

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**DISEÑO DE UN ROBOT MÓVIL DE DOS HILERAS PARA
TRASPLANTE DE PLÁNTULAS DE ARROZ EN SEMBRÍOS DE
LA COSTA NORTE PERUANA**

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTADA POR

Bach. SOSA NAVARRO, AGUSTIN ALEXANDER

Bach. PUCLLAS PALACIOS, MIGUEL ANGEL

Asesor: Dr. Ing. SOTELO VALER FREEDY

LIMA-PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, a mis padres por darme su apoyo incondicional, a mis hermanos por ser la inspiración a ser un mejor profesional y a mis sobrinos por ser la alegría y fortaleza en mi vida.

Dedico esta tesis a Dios, a mis padres por formarme como persona y profesional, a mis abuelos por su apoyo incondicional, a mi hermana por aconsejarme siempre y a mis tíos y tías por apoyarme siempre.

AGRADECIMIENTOS

Damos las gracias a Dios por brindarnos la vida y la salud para seguir adelante, a nuestra alma mater la Universidad Ricardo Palma, así como también a nuestros profesores de la carrera de Ingeniería Mecatrónica por darnos la guía no solo en la parte profesional sino personal y a nuestras familias por su apoyo durante todo este proceso.

ÍNDICE

CONTENIDO

RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción de la problemática	3
1.2 Formulación y delimitación del problema.....	4
1.3 Objetivo general y específicos.....	5
1.4 Alcances y limitaciones de la investigación	6
1.5 Justificación e importancia del estudio.....	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes.....	8
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2 Antecedentes Nacionales	9
2.2 Bases Teóricas	10
2.2.1 La Robótica.....	10
2.2.1.1 Estructura de un robot	11
2.2.1.2 Clasificación de los robots según su arquitectura	11
2.2.2 Los robots móviles.....	12
2.2.3 Estructura de un robot móvil.....	13
2.2.4 Estructura mecánica de un robot móvil.....	14
2.2.5 Estructura Electrónica-Eléctrica de un robot móvil.....	21
2.2.5.1 Tarjeta Electrónica	21
2.2.5.2 Software Proteus	22
2.2.5.3 Sensores	23
2.2.5.4 Módulo de desplazamiento y orientación.....	25
2.2.5.5 Motor eléctrico	26
2.2.5.6 Puente H.....	27
2.2.5.7 Potencia del motor DC	30
2.2.5.8 Batería	31
2.2.5.9 Capacidad de la batería	32
2.2.6 El arroz.....	32

2.2.6.1	Fisiología de la planta de arroz	33
2.2.6.2	Tipos de sembrado de arroz.....	33
2.2.6.3	Trasplantadora	36
2.2.7	Mecanismo de 4 barras	39
CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA		43
3.1	Diseño mecánico.....	43
3.1.1	Selección del material del almacén	43
3.1.2	Dimensionado de la estructura mecánica.....	45
3.1.3	Diseño de la estructura en SolidWorks	46
3.1.4	Masa total del robot móvil	46
3.1.5	Potencia requerida por los motores del robot móvil	48
3.1.6	Sistema Locomotor	49
3.1.7	Cohesión del suelo	54
3.1.8	Diseño del Sistema de trasplante	55
3.1.8.1	Diseño del mecanismo de 4 barras.....	56
3.1.8.2	Análisis Estructural del brazo de trasplantación.....	57
3.1.8.3	Diseño del sistema de trasplante en Solidworks	59
3.1.8.4	Diseño de la bandeja para plántulas	63
3.2	Diseño electrónico-eléctrico	65
3.2.1	Selección de motores	65
3.2.2	Selección del controlador del motor DC.....	66
3.2.3	Selección de la placa Arduino.....	69
3.2.4	Control de direccionamiento.....	70
3.2.5	Control de desplazamiento.....	71
3.3	Programación de la placa de control	73
3.3.1	Programación del sensor MPU6050	74
3.3.2	Programación para el desplazamiento.....	76
3.4	Diseño de la placa electrónica	80
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		81
4.1	Análisis de Resultados Sistema Mecánico	81
4.2	Demostración de funcionamiento del programa.....	83
CONCLUSIONES		85
RECOMENDACIONES.....		87
BIBLIOGRAFÍA		88

APÉNDICES	90
ANEXOS:	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales diferencias entre el desplazamiento con ruedas y orugas.	15
Tabla 2. Principales ventajas de las configuraciones de direccionamiento.	16
Tabla 3. Comandos más utilizados en el lenguaje Arduino.	22
Tabla 4. Ventajas y desventajas de diferentes tipos de baterías.....	32
Tabla 5. Principales ventajas y desventajas de trasplante mecanizado.	35
Tabla 6. Comparación de materiales según diversos criterios.....	44
Tabla 7. Estimación de pesos de los elementos de la trasplantadora.....	47
Tabla 8. Coeficiente de Rozamiento.....	48
Tabla 9. Cohesión de diversos tipos de suelo	55
Tabla 10. Consistencia de los suelos.	55
Tabla 11. Comparación de Motores	65
Tabla 12. Características del motor HYS A58SW-555B.....	66
Tabla 13. Ventajas y desventajas de diferentes configuraciones de puente H.	67
Tabla 14. Comparación entre diversos módulos de puente H.	68
Tabla 15. Comparación de modelos de la placa Arduino.	69
Tabla 16. Características del módulo MPU6050.....	71
Tabla 17. Cálculo del consumo eléctrico del sistema.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los robots según su arquitectura.	12
Figura 2. Tren de siembra convencional.....	13
Figura 3. Estructura de un robot móvil.....	13
Figura 4. Modelo de un robot móvil de 4 ruedas con direccionamiento diferencial.	14
Figura 5. Estudio Estático SolidWorks Simulation	18
Figura 6. Estudio de Pandeo SolidWorks Simulation.....	19
Figura 7. Simulación térmica en SolidWorks	20
Figura 8. Uso de SolidWorks Motion.....	20
Figura 9. Clasificación de los sensores en la robótica.	24
Figura 10. Diagrama de ejes de un Giroscopio.....	25
Figura 11. Partes de un encoder rotativo.	26
Figura 12. Esquema de un puente H en diferentes estados.....	27
Figura 13. Puente H con relés.....	28
Figura 14. Esquema de un puente H con transistores.	29
Figura 15. Diagrama de conexiones del circuito integrado L293B.	29
Figura 16. DCL de un sistema de cargas	30
Figura 17. Esquema de las diferentes fases y etapas del crecimiento y desarrollo de la planta de arroz.....	33
Figura 18. Trasplantadora mecanizada autopropulsada de 8 hileras.	35
Figura 19. Proceso de trasplante con un trasplantador manual.....	37
Figura 20. Trasplantadora del IIMA de 4 hileras.....	38
Figura 21. Vista lateral de la trasplantadora en su diseño preliminar.	38
Figura 22. Mecanismo típico de 4 barras.....	39
Figura 23. Movimiento descrito por un mecanismo de 4 barras.	39
Figura 24. Diagrama cinemático de un mecanismo de 4 barras.	40
Figura 25. Diseño de un mecanismo de 4 barras.	41
Figura 26. Curva realizada por la pinza del mecanismo.	42
Figura 27. Esquema de una maquina trasplantadora de arroz.	42

Figura 28. Espaciado entre hileras y plantas.....	45
Figura 29. Vista isométrica de la estructura del robot móvil trasplantador.....	46
Figura 30. Análisis de Propiedades Físicas del robot móvil.....	47
Figura 31. Sistema de Coordenadas del Neumático	50
Figura 32. Principales disposiciones de las bandas de Rodadura	53
Figura 33. Diseño del mecanismo de 4 barras para trasplante en Solidworks.....	56
Figura 34. Análisis Estático con respecto a Tensiones utilizando SolidWorks Simulation	58
Figura 35. Análisis Estático con respecto a Desplazamiento utilizando SolidWorks Simulation.....	59
Figura 36. Vista Isométrica del sistema de trasplante en SolidWorks.....	60
Figura 37. Vista Lateral del Sistema de Trasplante en SolidWorks.	61
Figura 38. Diseño del sistema de trasplante.	62
Figura 39. Análisis de Movimiento del Sistema de Trasplante con SolidWorks Motion.	62
Figura 40. Diseño de bandeja de plántulas en SolidWorks.	64
Figura 41. Análisis de movimiento del robot móvil.	64
Figura 42. Medidas del motor HYS.....	66
Figura 43. Diagrama de esquemático del módulo TB6612FNG	68
Figura 44. PWM de una señal de corriente continua.....	69
Figura 45. Diagrama de pines de la placa Arduino Mega	70
Figura 46. IDE Arduino.....	73
Figura 47. Declaración de librerías.....	74
Figura 48. Inicialización del sensor MPU6050.	75
Figura 49. Calibración del offset y activación del DMP.	75
Figura 50. Mostrando datos del MPU6050 en el monitor serial.....	76
Figura 51. Declaración de variables para el control de motores.....	76
Figura 52. Variables de posición del robot trasplantador.	77
Figura 53. Declaración de variables para el motor derecho.	78
Figura 54. Filtro promedio para el encoder derecho.....	79
Figura 55. Estimación de la posición actual del robot móvil.....	79
Figura 56. Diseño de la placa electrónica en Proteus 8.	80
Figura 57. Análisis de propiedades de AISI 304	81

Figura 58. Análisis de peso en la estructura del robot móvil.....	82
Figura 59. Estudio Cinemático del sistema de 4 barras	83
Figura 60. Funcionamiento de los motores DC e interrupciones de los encoder.	84

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el diseño de un robot móvil para trasplante de plántulas de arroz en la costa norte peruana.

Para el Diseño Mecánico con respecto a la elección del tipo de sistemas locomotor se basó en los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento y se eligió la banda de rodadura que cumpla con dichas especificaciones es por ello que se optó por el neumático R2 así mismo el sistema locomotor se basó en tracción diferencial de cuatro llantas, siendo las llantas traseras las que permiten el cambio de giro. Se realizó un estudio de la masa total del modelo para hallar la potencia necesaria para el avance y con ello se hizo la elección de los motores, además se diseñó el sistema de trasplante mediante un mecanismo de 4 barras.

Para el diseño eléctrico, se tuvo en cuenta el estudio de la masa total del modelo y la potencia hallada para la selección del motor adecuado para cada tarea, además se dimensionó las baterías según el voltaje y amperaje necesario para el funcionamiento autónomo de 1 h y 30 min, teniendo en cuenta el consumo constante de 3.85 A, necesitando una capacidad de 8Ah.

Para el diseño electrónico, se escogió la placa Arduino Mega y se programó la misma en su interfaz Arduino IDE, además se eligió el sensor MPU6050 para tener un control del sistema locomotor y este no se desvíe de su ruta.

Palabras Claves: Robot Móvil, Trasplante de arroz, 2 filas.

ABSTRACT

The objective of this research was the design of a mobile robot for transplanting rice seedlings in the northern Peruvian coast.

For the Mechanical Design regarding the choice of the type of locomotive systems, it was based on the parameters necessary for its correct operation and the tread that meets these specifications was chosen, which is why the R2 tire was chosen as well as the system. The locomotive was based on four-wheel differential traction, with the rear wheels allowing the change of turn. A study of the total mass of the model was carried out to find the necessary power for the advance and with this the choice of motors was made, in addition the transplant system was designed using a 4-bar mechanism.

For the electrical design, the study of the total mass of the model and the power found were taken into account for the selection of the appropriate motor for each task, in addition the batteries were sized according to the voltage and amperage necessary for autonomous operation of 1 h and 30 min, taking into account the constant consumption of 3.85 A, requiring a capacity of 8Ah.

For the electronic design, the Arduino Mega board was chosen and it was programmed in its Arduino IDE interface, in addition the MPU6050 sensor was chosen to control the locomotive system and it does not deviate from its path.

Key words: Mobile Robot, Rice transplant, 2 rows.

INTRODUCCIÓN

El arroz es el tercer alimento más consumido a nivel mundial con un promedio de 54,6 kilogramos por persona al año. Con una producción de 500,8 millones de toneladas, es la base económica de millones de habitantes en el mundo. China es el principal productor de arroz, con una producción de 209 millones de toneladas al año, por lo que este país desarrolla diferentes métodos de sembrado de este cereal, siendo el trasplante de plántulas el más eficiente de ellos. (FOA, “Seguimiento del mercado del arroz”)

En el 2017 la superficie cosechada de arroz cáscara ascendió a 422 434 ha, cantidad superior en 0,7% respecto al 2016 (419 563 ha), la cual permitió alcanzar una producción nacional de 3 millones 39 mil toneladas. La principal región productora de arroz cáscara en el 2017 fue San Martín con 27% de participación seguido de la región de Lambayeque (13%). (MINAGRI, “Arroz 2001-2017”)

La presente investigación realiza la descripción de las bases teóricas con las que se va a sustentar el diseño, para luego realizar un estudio para la elaboración de cada sistema que conforma el modelo a realizar, el diseño del sistema mecánico describe la elección del material de la estructura del robot, elección del sistema locomotor, elaboración de la estructura del robot móvil y sistema de trasplante en SolidWorks. El diseño del sistema Eléctrico basándose en el estudio de la masa total del modelo realiza el calculo de la potencia requerida para el avance y elige el motor para luego realizar el dimensionado de la batería con todos los elementos que necesitan ser energizados. En el sistema electrónico se realiza la elección de los drivers, sensores y la elaboración del circuito en el software proteus y la programación en Arduino. La presente investigación cuenta con cuatro capítulos:

Capítulo I: El primer capítulo hace una descripción del planteamiento del problema, formulación de las preguntas, los objetivos, alcances, limitaciones, justificación e importancia de la investigación.

Capítulo II: El segundo capítulo hace referencia al marco teórico, antecedentes nacionales e internacionales relacionados con la investigación, así como las bases teóricas que sustentan el desarrollo de la presente investigación.

Capítulo III: El tercer capítulo hace una descripción de los estudios realizados para la elaboración de los diseños que conforman el robot móvil, los cuales son el diseño del sistema mecánico, diseño del sistema eléctrico y diseño del sistema electrónico.

Capítulo IV: Finalizando la investigación, este capítulo hace referencia a las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema, el problema general y los problemas específicos, el objetivo general y objetivos específicos, la justificación, alcances y limitaciones de la investigación y su importancia.

1.1 Descripción de la problemática

El gran consumo y exportación de arroz en nuestro país hace que exista una gran cantidad de productores de este cereal, los cuales tienen algo en común, la escasa disponibilidad de mano de obra para el proceso de producción del arroz. El método de trasplante, que es el más utilizado por los agricultores para obtener el arroz, hace que se necesite amplia mano de obra ya que se cuenta con una fecha límite, que es del 01 al 31 de enero, para evitar problemas fitosanitarios durante la etapa de crecimiento, así que el trasplante tiene que ser rápido y eficiente.

Lambayeque es el departamento con mayor volumen de arroz pilado, produciendo 155,9 miles de toneladas (38.1% del total nacional), con un rendimiento de 8 toneladas por hectárea sembrada, muy por debajo de Arequipa, que a pesar de solo producir un 14.2% del total cuenta con un rendimiento de 13 toneladas por hectárea (Ministerio de Agricultura y riego MINAGRI, 2019), esto debido a diversos factores como la falta de inversión y desarrollo tecnológico.

