acero-estructural.html>
- [34] “Especificaciones técnicas mmotores 12 V,” *Sitio Web*, p. 1, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.openimpulse.com/blog/products-page/product-category/jga25-370-dc-gearmotor/>

- [35] PROYESA, "Manual Técnico de Pernos," p. 17, 2015. [En línea]. Disponible: <http://proyesa.com.sv/site/wp-content/uploads/2018/02/Manual-técnico-de-pernos.pdf>
- [36] J.Denoia y G.Giubileo, "Penetrómetro para el estudio de costras de suelo en laboratorio," *Tecnología N^o*, vol. XIX, pp. 2–4, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/145/14511370009.pdf>
- [37] M.Pérez, A.García, A.Paredes, J.Luna, y P.Madriz, "Resistencia mecánica del suelo a la penetración de raíces y forma de la raíz reservante de la batata a partir del descriptor de Huamán," Ph.D. dissertation, 2016.
- [38] D. O. N.Bosco, "Propuesta de diseño para una máquina perforadora de suelos por percusión," Ph.D. dissertation, 1997.
- [39] FENALCE, *Cultivo de arveja Cultivo de arveja*, 2019.
- [40] R. C.Hibbeler, *Mecánica de materiales*, 6th ed. PEARSON.
- [41] J.Molina, "Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes," Ph.D. dissertation, 2016. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>
- [42] Cotransa, "Actuadores Lineales."
- [43] MOTECK, "Actuadores AUTOULET."
- [44] O.Tobar, "Prototipo de robot arador y sembrador de haba, arveja y fréjol para invernaderos," Ph.D. dissertation, UIDE, 2022. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.uide.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-search.pl>
- [45] E.Clavijo, "Diseño del dispositivo de siembra en charolas de germinación," Ph.D. dissertation, Instituto Politécnico Nacional, 2002.
- [46] J.Plúa, "Utilización de harina de chocho (*lupinus mutabilis*) como ingrediente en la elaboración de pan," Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Tech. Rep., 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19134>

- [47] “Datasheet jga25-370.” [En línea]. Disponible: <https://www.openimpulse.com/blog/jga25-370-gearmotor-selector/>
- [48] “Datasheet pololu.” [En línea]. Disponible: <https://www.pololu.com/product/2331>
- [49] Y.Lan, M. F.Kocher, y J. A.Smith, “Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds,” *Journal of Agricultural and Engineering Research*, vol. 72, no. 2, pp. 1–10, 1999.
- [50] Y.Wong, *Theory of Ground Vehicles*.
- [51] I.González, P.Rodríguez, y M.Angel, “Generadores de corriente continua, ensayos del generador con excitación independiente,” *23 Abr*, vol. 2, no. 0, p. 72, 2022.
- [52] P.Avila, E.Sergio, y G.Cuásquer, “Diseño y construcción de un controlador electrónico de velocidad con freno regenerativo para una plataforma autónoma móvil terrestre con tracción diferencial,” pp. 172–183, 2016. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15093>
- [53] J.Montonen, J. H.Montonen, P.Immonen, K.Murashko, P.Ponomarev, T.Tuomo, P.Lindh, L.Laurila, y J.Pyrhönen, “Electric drive dimensioning for a hybrid working machine by using virtual prototyping,” *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*, no. September, pp. 2–4, 2012.
- [54] “L298n motor driver module.” [En línea]. Disponible: <https://components101.com/modules/l293n-motor-driver-module>
- [55] “L298 datasheet (pdf) - stmicroelectronics.” [En línea]. Disponible: <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/22437/STMICROELECTRONICS/L298.html>
- [56] “nrf24l01.” [En línea]. Disponible: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf
- [57] “Hc-05 bluetooth module.” [En línea]. Disponible: <https://components101.com/wireless/hc-05-bluetooth-module>

- [58] Z.CATALDI, “Análisis de la comunicación de radio frecuencia con módulos nRF24L01,” *Universidad Nacional De La Plata*, no. 54, p. 4, 2018.
- [59] “Ky-023 datasheet.” [En línea]. Disponible: <https://datasheetspdf.com/pdf/1402034/Joy-IT/KY-023/1>
- [60] “Oled-128o032d datasheet.” [En línea]. Disponible: <https://www.vishay.com/docs/37894/oled128o032dlpp3n00000.pdf>
- [61] “Sh1106 datasheet.” [En línea]. Disponible: https://www.velleman.eu/downloads/29/infosheets/sh1106_datasheet.pdf
- [62] “Ssd1306 datasheet.” [En línea]. Disponible: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
- [63] “Datasheet sensores ultrasónicos hc-sr04, us-016, gp2y0a710.” [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- [64] A. G.Mat y C.Abs, “Batería Sellada Fuli Battery,” pp. 10–12.
- [65] RTI, “User’s Manual EverPower,” Tech. Rep. 408, 2010.
- [66] “Regulador dc-dc datasheet.” [En línea]. Disponible: https://www.danomsk.ru/upload/iblock/a16/194111_9179b16da29375370456f70b028e404d.pdf
- [67] “Datasheet xl4015, lm2596.” [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>
- [68] K.Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 2013.
- [69] R. C.Dorf y R. H.Bishop, *Sistemas de control moderno.*, 2005, vol. 10 ed.
- [70] W.Bolton, *Ingeniería de control*, 2nd ed., ALFAOMEGA, Ed., Ciudad de México, 201, vol. 2.

- [71] H.Arévalo, "Evaluación de cinco variedades de arveja (*Pisum sativum*) bajo condiciones de invernadero en Tumbaco-Pichincha," Ph.D. dissertation, Universidad San Francisco de Quito, 2013.
- [72] M.Mera, "Arveja para grano inmaduro y grano seco," Tech. Rep.
- [73] C.Achig, "Diseño y construcción de un entrenador inteligente de la primera forma de taekwon-do (taeguk il jang)," Ph.D. dissertation, UIDE, 2015. [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.uide.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-search.pl>