En el sector económico, el sistema de trasplante de arroz enfrenta problemas frecuentes como la costosa mano de obra en las épocas de trasplante, ya que estos cultivos abarcan una extensa área de producción que requiere una gran cantidad de peones. Los constantes incrementos de los salarios de los trabajadores es el principal factor que afecta a los costos de producción, elevándose, y debido a esto las utilidades de los productores arroceros son bajas. El rendimiento de las siembras es otro factor que afecta negativamente a los productores. El rendimiento varía según diversos factores (cambios climatológicos, epidemias) pero principalmente es afectado debido a los daños que sufren las plántulas al realizarse el trasplante manual

Por otro lado, los trabajadores que laboran más frecuentemente en el trasplante son personas que generalmente pasan los 35 años, debido a que los jóvenes prefieren estudiar en vez de hacer trabajos agrícolas, Además de la escasa mano de obra, el fuerte desgaste físico que provoca el trasplante de arroz es un problema recurrente en los trabajadores, ya que el terreno por donde se deben movilizar es inundado en agua, lo que genera lodo y limita el movimiento por el área, la posición curva en la que deben mantenerse constantemente hace que también tengan dolores de espalda, jorobas y otros síntomas a todo esto se le agrega que se deben mantener largos periodos de tiempo bajo el sol.

Por estas razones se llevará a cabo el diseño de un robot móvil de dos hileras para el trasplante de plántulas de arroz en los sembríos de la costa norte peruana, con el fin de plantear una solución a los problemas mencionados anteriormente.

1.2 Formulación y delimitación del problema

a) Problema general

¿Cómo diseñar un robot móvil para trasplante de plántulas de arroz en dos hileras en sembríos de la costa norte peruana?

b) Problemas específicos

1. ¿Cómo diseñar un sistema mecánico capaz de moverse en el área de trabajo para trasplantar plántulas de arroz en los sembríos de la costa norte peruana?

2. ¿Cómo diseñar un sistema electrónico y eléctrico que logre suministrar suficiente energía eléctrica para alimentar todos los componentes de un robot móvil durante su tiempo de trabajo y para procesar todas las señales necesarias al trasplantar plántulas de arroz en los sembríos de la costa norte peruana?

3. ¿Cómo diseñar una programación para la placa de control del robot móvil para trasplantar plántulas de arroz eficientemente en los sembríos de la costa norte peruana?

1.3 Objetivo general y específicos

a) Objetivo general

Diseñar un robot móvil para trasplante de plántulas de arroz en dos hileras en sembríos de la costa peruana.

b) Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema mecánico capaz de moverse en el campo de trabajo para trasplantar plántulas de arroz en los sembríos de la costa norte peruana.
2. Diseñar un sistema electrónico y eléctrico que logre suministrar suficiente energía eléctrica para alimentar todos los componentes de un robot móvil durante su tiempo de trabajo y para procesar todas las señales necesarias al trasplantar plántulas de arroz en los sembríos de la costa norte peruana.
3. Diseñar una programación para la placa de control del robot móvil para trasplantar plántulas de arroz eficientemente en los sembríos de la costa norte peruana.

1.4 Alcances y limitaciones de la investigación

a) Alcances

La presente tesis abarcará el diseño de un robot móvil de dos hileras para el trasplante de plántulas de arroz en sembríos de la costa norte peruana. El robot contará con un sistema de trasplante de dos hileras, permitiendo plantar una cantidad aproximada de 4-6 plántulas por cada hilera, cada determinado espacio. Para un correcto trasplante, el robot contará con un sistema locomotor adecuado que le permita desplazarse en el terreno húmedo, además el sistema de trasplante estará basado en un mecanismo de 4 barras. Todo esto será controlado mediante programación, siguiendo una secuencia de funcionamiento.

Sus principales características son:

- Capacidad de desplazarse en el terreno húmedo.
- Un sistema eléctrico y electrónico para los diversos actuadores.
- Programación para el control de los demás sistemas.

b) Limitaciones

Debido a las características de contar con dos hileras del robot móvil, este no será capaz de realizar el trasplante en áreas mayores a 500 m^2 , debido a que el consumo eléctrico por horas aumentaría y también lo haría la cantidad de plántulas a transportar, lo que no mejoraría el rendimiento que se busca con este proyecto. Se debe tomar en cuenta, que, si el terreno no está correctamente preparado, es decir, sin nivelar o muy inundado, el robot móvil podría sufrir inconvenientes en su ruta de desplazamiento.

1.5 Justificación e importancia del estudio

a) Justificación económica

El diseño del presente proyecto implica el uso de diversos actuadores, con el fin de automatizar el trasplante, que realiza manualmente, de plántulas de arroz, pudiendo mejorar la producción y el rendimiento por hectárea plantada, teniendo en cuenta que estas son muy bajas en el norte del país, reduciendo el tiempo de trasplante y abarcando más área por hora, lo que llevará a mejorar los ingresos de los agricultores, promoviendo la plantación de esta semilla.

b) Justificación de salud ocupacional

El proyecto propone que el robot móvil tendrá un diseño que le permitirá desplazarse por la chacra, previamente preparada para el trasplante, sin ningún inconveniente y realizar el trasplante de la plántula de arroz satisfactoriamente, lo que permitirá reemplazar la mano de obra y así evitar las diferentes lesiones, en su mayoría lumbares, y las consecuencias por permanecer mucho tiempo en el agua en los agricultores al realizar este procedimiento.

Importancia del estudio

La importancia del estudio para realizar el diseño de un robot móvil de dos hileras para trasplante de plántulas de arroz se va a centrar en el mejorar el proceso de trasplante, disminuyendo parcialmente el trabajo humano en el proceso, con lo cual disminuirá la inversión económica en personal para trasplante, reducirá las dolencias sufridas por los operadores al estar expuesto al campo de trabajo y la mala postura en la que trabajan para dicha actividad.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla los antecedentes internacionales y nacionales relacionados con la investigación, así como las bases teóricas necesarias para su correcto desarrollo.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

- Gavilanes, Chipantiza (2016). En su tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, titulada “Diseño de una trasplantadora de arroz para la provincia de Los Ríos en la ciudad de Vinces”. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil, Ecuador. Se presenta el proyecto en el cual se diseña una trasplantadora de arroz con el propósito de disminuir el tiempo de trasplante y el costo de la mano de obra. En dicha investigación se diseñó el sistema de trasplante utilizando un mecanismo de 4 barras y se realizó un estudio cinemático del mecanismo, así como la simulación del movimiento en el software FOURBAR. Se concluyó que las barras del sistema de trasplante deben tener las medidas de 112.36mm, 48mm, 125mm y 175mm. También se seleccionó un motor HONDA-GX160 de 3,6kW y 3600RPM que da movimiento a toda la trasplantadora mediante transmisión por bandas.
- Álvarez. (2011). En su trabajo para obtener el grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnológicas de Producción, titulada “Manual técnico del sistema de siembra de trasplante mecanizado del cultivo de arroz (*Oryza sativa*). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Facultad Agroforestal. Cartago, Costa Rica. Se presenta el proyecto que comprende el trasplante mecanizado de arroz de manera integral utilizando un enfoque de sistema con un objetivo común y el proceso de elaboración de semillero su función es igual del tipo o marca de la maquina trasplantadora de arroz.

- Castro. (2016). En su trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico titulado “Diseño, simulación, estudio de factibilidad de un robot sembrador de maíz por surcos”. Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador. Se presenta el proyecto de diseñar, simular y estudiar la factibilidad de un robot sembrador de maíz para lo cual se estudió el estado actual de los robots en la agricultura, se procedió a realizar el diseño general en base a las necesidades específicas y finalmente se estudió la factibilidad el cual indica la ganancia a tener para que el proyecto sea cubierto al 100%. Con este estudio se pudo concluir que para evitar el enterramiento y patinaje del robot en su trayectoria por los surcos debe contar un sistema motriz de tracción total a las 4 ruedas, velocidad 4 cm/s y llantas de 12 cm de diámetro.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

- Ortiz. (2016). En su tesis para obtener el título de Ingeniero Agrícola, titulada “Comparación técnico-económico del trasplante tradicional vs el trasplante en hileras de arroz (*Oryza sativa* L.) en Bellavista- San Martín”. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola. Lima, Perú. Presenta una investigación de la comparación de los métodos de trasplante tradicional y trasplante en hileras sobre el crecimiento y producción del cultivo de arroz. En su investigación se concluyó que en el sistema de trasplante tradicional se obtuvo un rendimiento de 7,255 kg/ha y en el trasplante en hileras se alcanzó 8,799 kg/ha con el tratamiento de 30x30
- Alegría (2015). En la tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial y de Sistemas, titulada “Implementación de tecnología y reducción de

costos en la producción agrícola de arroz”. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú. Presenta una investigación con el fin del diagnóstico técnico-económico del cultivo de arroz, propuestas de mejora para cada etapa del cultivo y eficiencia en el uso de recursos. Se concluyó que la implementación de la maquina trasplantadora de arroz reduce el tiempo de operaciones en 36%, se logró un ahorro en 69.4% permitiendo una utilidad neta de S/. 189.55 por hectárea. Se recomienda utilizar técnicas de nivelación láser, gestionar correctamente el riego, así como una nueva técnica para la preparación del almacigo.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 La Robótica

El término robot proviene del término eslavo “robota” y fue acuñado por el escritor checo Karel Capek en 1921 (Barrientos,1997). Sanz (2006) dice sobre el origen de la robótica:

Aunque los antecedentes de la robótica se remontan muy atrás en el tiempo, Grecia clásica e incluso antes, su verdadero motor de desarrollo no llega hasta la aparición de los microprocesadores, que en definitiva acabarán constituyendo su cerebro, ya en la década de los setenta. (p.3)

La robótica es una ciencia que estudia el diseño e implementación de máquinas capaces de realizar labores humanas o que necesiten cierto nivel de inteligencia para ser cumplidas. Esta utiliza diversas disciplinas como la mecánica, electrónica, informática.

Según La Asociación de Robots Japonesa (JIRA) existen 6 clases de robots según su inteligencia: Dispositivos manuales, robots de secuencia arreglada, robots de secuencia variable, robots generadores, robots de control numérico y robots inteligentes.

2.2.1.1 Estructura de un robot

Un robot está conformado por los siguientes elementos: estructura mecánica, sistema de transmisión, actuadores, sensores y su controlador. Este último es el “cerebro” del robot, el que lo dota de inteligencia y capacidad de realizar diversas tareas.

Mecánicamente, un robot no dista mucho de la anatomía del cuerpo humano, cuenta con un cerebro, sensores que se asemejan a los sentidos del humano (vista, tacto), motores que vendrían a ser los músculos y la energía eléctrica que da vida al robot en sí, como hace lo hace la sangre.

2.2.1.2 Clasificación de los robots según su arquitectura

La arquitectura de un robot está definida por el tipo de configuración morfológica de este. Con base a este criterio tenemos los siguientes tipos de robots: poli articulados, Móviles, Androides, Zoomórficos e Híbridos, como se muestra en la figura 2.



Figura 1. Clasificación de los robots según su arquitectura.

Fuente: Ivone Estrada, Universidad Autónoma del Estado de México.

2.2.2 Los robots móviles

Los robots móviles son aquellos que tienen un sistema locomotor el cual le permite desplazarse por determinada área, estos pueden ser aéreos, terrestres o acuáticos. Bambino (2008) los define. “Los robots móviles son dispositivos de transporte automático, es decir, una plataforma mecánica dotada de un sistema de locomoción capaz de navegar a través de un determinado ambiente de trabajo, dotado de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento portando cargas” (p.4)

Estos robots son utilizados en diversas áreas como la industria, almacenes, fábricas, limpieza del hogar y, en la agricultura, para el sembrado, como se muestra en la figura 3, arado, trasplante, cosecha y control de plagas.

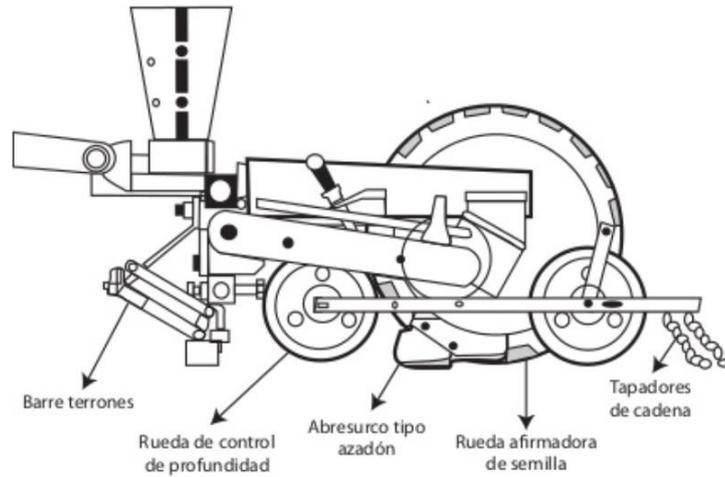


Figura 2. Tren de siembra convencional
 Fuente: UNIMINUTO-IEVD, (2008)

2.2.3 Estructura de un robot móvil

La estructura del robot móvil se divide en 3, como se muestra en la figura 4, que son: los actuadores, sensores internos y externos y el sistema de control del robot. Cada parte engloba los diseños necesarios para el correcto funcionamiento del robot móvil.

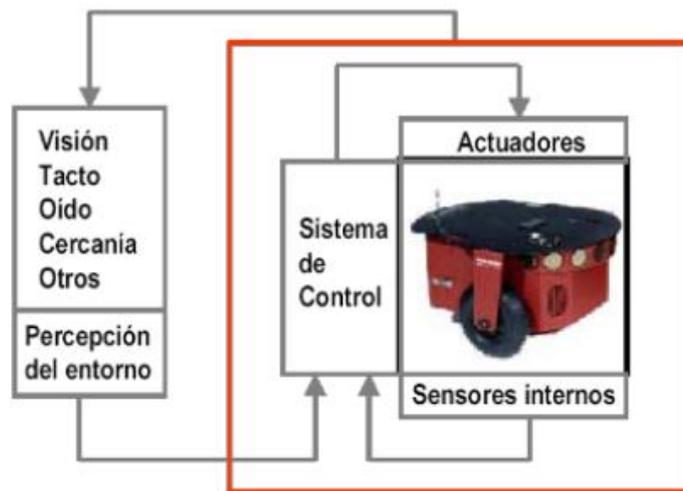


Figura 3. Estructura de un robot móvil
 Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Estructura mecánica de un robot móvil

La estructura mecánica del robot móvil se basa en los siguientes fundamentos: tracción, direccionamiento, dimensiones del chasis. (Madsen & Jakobsen, 2001), también se debe tomar en cuenta el sistema locomotor, el actuador final y el material adecuado según las especificaciones climáticas.

Tracción

La tracción dependerá del tipo de direccionamiento que se use, pudiendo ser:

- Front Wheel Drive (FWD) o tracción delantera
- Rear Wheel Drive (RWD) o tracción trasera
- 4 Wheel Drive (4WD) o tracción en todas las ruedas

En la figura 4 se muestra el modelo de un robot móvil de 4 ruedas con direccionamiento diferencial y tracción en todas las ruedas.

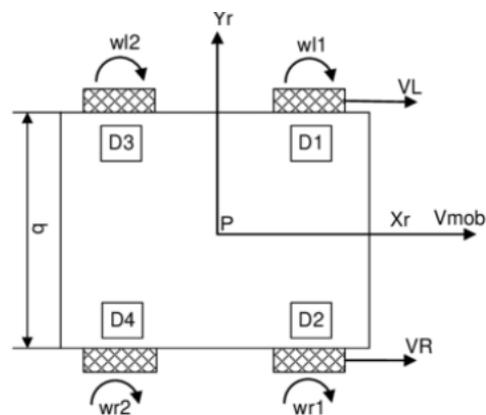


Figura 4. Modelo de un robot móvil de 4 ruedas con direccionamiento diferencial.

Fuente: Mokhov, Kruglova, Shaykhutdinov.(2018). Enfoque óptimo de planificación de procesos tecnológicos basado en el estado de los sistemas mecatrónicos

Donde:

- $w1$ y $w2$ = giro de las llantas izquierdas
- $wr1$ y $wr2$ = giro de las llantas derechas
- V_{mob} = velocidad del robot móvil

- VL y VR=Velocidad en las llantas izquierdas y llantas derechas respectivamente
- b= ancho del robot móvil
- p= punto medio del robot móvil.

Sistema locomotor

El sistema locomotor de un robot móvil dependerá del terreno en el cual deba desplazarse. Entre los métodos de locomoción de los robots móviles terrestres están el desplazamiento por ruedas y por orugas.

Las principales diferencias de ellas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales diferencias entre el desplazamiento con ruedas y orugas.

Ruedas	Orugas
Mayor velocidad	Peso mejor distribuido
Mejor capacidad de giro	Mayor tracción
Posibilidad de nivelación	Mejor maniobrabilidad en terrenos accidentados

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de rueda también es importante para una correcta movilización en el terreno. En la agricultura se utilizan dos tipos de ruedas, las llantas tipo tractor y las fangueadoras, ya que estas evitan el deslizamiento en el terreno.

Direccionamiento de un robot móvil

Según el direccionamiento que tenga el robot móvil, este girará mejor, tendrá mejor estabilidad o control. Los direccionamientos más utilizados son diferencia, Ackerman y síncrono.

El modelo diferencial consta de dos llantas sobre un mismo eje cada una controlada independientemente y al menos una rueda loca, en el modelo Ackerman todas las llantas son controladas por separado mientras que en el síncrono, las llantas omnidireccionales están sincronizadas y se controlan con dos motores, uno para el giro y otro para el avance. En la Tabla 2 podemos ver las ventajas de cada uno.

Tabla 2. Principales ventajas de las configuraciones de direccionamiento.

Diferencial	Ackerman	Síncrono
Permite girar sobre sí mismo	Fácil de implementar	Permite giros y desplazamientos complicados
No hay deslizamientos	Control simple	Desplazamiento recto no seguro

Fuente: Elaboración propia.

Diseño Mecánico en Solidworks

El diseño y ensamble de la estructura del robot móvil y otros componentes se va hacer por medio del software llamado Solidworks en el cual se puede realizar el diseño de las piezas de forma independiente en las 3 dimensiones para luego hacer el ensamble, el software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo de piezas, además que ofrece aparte de diseño y ensamble las posibilidades de simular y gestionar los datos del proceso de diseño. La solución de SOLIDWORKS incluye cinco líneas de productos diferentes:

- Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes.
- Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.

- Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que el mejor posible.
- Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida
- Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.

Finalmente, todas estas herramientas están respaldadas por SolidWorks PDM para gestionar y controlar de forma segura los datos mediante una única fuente de datos reales de sus diseños y SOLIDWORKS Manage, una herramienta que gestiona los procesos y proyectos implicados en todo el desarrollo del producto y está conectado al proceso de diseño.

Esta herramienta permite también la posibilidad de la simulación por medio de SolidWorks Simulation la cual ayuda a reducir la inversión y tiempo en la elaboración del diseño de piezas, con la ayuda de esta herramienta se puede probar las piezas sin necesidad de fabricarlas y hacer las pruebas en campo.

Análisis del sistema con SolidWorks Motion

Para hablar de esta herramienta brindada por SolidWorks en primer lugar tenemos que tener muy claro el significado de la palabra simulación que significa fingir una acción en un software cuando realmente no se está haciendo para comprobar las hipótesis elaboradas antes de la simulación y para hacer un estudio y análisis del comportamiento del sujeto o pieza en simulación en un entorno determinado por el usuario. La simulación es utilizada en varios sectores como el aeronáutico, espacial, medicina u otros, debido a que quita el riesgo de probar algún elemento en la vida real quitando el daño a seres humanos y máquinas, al ser su aplicación demasiado amplia hay varios softwares que brindan esta herramienta de simulación y uno de ellos es el software SolidWorks Premium que gracias a la extensión Motion

es posible hacer simulaciones y realizar estudios de las piezas. Los estudios más realizados con SolidWorks Simulation son:

- Estudios Estáticos

Los estudios estáticos en los modelos realizados en SolidWorks son realizados con la herramienta Simulation y es con esta con la cual se elige las entradas que tendrá el estudio, como qué tipo de sujeción se elegirá y donde será colocada, que tipo de carga externa se ingresará y el valor determinado para crear la malla y ejecutarla, con esto se calculan desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y la distribución del factor de seguridad. El modelo elaborado mostrará fallos en las partes donde las tensiones excedan el nivel que pueda soportar, como se muestra en la figura 5. Estos estudios ayudan a evitar los fallos que son provocados por someter al modelo a tensiones que superan el factor de seguridad y así conocer la capacidad del modelo con el material elegido. (Ruiz, 2020)

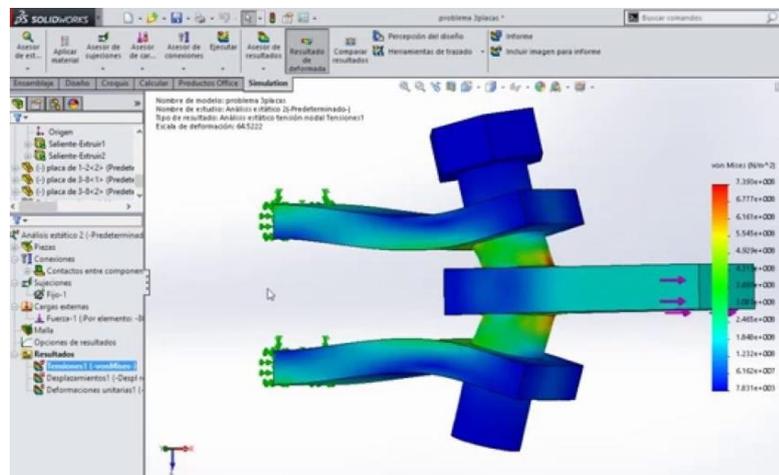


Figura 5. Estudio Estático SolidWorks Simulation

Fuente: Origen CAD/CAM. (2020). Tipos de estudio de SolidWorks Simulation.

- Estudio de Pandeo

Es pandeo es un fenómeno que es muy común en los cuerpos que están sometidos a fuerzas axiales constantemente, el pandeo se logra visualizar por el desplazamiento transversal significativos que van en la dirección

principal de compresión. SolidWorks Simulation cuenta con la herramienta para realizar el estudio de pandeo para nuevamente visualizar el comportamiento del modelo sometido a las cargas axiales determinadas por el usuario, el análisis de pandeo trabaja de forma similar al estudio estático ya que se tienen que ingresar las entradas de sujeciones, conexiones y el tipo de cargas externa. (DS, 2019)

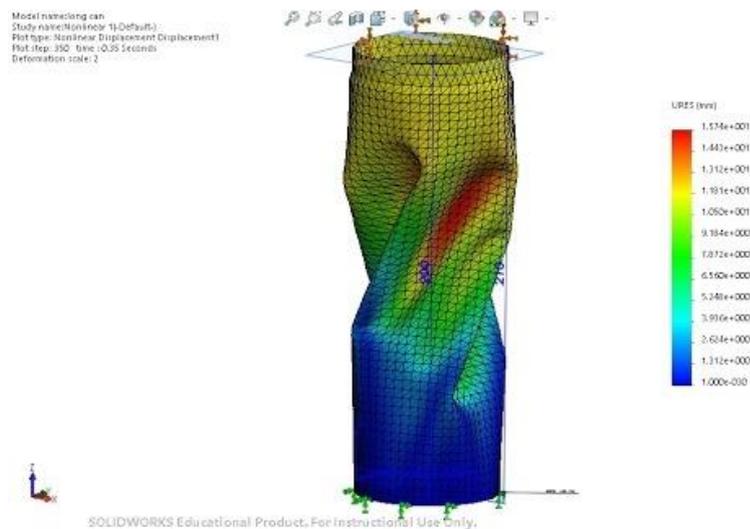


Figura 6. Estudio de Pandeo SolidWorks Simulation

Fuente: Origen CAD/CAM. (2020).

- Estudio Térmico

El estudio térmico sobre los modelos realizados es para predecir el comportamiento de la temperatura sobre estos, calculan temperaturas, gradientes de temperatura, flujo de calor y condiciones de conducción, convección y radiación. En la figura 7, se muestra el estudio térmico de una pieza en SolidWorks.

Este estudio ayuda a evitar las condiciones térmicas no deseadas en los modelos elaborados, tales como el sobre calentamiento o la fusión de las piezas. (Ruiz, 2020)

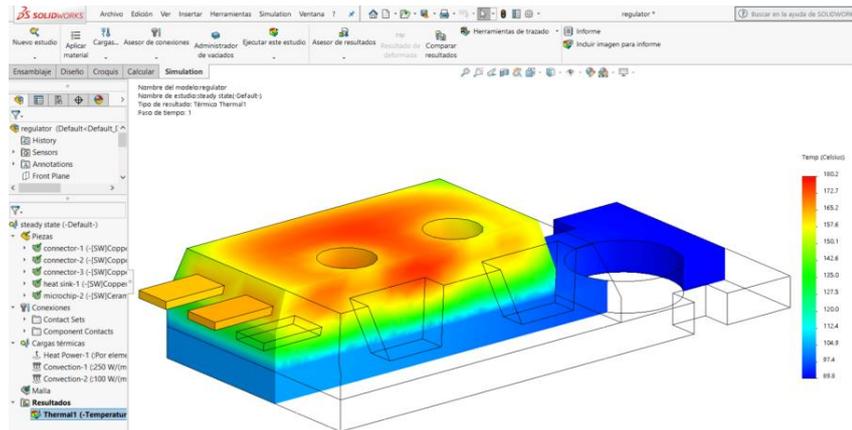


Figura 7. Simulación térmica en SolidWorks

Fuente: Origen CAD/CAM (2020)

SolidWorks Motion realiza simulaciones visuales para modelos ensamblados y dando la capacidad de elegir el material de las piezas y con tablas de especificaciones de cada material para poder elegir el modelo que cumpla con los requisitos que supone el modelo en estudio, tiene la capacidad de realizar análisis a sistemas móviles y dinámicos, se puede elegir el tipo de movimiento que se va a realizar ya sea de motores, gravedad, resorte u otros, y se podrá poner entradas para dimensionar el análisis de movimiento que pueden ser la función, la velocidad, la dirección del movimiento que darán algunas salidas como desplazamiento, trayectoria, fuerzas de reacción u otros, dependiendo del tipo de análisis que se requiere realizar.

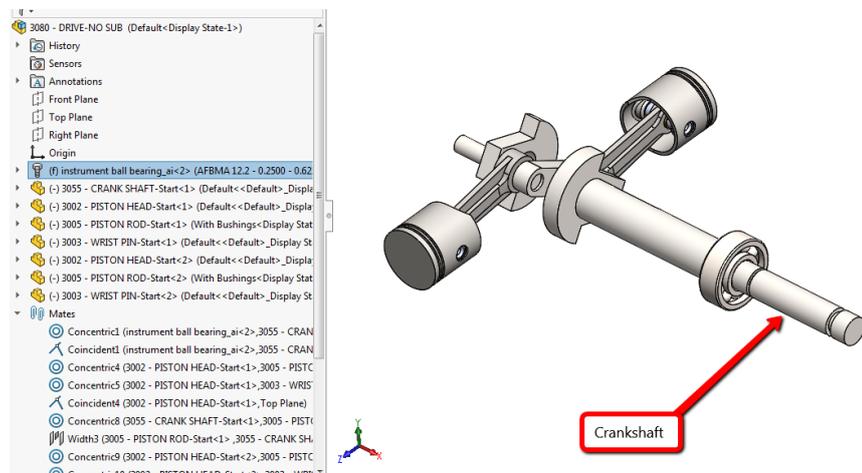


Figura 8. Uso de SolidWorks Motion

Fuente: HAWK RIDGE SYSTEMS. (2020). SIMULACIÓN DE SOLIDWORKS: INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE MOVIMIENTO

2.2.5 Estructura Electrónica-Eléctrica de un robot móvil

Para la estructura electrónica-eléctrica se debe tener en cuenta los sensores que utilizará el robot móvil, los motores que permitirán el desplazamiento y sus respectivos controladores, así como la capacidad de la fuente de energía.

2.2.5.1 Tarjeta Electrónica

Son dispositivos electrónicos encargados de procesar las ordenes de control que le damos por medio de una programación sencilla y permite incorporar otros dispositivos para realizar un conjunto de actividades que buscan transformar entradas en salidas para la realización de un proceso. Es el cerebro del sistema y su función es recibir la información del campo de trabajo que será recaudado por los sensores, esta información será procesada y según la programación establecida por el usuario va a mandar las señales a los actuadores para realizar un conjunto de actividades que serán necesarias para la realización de proceso específico. (Kokay, 2017)

Arduino

Es una placa de circuito impreso (“Printed Circuit Board” o PCB) que cuenta con las conexiones eléctricas que necesita el microcontrolador para un fácil uso. Gracias a su bajo costo y su versatilidad es una placa muy utilizada, contando con diferentes modelos y módulos, así como librerías desarrolladas por los usuarios.

Esta placa también cuenta con su propio entorno de desarrollo integrado (“Integrated Development Environment” o IDE) donde se escribe y carga los programas a las placas compatibles. Esta plataforma se programa en un lenguaje propio similar al lenguaje de programación C++. En la tabla 3 se muestra algunos de los comandos más utilizados.

Tabla 3. Comandos más utilizados en el lenguaje Arduino.

Tipo	Comando	Descripción
Funciones	pinMode()	Configura el pin como entrada o salida
	delay(ms)	Pausa el programa por un determinado tiempo (milisegundos)
	Serial	Permite la comunicación entre la placa y la PC u otro dispositivo
Variable	int	Define la variable como entero
	int(x)	Convierte el valor en variable entera
	const	Define la variable a un valor constante
Sketch	Setup()	Parte del programa donde se inicializa las variables y librerías.
	Loop()	Parte principal del programa, se repite consecutivamente.
	if(condicion)...else	Si la condición se cumple se ejecutará esa parte del programa.

Fuente: Elaboración propia

2.2.5.2 Software Proteus

Proteus es un software muy utilizado en el mundo de los circuitos electrónicos que cuenta con una gran variedad de componentes y con diferentes microcontroladores, este software ayuda en la elaboración de proyectos electrónicos ya sea en el diseño del esquema electrónico, simulación de todo el circuito, corrección de errores y hasta la elaboración del circuito impreso en una placa PCB. Proteus cuenta con cuatro elementos que está perfectamente integrados entre sí:

- ISIS: una avanzada herramienta para el diseño de esquemas electrónicos, que integra con una librería de más de 6.000 modelos de dispositivos digitales y analógicos.
- ARES: es el encargado de la construcción de placas electrónicas impresas que cuenta con una ayuda el cual es el posicionador automático de elementos y generación automática de pistas, que permite el uso de hasta 16 capas, ya no hay la necesidad que el

diseñador cargue con toda la tarea de dar la ubicación a cada componente, sino que el software te ayuda y facilita el trabajo al diseñador.

- PROSPICE: es la herramienta del software encargado de la simulación de los circuitos electrónicos.
- VSM: (Virtual System Modelling) es la herramienta que sirve de interface con la simulación del circuito y el comportamiento de algunos microcontroladores del mercado, ya que tiene la capacidad de leer los ficheros con el código ensamblado y realizar la simulación del comportamiento del microcontrolador. (Arrivillagga, 2020)

2.2.5.3 Sensores

Los sensores son dispositivos capaces de transformar una magnitud física o química a una magnitud eléctrica para ser medidos.

Los sensores en los robots móviles son lo que les dan la capacidad de comunicarse con su entorno de trabajo lo que le va a permitir desplazarse de forma autónoma y habitualmente se utilizan varios sensores que se complementen. (Bambino, 2008)

En la figura 9 se muestra la clasificación de los sensores en la robótica.

Sensores en Robótica	Según el medio relativo al robot	Propioceptivos
		Exteroceptivos
	Según el tipo de interacción robot-objeto	Contacto
		No contacto
	Según el tipo de información	Elementales
		Complejos
	Según el principio de funcionamiento	Carga eléctrica
		Radiación luminosa
		Resistencia
		Inductancia
		Capacitancia
		Radiación térmica
Otros		

Figura 9. Clasificación de los sensores en la robótica.

Fuente: Bambino. (2008). Una introducción a los robots móviles.

Descriptores estáticos

Cuando el comportamiento de un sensor es en régimen permanente, se puede definir este comportamiento mediante descriptores estáticos. (Bambino,2008)

Los principales de estos son:

- Rango: valores mínimos y máximos de las variables de entrada y salida del sensor. (Bambino,2008)
- Exactitud: es la proximidad del resultado medido al resultado verdadero.
- Precisión: es la capacidad de dar un mismo resultado en diferentes mediciones.
- Error: es la diferencia entre el valor real y el medido por el sensor. (Bambino,2008)

2.2.5.4 Módulo de desplazamiento y orientación

La orientación en la que se desplazará el robot trasplantador es un factor importante ya que el orden al momento de trasplante es uno de los parámetros que más se tendrá en cuenta, para realizar esta tarea es necesario tener un módulo que sea capaz de controlar la dirección de desplazamiento además de poder hallar que distancia se ha desplazado.

Giroscopio

Es un dispositivo electrónico que es capaz de medir el movimiento de rotación en los tres ejes “X”, “Y” y “Z”, son utilizados en algunos dispositivos que tienden a girar respecto a los 3 ejes, como aeronaves, celulares u otros. Mediante la detección de los cambios de orientación en los respectivos ejes se puede saber la dirección en la que se encuentra el dispositivo ya que los giroscopios solo miden la velocidad angular la cual es medida en grados por segundo. (Electronica, 2020). En la figura 10 se muestra un giroscopio ITG-3200 con los ejes de giro.

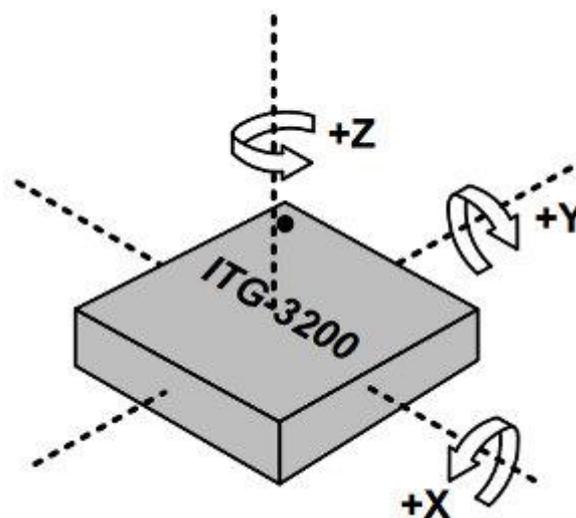


Figura 10. Diagrama de ejes de un Giroscopio.

Fuente: Electrónica. (2020). Introducción al giroscopio

Encoder

El encoder es un transductor rotativo capaz de indicar la posición angular de un eje, velocidad y aceleración del rotor de un motor mediante señales eléctricas. (Ingeniería Mecafenix,2017).

El encoder consta de un disco, con partes transparentes y otras opacas, unido a un eje giratorio. Las partes opacas bloquean la luz emitida por un emisor infrarrojo, haciendo que a medida que el eje rota, la luz sea recibida por el receptor solo en las partes transparentes, dando la posibilidad de conocer su posición y la velocidad de giro. En la figura 11 se muestra las partes del encoder ya mencionadas.

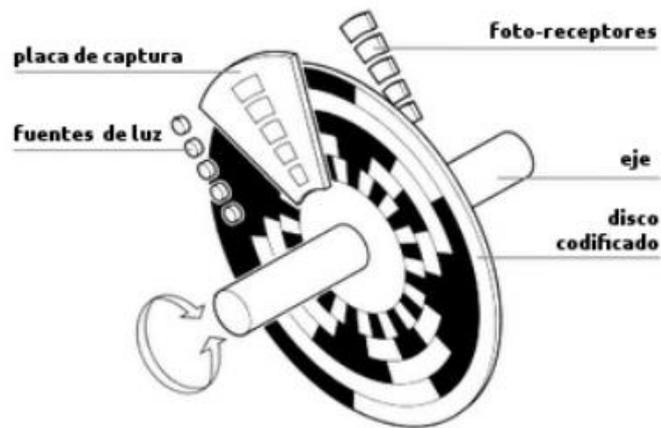


Figura 11. Partes de un encoder rotativo.

Fuente: Ingeniería Mecafenix. (2017). Encoder ¿Cómo funciona? Y sus tipos

2.2.5.5 Motor eléctrico

Un motor es una maquina capaz de convertir la energía eléctrica en movimiento. El funcionamiento de todo motor se basa en generar campos magnéticos, con la energía eléctrica, opuestos entre sí, consiguiendo que el rotor gire. Se mide en revoluciones por minuto (RPM) y caballos de fuerza (HP).

Existen dos tipos de motores eléctricos: de corriente continua (DC) y de corriente alterna (AC). Estos motores eléctricos serán controlados mediante un dispositivo electrónico llamado driver.

2.2.5.6 Puente H

Un puente H es un circuito electrónico que permite el control de un motor eléctrico de corriente continua. Con este circuito se puede cambiar el sentido de giro del motor al cambiar la polaridad del mismo.

El funcionamiento de un puente h se basa en accionar dos de sus 4 interruptores para que la corriente pase a través del motor DC haciéndolo girar en un sentido. En la figura 12 se muestra dos diagramas de un puente H con interruptores en diferentes estados, en el diagrama de la izquierda, cuando S2 y S3 están cerrados, el motor girará en un sentido, mientras que, en el otro diagrama, cuando S1 y S4 están cerrados, girará en el sentido contrario.

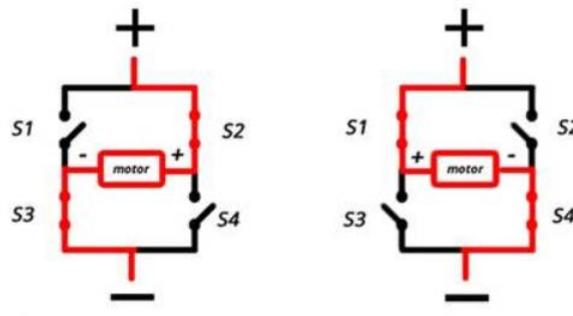


Figura 12. Esquema de un puente H en diferentes estados.

Fuente: Sánchez (2018). Control de Motores con Arduino.

Tipos de puente H

Según el tipo del elemento de potencia, el esquema del puente H varia, así como donde será usado.

Puente H con relés

Con esta configuración se tiene el circuito de control aislado del motor lo que permite controlar voltajes altos, e incluso se puede separar los circuitos de alimentación del motor, haciendo que una fuente eléctrica alimente al motor cuando gira hacia un sentido, y otra totalmente diferente lo haga cuando gira hacia el sentido contrario.

En la figura 13 se tiene el esquema de un puente H completo con relés, en donde el pulsador 1 acciona los relés RL1 y RL4, haciendo que el motor gire en sentido horario, mientras que el pulsador 2 acciona los relés RL2 y RL3, con lo que el motor girara en sentido antihorario.

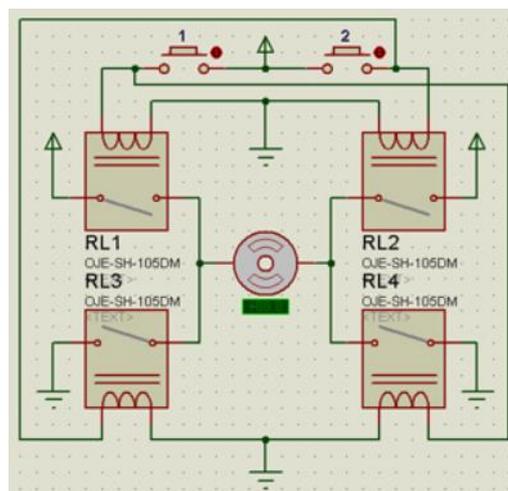


Figura 13. Puente H con relés

Fuente: Briceño (s.f.). Controlar motores de corriente continua con puente H.

Puente H con transistores

El esquema de un puente h con transistores es un poco más complejo ya que los transistores son componentes electrónicos. En la figura 14 se presenta el esquema de un puente H con transistores (Q1, Q2, Q3, Q4) y diodos (D1, D2, D3, D4), donde SW1 es el switch que permite cambiar el giro del motor, además que el motor está alimentado por una fuente diferente al que acciona los transistores.

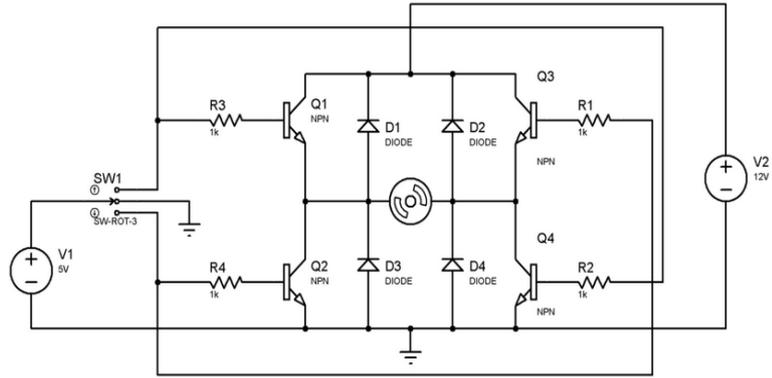


Figura 14. Esquema de un puente H con transistores.

Fuente: García (2013). El puente H: Inviertiendo el sentido de giro de un motor con Arduino.

Circuito integrado

Un circuito integrado como L293 o L298 permiten el control de dos motores DC en simultaneo y simplifica las conexiones necesarias para el control del motor. En la figura 15, el esquema muestra los diagramas de conexiones del circuito integrado L293B, en donde el motor1 va conectado en los pines 3 y 6, el motor2, en los pines 11 y 14, y los pines 1,2,7,9,10,15 se conecta la señal que controlaran dichos motores.

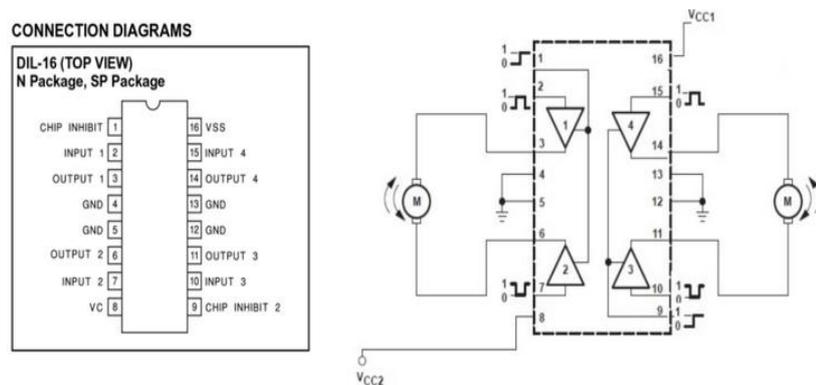


Figura 15. Diagrama de conexiones del circuito integrado L293B.

Fuente: Ingeniería Mecafenix (2017). Puente H para control de motores.

2.2.5.7 Potencia del motor DC

Para poder hallar la potencia que necesita el motor DC se requiere los siguientes datos: peso total del robot (m), velocidad del robot (v), coeficiente de fricción (μ) y ángulo de elevación respecto al suelo (θ)

En la figura 16 se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) de un sistema de cargas de un robot móvil, con lo que se podrá hallar las ecuaciones necesarias para calcular la potencia del motor.

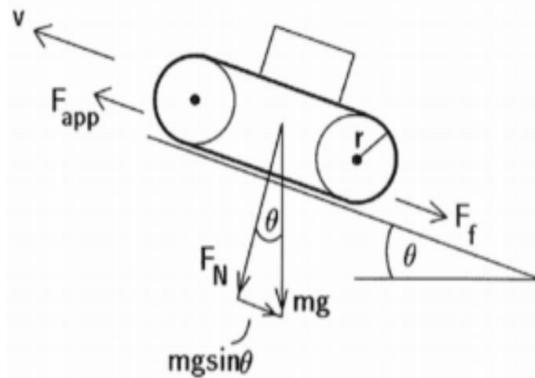


Figura 16. DCL de un sistema de cargas

Fuente: Moyolema, Pereira. (2014). Diseño, construcción e implementación de un prototipo.

$$F_{app} = F_f + m * g * \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

$$F_{app} = (F_n * \mu) + m * g * \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

$$F_{app} = (m * g * \text{cos}(\theta)) + (m * g * \text{sen}(\theta)) \quad (3)$$

$$F_{app} = m * g * ((\text{cos}(\theta) * \mu + \text{sen}(\theta))) \quad (4)$$

Para calcular la potencia del motor debemos reemplazar la ecuación 4 en la ecuación 5.

$$P(W) = F_{app} * v \quad (5)$$

Donde:

m = Peso total del robot en Kg.

v = Velocidad del robot en m/s.

μ = Coeficiente de fricción

θ = ángulo de elevación respecto al suelo en grados.

P = Potencia del motor en Vatios

F_{app} = Fuerza necesaria para mover el robot

2.2.5.8 Batería

Puesto que la principal característica de un robot móvil es el desplazarse libremente por diferentes terrenos es casi imposible alimentarlo directamente de un enchufe por lo que será necesario el uso de baterías.

Una batería es un dispositivo que almacena energía eléctrica para luego suministrarla casi por completo, pudiendo repetir este ciclo un determinado número de veces.

En la Tabla 4 se menciona los tipos de baterías más usadas y sus ventajas y desventajas.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de diferentes tipos de baterías

	Plomo-ácido	Pila alcalina	Níquel-Hierro	Níquel-Cadmio	Li-ion	Litio
Ventaja	Bajo Costo	Facil de usar y económicas	Larga vida útil	Gran rango de temperatura de funcionamiento	Alta densidad de energía	Descarga lineal
Desventaja	Baja densidad de energía	Contaminantes	Altamente costosa	Densidad de energía baja	Número limitado de cargas	Se pueden sobrecalentar

Fuente: Fuente propia.

2.2.5.9 Capacidad de la batería

Para determinar la autonomía de las baterías es necesarios saber cuánto tiempo deben trabajar el sistema y cuanta corriente va a consumir.

Se debe considerar un factor de seguridad del 25% más a la corriente calculada del sistema, teniendo en cuenta al realizar esto el no elevar mucho el costo, podemos ilustrarlo de la siguiente forma:

$$C = 1.25 * I * t \quad (6)$$

Donde:

C= Capacidad de la batería en amperios-hora.

I = Es la corriente total que consume el sistema en Amperios.

t = Tiempo total en funcionamiento en horas.

2.2.6 El arroz

El arroz es un cereal importante para la alimentación mundial, considerándose un alimento básico en muchos países de Asia y América Latina. En la actualidad, un tercio de la población mundial consume el arroz como alimento principal, por sus excelentes propiedades nutricionales tanto

en vitaminas como en sales minerales, los cuales son elementos esenciales de la dieta del ser humano.

2.2.6.1 Fisiología de la planta de arroz

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que comprende el ciclo completo desde su germinación hasta la madurez del grano. Su ciclo consta de tres fases: fase vegetativa, fase reproductiva y fase de la maduración, las cuales se muestran en la figura 17.

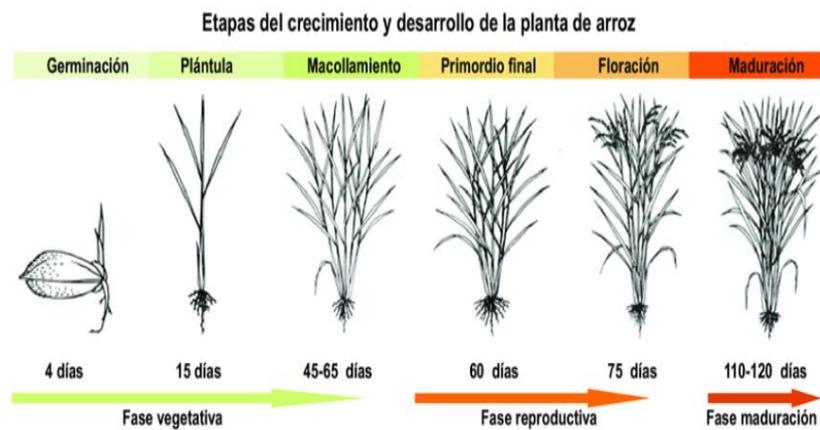


Figura 17. Esquema de las diferentes fases y etapas del crecimiento y desarrollo de la planta de arroz

Fuente: Quirós, McIntire. 2005. Innovación tecnológica para el manejo integrado del cultivo de arroz en Panamá

2.2.6.2 Tipos de sembrado de arroz

Existen dos tipos de siembra: directa e indirecta, cada una con su beneficio y desventajas.

Siembra directa. - En este método se coloca la semilla en la tierra de forma definitiva, esto quiere decir hasta su cosecha. Es una técnica totalmente ecológica que mediante el uso de poca maquinaria intenta hacer que los cultivos solo necesitan de la naturaleza para su desarrollo aprovechando de esta manera el total de los recursos naturales que está provee. Dentro de este método existen tres técnicas: al voleo, siembra en surco y siembra espaciada.

En el caso de los cereales, es muy común el método del voleo, que consiste en una siembra directa al azar, donde las semillas son esparcidas por el suelo. La principal desventaja de este método son las semillas perdidas que no logran germinar correctamente. (Gavilanes & Chipantiza, 2016)

Siembra indirecta. - Para este método la semilla se coloca en la tierra, pero no de forma definitiva, si no que luego es trasplantada a otro suelo donde terminará su ciclo de vida (Secretaria de agricultura y ganadería, 2006).

Dentro de este método se encuentra las técnicas de trasplante manual o tradicional y el trasplante mecanizado.

El trasplante manual. - consiste en que un peón deposite la plántula en suelo húmedo manualmente, lo que hace que el trasplante sea lento y costoso. La principal desventaja de este método es que la distancia entre las plántulas no es uniforme, lo que no permite optimizar el área de sembrado. Por otro lado, el trasplante mecanizado es realizado por máquinas especializadas. (Gavilanes & Chipantiza, 2016)

Trasplante tradicional. - En este método el peón trasplanta las plántulas manualmente a 4 o 5 cm de profundidad a una distancia de entre 15 y 25 cm entre plantas, sin seguir ningún patrón en específico.

Trasplante mecanizado. - Para este método es necesario el uso de máquinas especializadas en trasplante que son capaces de tomar las plantas directamente desde las bandejas colocadas por un operario en un sitio diseñado para este propósito, y alimentar al distribuidor principal que las coloca en el terreno reduciéndose considerablemente la mano de obra. La máquina requerirá para su trabajo sólo dos operarios: conductor y proveedor de bandejas. En la Tabla 5 se presenta las principales ventajas y desventajas del trasplante

mecanizado, mientras que en la figura 18 se muestra un trasplantador mecánico de dos hileras.

Tabla 5. Principales ventajas y desventajas de trasplante mecanizado.

Ventajas	Desventajas
Reduce considerablemente la mano de obra y el tiempo de trasplantado	Se necesita cierta cantidad de combustible por hectárea para poder movilizar las máquinas trasplantadoras.
Se mejora la productividad al sembrarse todas las plántulas de forma correcta evitando que estas se pierdan	El suelo debe ser nivelado antes de poder trasplantar
Mejor aprovechamiento del campo	

Fuente: Ortiz, 2016.



Figura 18. Trasplantadora mecanizada autopropulsada de 8 hileras.

Fuente: Moreira D. (2017). Guía para el establecimiento y monitoreo del cultivo de arroz bajo la metodología de SRI.

2.2.6.3 Trasplantadora

Se les llama a varios tipos de máquinas agrícolas que se encarga de trasplantar plantas generando un hoyo o surco. Pueden realizar las operaciones de forma automática, semiautomática o manual. (EcuRed, 2019).

Modelos de trasplantadoras de arroz

Existen diversas herramientas para el trasplantadora de arroz, teniendo cada uno diferentes formas de funcionamiento. Las más utilizadas son:

Trasplantador manual: Es una herramienta utilizada principalmente para el trasplante de hortalizas o semillas, normalmente tiene forma de tubo con un extremo abierto y en el otro, un pico que se puede abrir al apretar el gatillo para soltar la planta. Su funcionamiento, como se muestra en la figura 19, se basa en utilizar la fuerza del trabajador para hundir el pico en la tierra hasta la profundidad deseada, luego dejar caer la planta por el extremo abierto y finalmente apretar el gatillo para proceder a sacar la trasplantadora del suelo. Está fabricado de acero inoxidable, aunque hay modelos hechos de PVC.

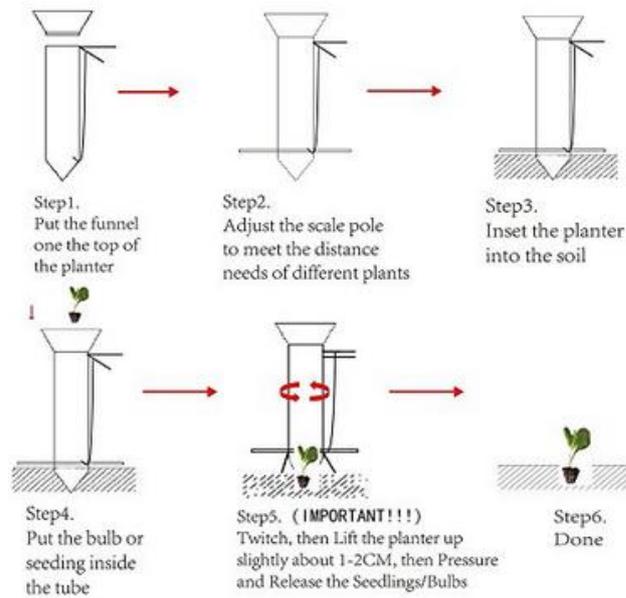


Figura 19. Proceso de trasplante con un trasplantador manual

Fuente: Ilot (s.f). Long Handled Bulb Planter Tools and Vegetable Seedling
Transplanter Single handle and two handles are sent randomly

Trasplantadora semiautomática: Son máquinas mecánicas que trabajan mediante sistemas de transmisión de poleas. Su fuente de poder puede ser el propio trabajador o un animal de carga que se encarga de trasladar la maquina generando así movimiento en las ruedas que a su vez accionan el sistema de trasplante. En la figura 20 se muestra el modelo del Instituto de Ingeniería Mecanización Agrícola (IIMA) de 4 hileras.



Figura 20. Trasplantadora del IIMA de 4 hileras.

Fuente: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA (2010). Diseño participativo de una tecnología: la trasplantadora de arroz.

Trasplantadora mecánica: Son las trasplantadoras más modernas, y por ende más costosas, que trabajan con motores de combustión. Suelen tener el tamaño de un tractor y son utilizadas para terrenos de grandes medidas. Algunos de los modelos tienen la capacidad de modificar la distancia entre plántula trasplantada.

Estas trasplantadoras son manejadas por el operario y no necesitan de surcos previamente preparados. En la figura 21 se muestra el esquema de una trasplantadora de fresa en desarrollo.

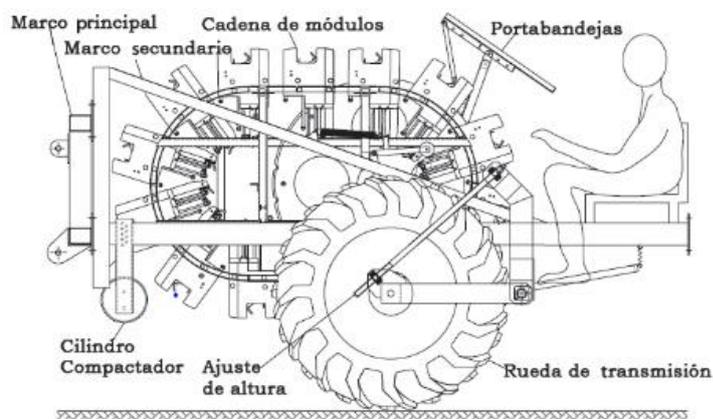


Figura 21. Vista lateral de la trasplantadora en su diseño preliminar.

Fuente: Gutiérrez et al., (2009). Desarrollo de una tecnología para trasplante mecanizado de fresa (fragaria vesca).

2.2.7 Mecanismo de 4 barras

Un mecanismo de 4 barras es un mecanismo formado por 3 barras móviles y una barra fija, unidos mediante articulaciones. En la figura 22 se muestra un mecanismo de 4 barras típico, donde el eslabón 1 es el eslabón motriz y el eslabón 2 es el eslabón de referencia.

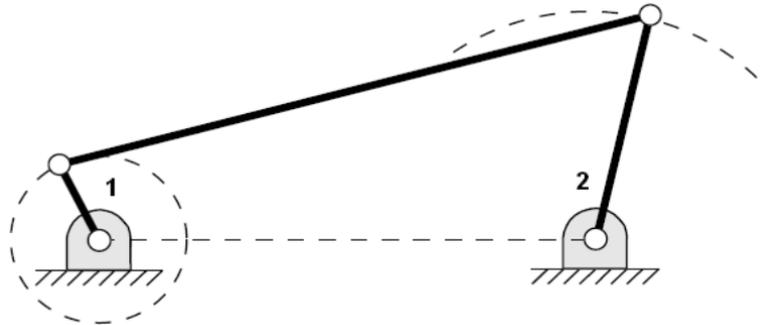


Figura 22. Mecanismo típico de 4 barras.

Fuente: Torre (2009). Desarrollo de un mecanismo de cuatro barras para su uso en la enseñanza.

Según la Ley de Grashof, la suma del eslabón más largo con el más corto debe ser menor o igual a la suma de los eslabones intermedios. Al cumplir esta condición se asegura que al menos un eslabón pueda realizar un movimiento ininterrumpido. Según varíe las longitudes de los eslabones, el eslabón de referencia se desplazará de diferentes formas. En la figura 23 se muestra las trayectorias del eslabón de referencia según las longitudes de las barras.

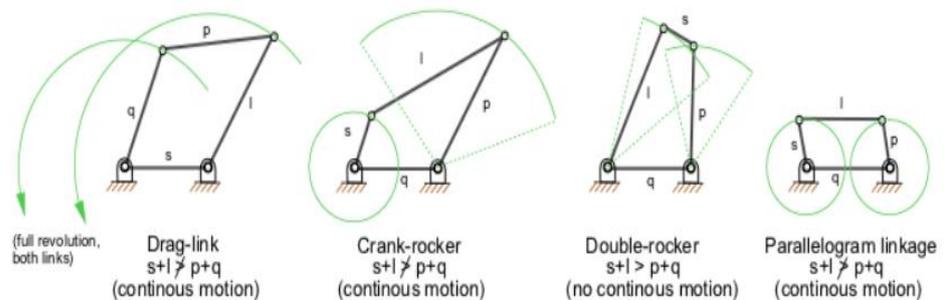


Figura 23. Movimiento descrito por un mecanismo de 4 barras.

Fuente: Wikipedia. (2020). Mecanismo de 4 barras.

Donde:

s = Longitud del eslabón más corto

l = Longitud del eslabón más largo

p, q = Longitudes de los eslabones restantes

Análisis cinemático del mecanismo de 4 barras

El análisis cinemático de este mecanismo nos permite obtener las dimensiones de las barras para que el mecanismo pueda moverse y rotar sin problemas. Este análisis se realiza mediante el método de Newton Raphson utilizando matrices jacobianas, para esto se requiere del diagrama que se muestra en la figura 24. (Marzuki, Syukran, Azwinur, 2019).

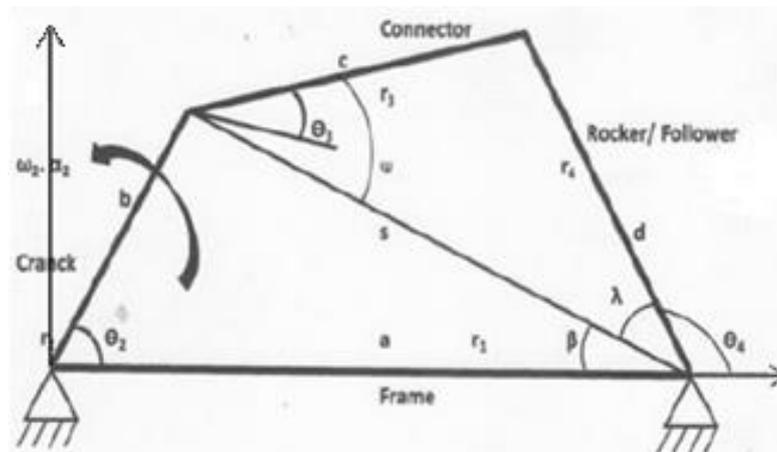


Figura 24. Diagrama cinemático de un mecanismo de 4 barras.

Fuente: Marzuki et al. (2019).

Donde r_1 es la longitud del marco, r_2 , la de la manivela, r_3 , la del conector y r_4 , la del balancín. También se tiene que, β es el ángulo de desplazamiento, ψ es la extensión del ángulo de conexión y λ es el ángulo entre s y el balancín.

Marzuki et al. (2019) indica que es posible calcular el análisis de desplazamiento cinemático del mecanismo de 4 barras con las siguientes ecuaciones.

$$s = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 * \cos \phi_2} \quad (6)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r_2}{s} \sin \theta_2\right) \quad (7)$$

$$\psi = \cos^{-1}\left(\frac{r_3^2 + s^2 + r_4^2}{2r_3s}\right) \quad (8)$$

$$(8)\lambda = \cos^{-1}\left(\frac{r_4^2 + s^2 - r_3^2}{2r_4s}\right) \quad (9)$$

$$\theta_3 = \psi - \beta \quad (10)$$

$$\theta_4 = \pi - (\beta + \lambda) \quad (11)$$

Mecanismo de 4 barras para el sistema de trasplante de arroz

Thomas (2002) afirma que el sistema de trasplante de una máquina de arroz puede ser un mecanismo de 4 barras. El mecanismo debe contar con un marco (frame), manivela (crank), conector (connector) y balancín (rocker), cada barra debe tener una longitud adecuada, además, la manivela debe poder girar 360°. Según estas características, se tiene el diseño que se muestra en la figura 25.

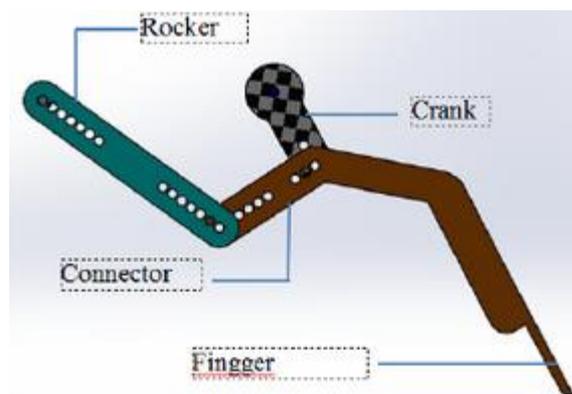


Figura 25. Diseño de un mecanismo de 4 barras.

Fuente: Marzuki, et al., (2019).

Al analizar el movimiento realizado por la pinza del mecanismo de 4 barras se tiene una curva como se muestra en la figura 26. Con este movimiento la pinza es capaz de tomar la plántula y depositarla en el suelo.

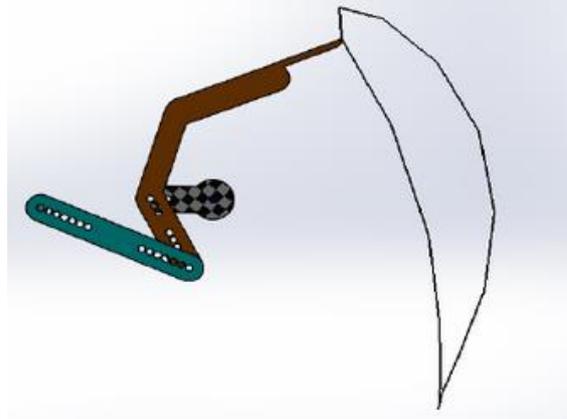


Figura 26. Curva realizada por la pinza del mecanismo.

Fuente: Marzuki, et al., (2019).

En la figura 27 se muestra el movimiento del mecanismo acoplado a una maquina trasplantadora, donde la pinza es capaz de recoger la plántula y plantarla debajo del nivel del suelo.

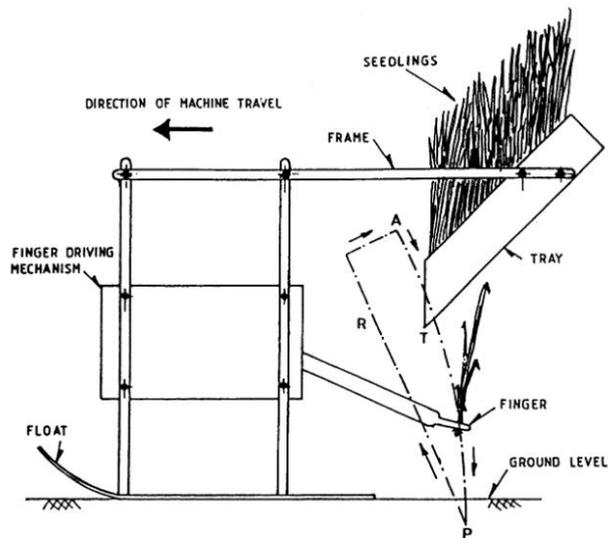


Figura 27. Esquema de una maquina trasplantadora de arroz.

Fuente: Thomas (2001). Desarrollo de un mecanismo para trasplantar plántulas de arroz.

CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se desarrolla el diseño mecánico, electrónico-eléctrico y la codificación por software del robot móvil trasplantador, tomando en cuenta los diferentes requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del mismo. Finalmente se realizará una codificación por software con el fin de controlar todo el sistema adecuadamente.

3.1 Diseño mecánico

En la parte de diseño mecánico se selecciona el material adecuado para la estructura del robot y así poder dimensionarlo, además se desarrolla el sistema de locomoción, el cual incluye el tipo de llantas, tracción y direccionamiento, y finalmente se diseña el sistema de trasplante.

3.1.1 Selección del material del armazón

El armazón o chasis del robot deberá proteger los componentes internos, evitando que estos se mojen o sobrecalienten por fuerzas externas (rayos solares, lluvia). Por lo que debe ser resistente tanto a la conductividad térmica y corrosión, además de resistir golpes que se podrían dar en su recorrido. Se ha tomado estos 4 materiales como punto de partida debido a que al revisar sistemas que cumplen con funciones similares son estos materiales los más utilizados.

Tabla 6. Comparación de materiales según diversos criterios.

	Hierro	Aluminio	Acero Inoxidable 304	Plastico polipropileno
Densidad (kg/m ³)	7874	2712	7980	970
Dureza (Mohs)	4.6	2.9	7	2
Conductividad térmica (W/m.K)	80.2	209.3	47	23
Velocidad de corrosión Kg/A-año	9.1	3	0.5	

Fuente: Adaptado de Valdez, C. (2016). Ensayos no destructivos, Ensayo de Dureza.

El hierro tiene una alta densidad lo que lo hace muy pesado, una dureza media y una conductividad térmica media, pero una gran velocidad de corrosión, lo que lo hace que se deteriore rápidamente en lugares húmedos.

El aluminio tiene una densidad relativamente baja, haciéndolo más ligero que los otros metales propuestos, cuenta con una gran conductividad térmica y una velocidad de corrosión media y dureza media.

El acero inoxidable tiene una gran densidad y dureza, por lo que es un metal muy pesado pero duradero, además que tiene una baja velocidad de corrosión y conductividad térmica.

El plástico polipropileno no tiene corrosión electroquímica al no ser un metal, tiene una baja conductividad térmica, dureza y densidad, lo que significa que es un material liviano, pero de fácil blando.

El material necesario para el chasis del robot móvil debe ser liviano para que se pueda movilizar sin problemas, de dureza media para resistir los golpes que puede tener con el entorno, de baja conductividad térmica, para evitar que la alta temperatura existente en el norte del Perú afecte a los componentes

eléctricos y electrónicos interiores y con grado bajo de corrosión para evitar el óxido al tener contacto con el fango o agua. Por lo anteriormente mencionado, el material que elegimos para el chasis es acero inoxidable 304.

3.1.2 Dimensionado de la estructura mecánica

El espaciado entre plántulas es muy importante para su crecimiento, puesto que sin un espacio adecuado la planta de arroz no puede desarrollarse en su plenitud (Martínez, 2000). Es por ello que en el distanciamiento entre hileras y plántulas de arroz se va a basar en los estudios realizados para el correcto crecimiento de las plántulas de arroz se colocara las distancias recomendadas.

- Distancia entre plántulas de arroz (A): 20 cm (Figura 28)
- Distancia entre hileras de plántulas (B): 17 cm (Figura 28)

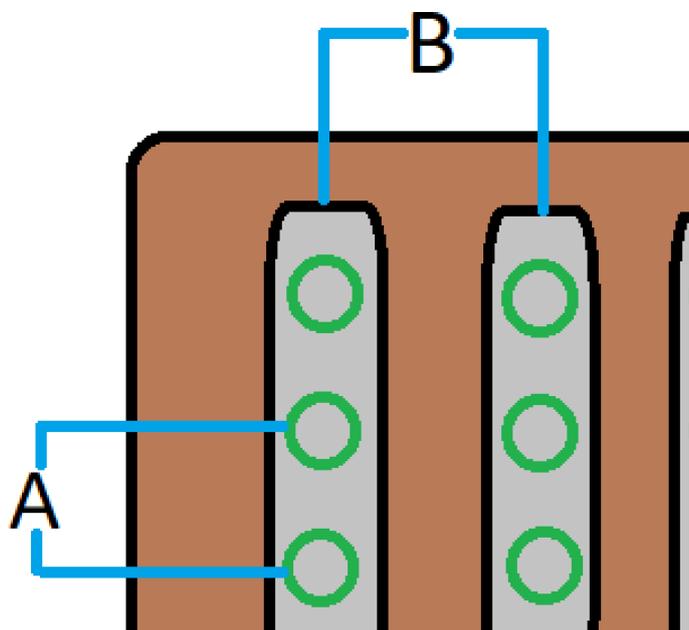


Figura 28. Espaciado entre hileras y plantas.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el robot móvil tendrá 2 hileras, y la distancia media recomendada es de 20cm, debe tener un ancho de 70 cm para que pueda realizar el trasplante de 2 plántulas simultáneamente. Para evitar

que las ruedas delanteras choquen con las traseras en algún momento, el chasis debe tener el un largo de 120cm mientras que la altura debe ser de 30 para poder depositar y trasportar las plantas cómodamente.

Por lo mencionado anteriormente, la dimensión de la estructura mecánica es de (120*70*30) cm (largo * ancho * alto).

3.1.3 Diseño de la estructura en SolidWorks

Utilizando el software de SolidWorks se realiza el diseño de la estructura según las medidas calculadas. En la figura 29 se tiene la vista isométrica del diseño.

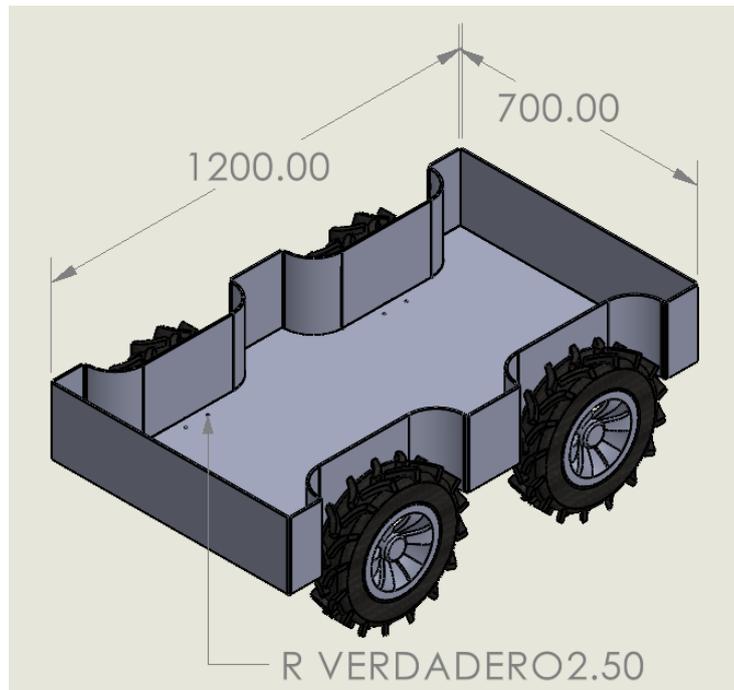


Figura 29. Vista isométrica de la estructura del robot móvil trasplantador.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Masa total del robot móvil

Utilizando la herramienta de Propiedades Físicas del software de SolidWorks se puede visualizar un análisis de todas las propiedades físicas del robot móvil según las especificaciones que se mencionó anteriormente y es gracias a esto

que se puede tener la información de la masa, volumen, área de la superficie y otros. En la figura 30 se muestra la información que brinda la dicha herramienta del software SolidWorks.

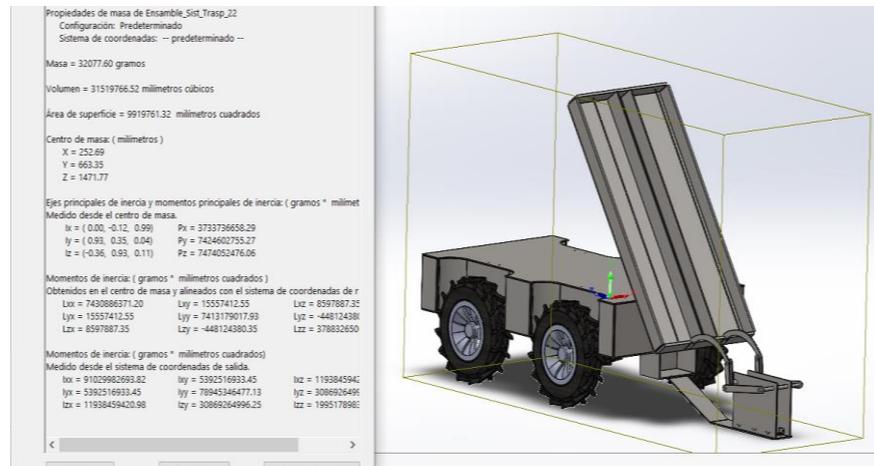


Figura 30. Análisis de Propiedades Físicas del robot móvil.

Fuente: Elaboración Propia

Gracias a la herramienta de Propiedades Físicas del software SolidWorks se tiene la masa del robot móvil, que es de aproximadamente 31.5 kilogramos, con lo cual se procede a hallar la masa total del robot trasplantador, la cual se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Estimación de pesos de los elementos de la trasplantadora

Elemento	Cantidad	Peso Unitario	Total (Kg)
Masa de la estructura mecánica.	1	31.5	31.5
Motores DC	2	0.75	1.5
Batería	2	0.5	1
Elementos electrónicos	1	1	1
Plántulas	1	16	16
Total			51

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el peso total del robot trasplantador, se debe tomar en cuenta el peso de las plántulas a transportar. En un área de 500 m², plantando 4 plántulas por cada golpe, se necesita un aproximado de 16 kilos de plántulas.

3.1.5 Potencia requerida por los motores del robot móvil

Para determinar la fuerza requerida para el movimiento sobre el campo de trabajo, se debe considerar la masa del mecanismo y el coeficiente de fricción al que va a estar sometido. En la siguiente tabla se puede ver los diferentes coeficientes de rozamiento:

Tabla 8. Coeficiente de Rozamiento.

COEFICIENTES DE ROZAMIENTO (μ)			
Terreno	Estado del Terreno	Neumáticos	
		Nuevos	Viejos
Hormigón	Seco	0.9 - 0.7	0.6 - 0.4
	Mojado	0.6 - 0.4	0.4 - 0.3
Asfalto grueso	Seco	0.9 - 0.7	0.6 - 0.4
	Mojado	0.6 - 0.4	0.4 - 0.3
Asfalto normal	Seco	0.9 - 0.7	0.6 - 0.4
	Mojado	0.6 - 0.4	0.4 - 0.6
Barro		0.2	0.1
Hielo		0.1	0.1

Fuente: Germán Casanova, Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza, 2012.

Como se observa en la tabla, el coeficiente de rozamiento del barro es igual a 0,2 y considerando $\Theta = 0$, reemplazamos los datos encontrados en la ecuación 4.

$$F_{app} = 51 * 9.8 * (1 * 0.2)$$

$$F_{app} = 99.96 \text{ N}$$

El robot trasplantador se desplazará con una velocidad de 0.5 m/s, velocidad que permite controlar su desplazamiento. Con la fuerza F_{app} ya calculada se halla la potencia necesaria para desplazar el robot trasplantador.

$$P(W) = 99.96 * 0.50$$

$$P(W) = 50 W$$

Con una velocidad de 0.5m/s y un peso de 51 K, se necesita una potencia de 50 W para poder desplazar el robo trasplantador. Teniendo en cuenta que el sistema locomotor consta de 2 motores DC, la potencia necesaria es dividida en dos necesitando una potencia de 25W en cada motor, por lo que se elige motores de 12V y 2.5 A.

3.1.6 Sistema Locomotor

El sistema locomotor es la capacidad de movimiento de un individuo, la robótica se basa muchas veces en el movimiento de algunos seres vivos para dar la capacidad de movimiento a los robots, como la habilidad de reptar, nadar, volar o caminar usando extremidades, así que es este el encargado del traslado de los robots en el campo de trabajo y es por ello que su correcta elección hará el trabajo del robot móvil mucho más eficiente.

Al ser el campo de trabajo un terreno inundado en agua y lodo, la movilidad del robot se verá afectada significativamente por ello es que debemos evaluar los tipos de sistemas de locomotor basándose en los parámetros que serán de utilidad para la movilidad.

3.1.6.1 Sistemas por ruedas

Para este sistema se puede clasificar según la tracción por ruedas en función del número de ruedas motrices y la posición de ruedas directrices, para la elección del sistema locomotor se eligió una tracción diferencial.

Tracción diferencial

El sistema locomotor del robot móvil busca la capacidad de movimiento en un terreno inundado en agua y lodo por lo que la tracción de la rueda será vital para este objetivo, debido a esto se eligió este sistema de tracción para que la tracción trasera que posee sea la que le dará la potencia para avanzar y las ruedas fijas que irán en la parte delantera para poder realizar los giros con la ayuda de las ruedas motrices. (López, 2009)

3.1.6.2 Esfuerzos en el sistema locomotor

Para la realización de un estudio en todos los componentes que intervienen en el sistema locomotor, partiremos de un sistema de referencia para entender mejor su ubicación y como afecta al sistema.

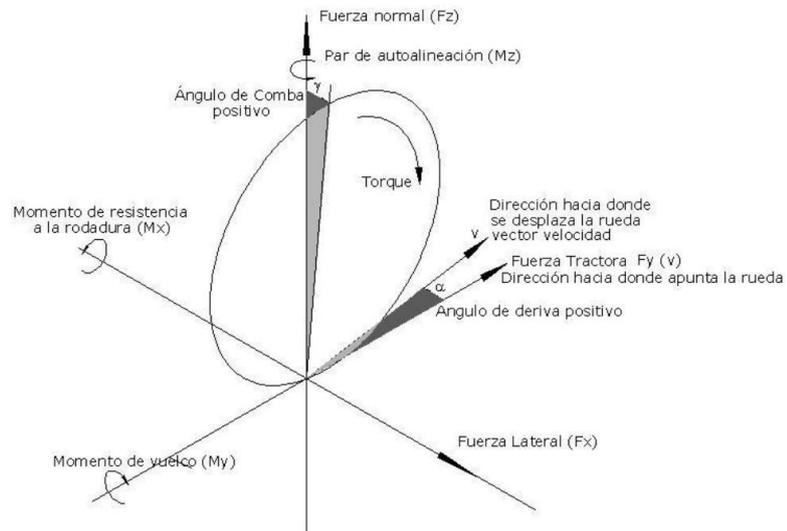


Figura 31. Sistema de Coordenadas del Neumático

Fuente: Di Rado, Presta, Devincenzi. (2013). Análisis de las fuerzas que actúan en la interfaz neumático – carretera.

El origen de coordenadas está en el centro de la huella de contacto.

Este sistema de referencia consta de los siguientes ejes principales:

- Eje Y. Definido por la intersección del plano medio de la rueda que contiene a la dirección de fuerza de rodadura y del coincidente con la superficie de rodadura que son, a su vez, ambos, perpendiculares entre sí.

- Eje Z. Definido por la intersección del plano medio de la rueda que contiene a la dirección de rodadura y un plano perpendicular a este que pase por el centro de la rueda. Su sentido positivo coincide con el de penetración en el suelo.
- Eje X. Definido por los dos anteriores, a los que es perpendicular, formando con ellos un sistema ortogonal orientado a derechas.

Como vemos en la Figura, existen tres fuerzas y tres momentos que rigen el movimiento del sistema locomotor:

- Fuerza tractora: es la resultante de las fuerzas que impulsan al vehículo, si esta es > 0 o que frenan al vehículo si es < 0 .
- Fuerza lateral: es perpendicular a la anterior y producida principalmente por la aceleración lateral en curvas. Es positiva hacia la derecha y negativa a la izquierda.
- Fuerza normal: es perpendicular a las dos anteriores, y representa la reacción del peso del vehículo que le corresponde a cada rueda. Positiva hacia arriba.
- Momento de vuelco (M_y) : es el momento ejercido por el camino sobre el neumático. Momento de resistencia a la rodadura: es el momento que tiende a frenar el movimiento de la rueda debido principalmente a la deformación del neumático.
- Par de auto alineación (M_z): es el momento que tiende a enderezar la rueda luego de efectuar una maniobra de giro.

Tenemos dos ángulos importantes asociados con el giro de la rueda:

- Ángulo de deriva o de deslizamiento (α). Es el ángulo que forma la dirección de desplazamiento o verdadera trayectoria y el vector velocidad, se produce debido a la deformación del neumático principalmente en curvas.
- Ángulo de caída (γ). Es el ángulo que es dado mecánicamente al vehículo para proveerle fuerza de sustentación lateral, formado por el plano X-Z y el plano de la rueda.

La huella de contacto es producto de la flexibilidad del neumático y de la existencia de la fuerza normal del peso del vehículo en la dirección OZ entre la rueda y el suelo. La huella produce una distribución de presiones normales en su superficie, y al mismo tiempo, otra distribución de tensiones cortantes en la interfase, por la adherencia que existe entre neumático y área de aplicación. Al no ser una distribución homogénea de presiones, la fuerza resultante no tiene su punto de aplicación en el centro de la huella, lo que provocará momentos respecto a los ejes antes definidos.

3.1.6.3 Banda de rodadura

La banda de rodadura es la encargada de mantener la cubierta del neumático unida al área de acción y así transmitiendo todos los esfuerzos entre la calzada y el neumático a excepción de los aerodinámicos. En la zona de contacto entre el área de acción y la banda de rodadura, se aplican todos los esfuerzos longitudinales, transversales y verticales para un buen comportamiento dinámico del vehículo. El material por el cual es conformado la estructura del neumático influye en el comportamiento del mismo, pero es la banda de rodadura la que se encarga del comportamiento del neumático sobre el área de trabajo. La banda de rodadura tiene la función principal de suministrar al neumático respecto al área de trabajo la máxima adherencia longitudinal y transversal, lo cual se consigue al conocer el área de trabajo del neumático y así elegir la mejor opción ya que hay tipos de bandas de rodadura para diferentes áreas de trabajo. (Heras, 2010)

Se pueden establecer tres tipologías de diseño de las bandas de rodadura en función de la disposición de las acanaladuras existentes, las cuales se muestran en la figura 32.

A) Acanaladuras en sentido circunferencial. Son las que se usan con mayor frecuencia ya que ofrecen buenas prestaciones en cualquier posición de las ruedas. Esta disposición es la que logra conseguir una

mayor adherencia transversal y menor resistencia a la rodadura. Sin embargo, ofrece una desventaja, poca capacidad a la tracción. Especialmente indicadas para cubiertas de las ruedas direccionales no motrices. (Heras, 2010)

B) Acanaladuras en sentido transversal. En comparación de las anteriores, las acanaladuras en sentido transversal ganan en adherencia longitudinal consiguiendo un gran poder de tracción, que las hacen muy buenas para su utilización en ruedas motrices. (Heras, 2010)

C) Diseño de bandas de rodaduras agrícolas. Su mayor característica es por tener elementos orientados en ambos sentidos (longitudinales y transversales), con ranuras más amplias, profundas y con laterales inclinados para una mejor auto limpieza. Destinados a neumáticos para barro-nieve. (Heras, 2010)

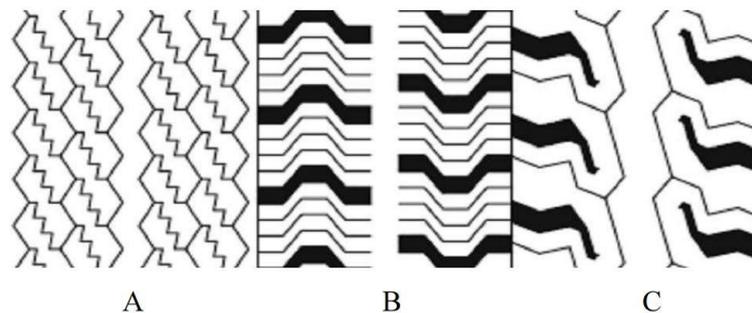


Figura 32. Principales disposiciones de las bandas de Rodadura

Fuente: Heras. (2010).

Cada disposición confiere al neumático unas propiedades específicas que deberán ser elegidas, de forma que el neumático consiga las prestaciones requeridas para el uso. En la figura 32, se muestra 3 diferentes tipos de bandas de rodadura El dibujo C de la banda de rodadura permiten la evacuación del agua entre la calzada y la huella reduciendo la posibilidad de atascamiento, por lo cual es la mejor opción para el campo de acción donde va actuar el robot móvil.

3.1.7 Cohesión del suelo

La cohesión o consistencia es la resistencia del suelo a ser deformado o amasado (remoldeado o roto), la cual depende del contenido de humedad del material, es por esto que la consistencia se expresa en términos de seca, húmeda y mojada.

La fuerza cohesiva del agua entre dos partículas de terreno vecinas puede ser expresada por la siguiente fórmula empírica:

$$c = 4 * \pi * K * \tau * \frac{r}{d} * \cos (\alpha) \quad (16)$$

Donde:

c= fuerza de cohesión,

K= constante determinada experimentalmente,

τ = tensión superficial del líquido,

α = ángulo de contacto entre el líquido y la partícula y distancia entre partículas. (Nichols, 1931)

La fuerza cohesiva en un terreno es, según Nichols, inversamente proporcional al porcentaje humedad de este. En la tabla 9 se muestran algunos resultados prácticos obtenidos por Nichols con terrenos preparados.

Tabla 9. Cohesión de diversos tipos de suelo

Terreno	% de humedad	Cohesión (F) [gr/pulgada ²]	Cohesión (F) [N/m ²]
Arena 2/3, Arcilla 1/3	10.90	17.23	261.7
-	12.90	15.00	227.9
Arena 1/3, Arcilla 2/3	12.73	26.40	401.0
-	13.10	22.50	341.8
Arcilla	13.55	56.00	850.6
-	17.50	19.00	288.6

Fuente: Departamento de ambiente y recursos naturales (2018).

Para obtener consistencia del suelo, en este caso será arcilla húmeda o barro, se realiza un experimento llamado SPT (ensayo de penetración estándar), los que nos da los datos de la tabla 10.

Tabla 10. Consistencia de los suelos.

Estado	Compresion Simple (kg/m ²)	Ind. Penetracion N
Muy blanda	menor a 0.25	0 a 2 golpes
Blanda	0.25 a 0.50	2 a 4 golpes
Media	0.50 a 1.00	4 a 8 golpes
Consistente	1.00 a 2.00	8 a 16 golpes
Muy consistente	2.00 a 4.00	16 a 30 golpes
Dura	mayor a 4.00	mas de 30 golpes

Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería práctica, Terzaghi y Peck, 1980.

Para el caso del barro, tenemos un estado muy blando, es decir una compresión menor a 0.25 kgf/m² con un promedio de 2 o menos golpes para ser penetrado. Se tiene entonces que la fuerza para penetrar el barro debe ser mayor o igual a 0.25 Kgf/m² o su equivalente 2.45 N/m².

3.1.8 Diseño del Sistema de trasplante

Para el diseño del sistema de trasplante se debe tener en consideración el espacio que se debe tener entre cada plántula y el espacio entre filas por lo que la Figura 16 nos ayudará para el dimensionado del sistema teniendo una distancia entre hileras de aproximadamente 17 cm y entre plántulas de 20 cm y tendrá que trasplantar la plántula a una profundidad de 4 cm, por lo que el

sistema de trasplante deberá cumplir con estas condiciones para el correcto crecimiento de las plántulas de arroz. Es por eso que el sistema deberá cumplir con los requerimientos necesarios.

Requerimientos

- Espacio entre plántulas: 20 cm
- Espacio entre hileras: 17 cm
- Profundidad: 4 cm
- Soportar una presión: 2.45 N/m^2
- Correcta trayectoria y sin obstrucción

3.1.8.1 Diseño del mecanismo de 4 barras

Basándose en el mecanismo de 4 barras descrito por Thomas (2002), se realiza el diseño del sistema de trasplante en el software Solidworks, como se muestra en la figura 33.

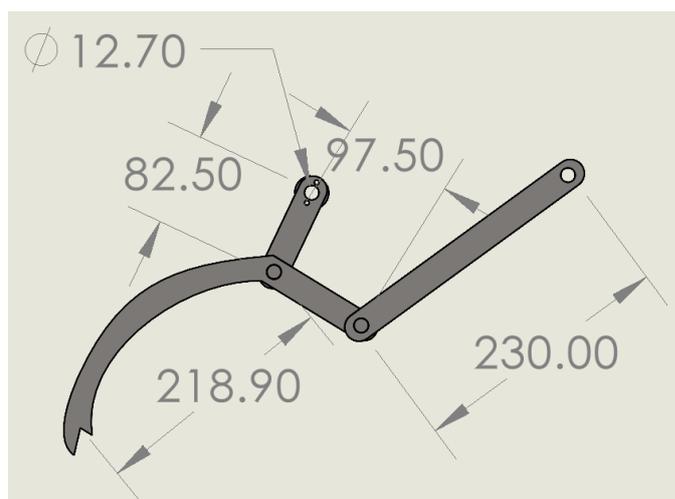


Figura 33. Diseño del mecanismo de 4 barras para trasplante en Solidworks.

Fuente: Elaboración propia.

Con las medidas mostradas en la anterior figura, se comprueba que se cumple la Ley de Grashof, la cual indica, que, si las sumas de la longitud de la barra más larga (l1) y de la más corta (l4) es menor a la suma de las otras dos barras (l2 y l3), este mecanismo tendrá un movimiento ininterrumpido, lo cual verificamos al cumplir con la siguiente desigualdad:

$$l1 + l4 < l2 + l3$$

$$230 + 82.5 < 218.9 + 97.5$$

$$312.5 < 316.4$$

3.1.8.2 Análisis Estructural del brazo de trasplatación.

SolidWorks Simulation, que es una herramienta utilizada para análisis estructurales, que da la facilidad de realizar pruebas de un modelo en la computadora sin necesidad de realizar pruebas de campo, es por ello que con esta herramienta se realiza la prueba del brazo de plantación suministrando una presión hallada anteriormente a las caras que estarán en contacto con el suelo al momento de realizar el proceso de trasplante, además eligiendo el material señalado anteriormente nos dará una prueba real del comportamiento del diseño como si fuera en un campo real.

Análisis de Tensiones

En el análisis estático se puede visualizar el comportamiento del elemento en estudio con respecto a la fuerza requerida para romper la cohesión del suelo, y así ser capaz de soportar el trabajo de introducir las plantas en el campo de trabajo. Para ellos se ingresa el material de la pieza, que será el Acero inoxidable 304, los puntos de sujeción, que son puntos que estarán unidos a el eje del sistema de trasplante. Luego coloca el valor las fuerzas externas, en este caso será la presión de 2.45 N/m² que se halló anteriormente, y se pondrá esta presión contra

las caras que estarán en contacto con el suelo para el proceso de trasplante.

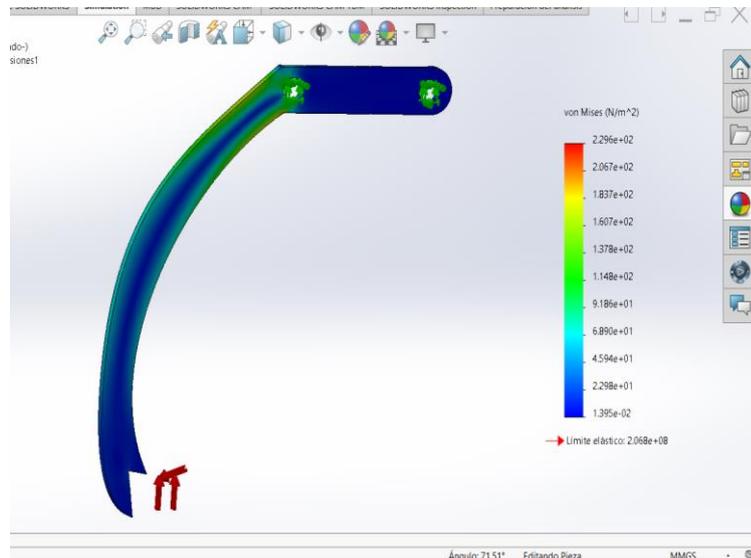


Figura 34. Análisis Estático con respecto a Tensiones utilizando SolidWorks Simulation

Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se puede visualizar una regla de presiones donde los valores que se encuentran en el rango azul son presiones dentro del cual no se visualiza una deformación y en el rango rojo, valores donde se podrá ver una deformación más pronunciada también muestra el límite elástico de $2.068e+08$ que es la presión máxima que puede soportar la pieza sin sufrir deformaciones permanentes.

Al visualizar el análisis estructural se logra comprobar que la presión que va ejercer el suelo sobre las caras del brazo de trasplante están dentro de los esfuerzos que no se observa ninguna deformación y es por ellos que se logra comprobar que el diseño cumple con los requerimientos de soportar la presión para el proceso de trasplante.

Análisis de Desplazamiento

Este análisis estático se realiza para visualizar los puntos donde se podrá observar mayor deformación y el valor en milímetros de dicha

deformación. Para ellos se coloca los datos antes mencionadas para visualizar la salida que será el grafico con respecto al desplazamiento.

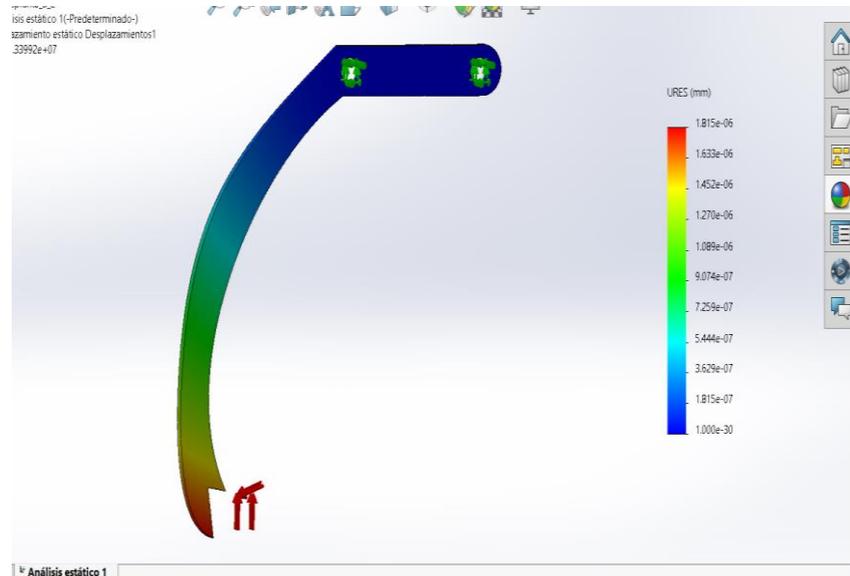


Figura 35. Análisis Estático con respecto a Desplazamiento utilizando SolidWorks Simulation.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 35 se puede visualizar una regla de desplazamiento en milímetros que están relacionados con el coloreado de la barra, donde la parte que está en contacto con el suelo es la que tiene un color rojizo, ya que sería la zona donde se podría observar una mayor deformación, pero eso no quiere decir que la barra se va a deformar, ya que se pudo comprobar que con la presión introducida no se observa ninguna deformación real, el estudio solo muestra las zonas donde se podría visualizar una mayor deformación si se le coloca los valores necesarios para que esto ocurra. Mientras que la parte coloreada de forma azul u otros son las zonas que de verían afectada en menor medida.

3.1.8.3 Diseño del sistema de trasplante en Solidworks

Utilizando el software SolidWorks se realiza el diseño de todos los elementos del sistema de trasplante para luego ser ensamblados en el

mismo y así poder realizar análisis de movimiento al sistema para verificar que el modelo ensamblado cumple el proceso de trasplante satisfactoriamente y es por ello que se toma los requerimientos antes mencionados en consideración para el diseño de las piezas.

Distanciamiento entre hileras

El distanciamiento entre hileras deberá ser de 17 cm por lo cual el robot al tener dos hileras, el sistema tendrá dos brazos trasplantadores que deberán estar unidos mediante un eje rotativo que es el que les dará el movimiento para que por medio de este eje se realice el movimiento de trasplante en las 4 barras y otro eje fijo para que sea el soporte de las barras. Para esto se realiza el siguiente diseño que cumple satisfactoriamente con los requisitos.

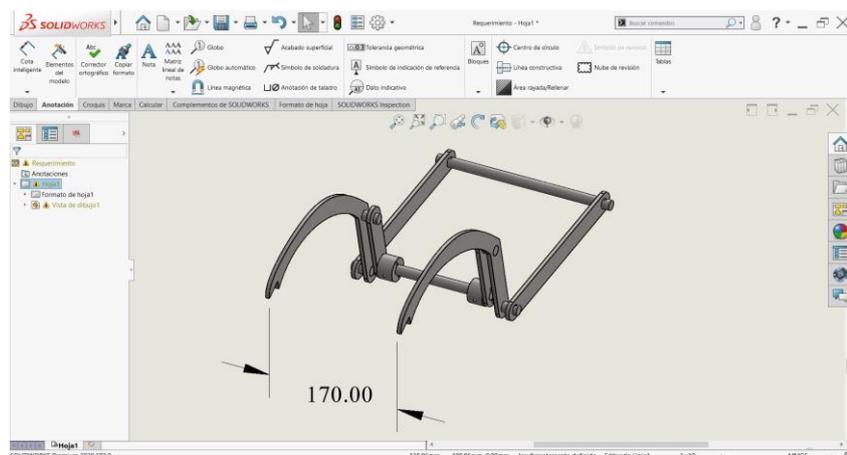


Figura 36. Vista Isométrica del sistema de trasplante en SolidWorks.

Fuente: Elaboración Propia

Profundidad de plántula

Para el proceso de trasplante uno de los requerimientos mencionados es la profundidad, que es recomendable de 4 a 5 cm, debido a esto el trayecto de trasplante debe ser dentro de estos intervalos y sin obstrucción de cualquier otro elemento, el encargado de esto son los brazos de trasplante, por este motivo su curva de movimiento tiene que pasar bajo la base del modelo en el intervalo mencionado. En la

figura 37 se muestra que el punto más bajo al cual llega el mecanismo es 4.38 cm por debajo del nivel de la tierra.

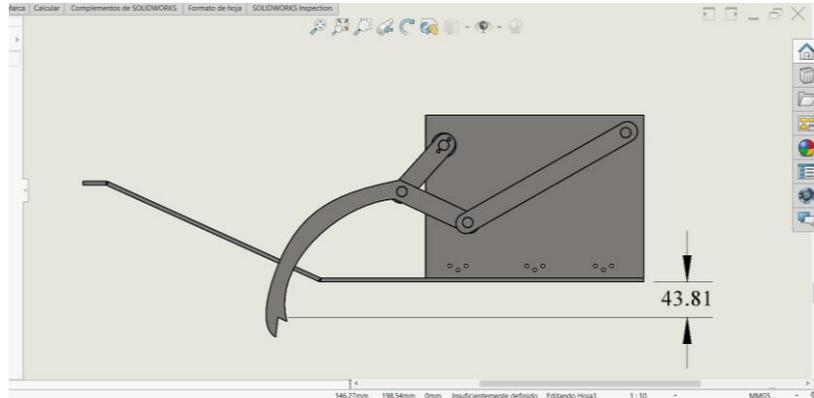


Figura 37. Vista Lateral del Sistema de Trasplante en SolidWorks.

Fuente: Elaboración Propia

Diseño completo del sistema de trasplante en SolidWorks

El diseño del modelo de trasplante se basa en el mecanismo de 4 barras en el cual se coloca dos ejes, un eje rotativo, que sería el que tendría una interface con el motor para que realice un movimiento sobre el eslabón rotatorio que acciona al brazo de recogida para que realice el movimiento de trasplante, y un eje de apoyo, que estará unido al brazo de recogida por medio de eslabón rígido que realizará un movimiento mínimo.

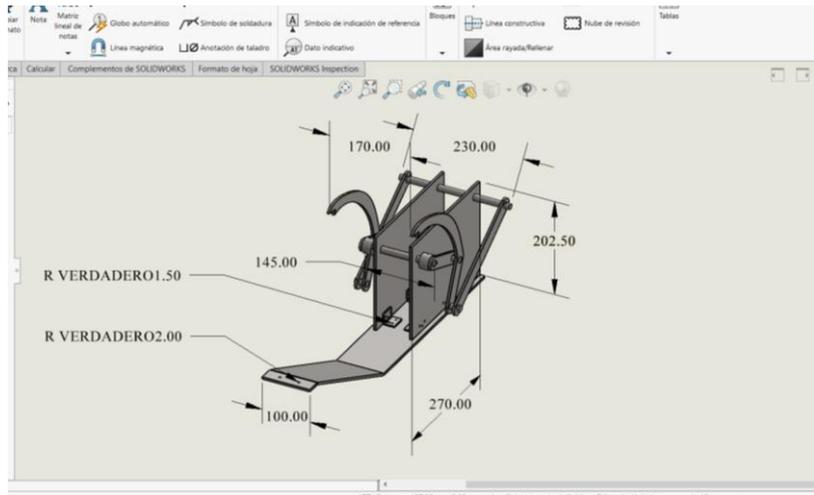


Figura 38. Diseño del sistema de trasplante.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis en Motion del Sistema de Trasplante

Terminado el ensamble del Modelo de trasplante se realizó un análisis de movimiento del mismo, se eligió el eje rotativo como motor y se fijó la dirección que tendría el movimiento, que iría en dirección positiva hacia el eje Z, luego con la herramienta Motion se eligió como resultado el Desplazamiento y el trayecto que realizarán los puntos elegidos para mostrar por medio de una simulación los puntos por donde pasan las entidades medidas.

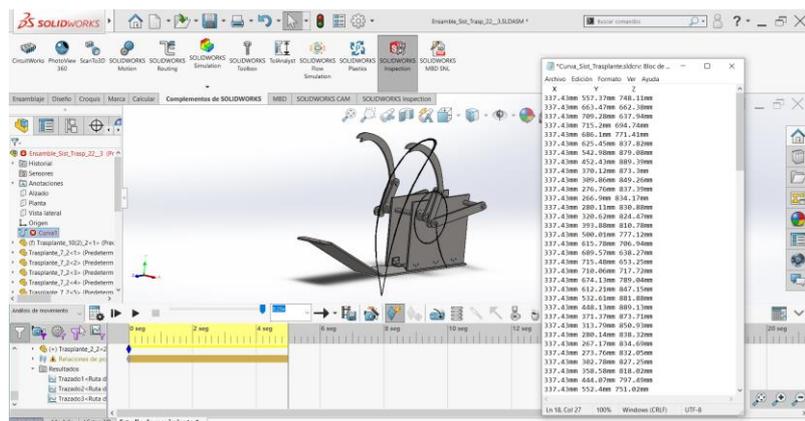


Figura 39. Análisis de Movimiento del Sistema de Trasplante con SolidWorks Motion.

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados observados en la figura 39, son los trayectos de las entidades medidas, el trazado 1 contiene la ruta de la superficie del brazo de trasplante que está en contacto directo con las plántulas de arroz y el suelo, en la imagen podemos visualizar el trayecto del movimiento que realiza y además podemos visualizar una tabla donde muestras los puntos del trayecto con su respectivo eje, se puede apreciar que en el eje X no se está moviendo que para el proceso de trasplante solo se necesita movimiento en los ejes Y y Z, es en estos ejes donde se visualiza todo el movimiento, el trazado 2 contiene la ruta de la unión del eslabón rotativo con el brazo de trasplante, es este punto el que realiza movimientos circulares como se visualiza en la imagen y esto es para accionar el brazo de trasplante, por ultimo tenemos el trazado 3 que es la unión de eslabón de apoyo con el brazo de trasplante, este punto es el que sirve de apoyo al brazo de trasplante y le permite hacer el movimiento para realizar el proceso, este punto hace un movimiento curvilíneo.

3.1.8.4 Diseño de la bandeja para plántulas

La bandeja de plántulas de arroz es utilizada para el transporte de las mismas mientras se realiza el proceso de trasplante, por lo cual, y siguiendo las especificaciones del robot, debe de ser de dos filas con las medidas necesarias para que las plántulas entren sin ningún problema, y debe tener dos aperturas para que al momento en que el brazo de trasplante realice el movimiento de trasplante este suceda sin ningún obstrucción, además que se le colocara unas bandas de sujeción debido a que la bandeja tendrá un ángulo de inclinación. Se desea que el ángulo no dificulte la extracción de las plántulas de arroz de la bandeja, por lo cual, el ángulo final de la bandeja con relación al robot móvil será de 60° . En la figura 40 se muestra el diseño en Solidworks según las características mencionadas.

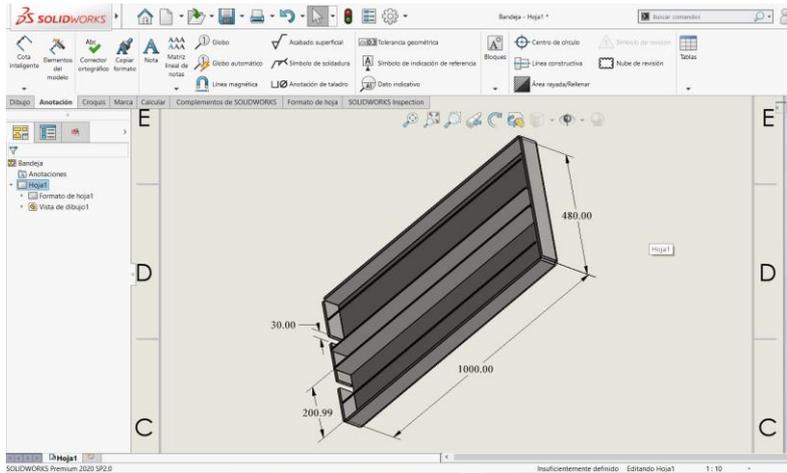


Figura 40. Diseño de bandeja de plántulas en SolidWorks.

Fuente: Elaboración Propia

3.1.8.5 Análisis de movimiento del sistema de trasplante en el robot móvil

Utilizando el software SolidWorks se realiza un estudio de movimiento del sistema de trasplante unido al robot móvil para visualizar la trayectoria de los puntos en el espacio con respecto a su estructura, para verificar que no haya contactos que obstruyan el correcto funcionamiento del proceso de trasplante. En la figura 41 se describe el movimiento del sistema de trasplante.

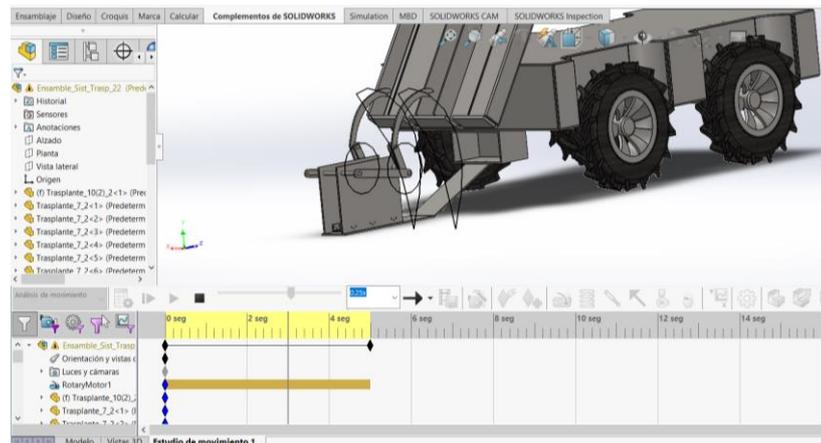


Figura 41. Análisis de movimiento del robot móvil.

Fuente: Elaboración propia

3.2 Diseño electrónico-eléctrico

En el diseño electrónico se selecciona los motores que sirven para la movilización del robot móvil y para realizar el trasplante, además se elige los sensores adecuados para el control de desplazamiento y direccionamiento, y se diseña la tarjeta electrónica con los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del robot móvil.

3.2.1 Selección de motores

Los motores que se encargarán del movimiento del robot móvil son de suma importancia, ya que un mal funcionamiento de estos dejaría al robot inutilizado, por lo que se toma en cuenta los motores existentes en el mercado actual y se hizo una comparación teniendo en cuenta las principales variables necesarias. Dentro de los seleccionados se encuentran los motores mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 11. Comparación de Motores

	MOTOR DC	MOTOR PASO A PASO	SERVOMOTOR
VENTAJAS	BAJO COSTO	FÁCIL DE CONTROLAR	ALTA PRECISIÓN
DESVENTAJAS	MANTENIMIENTO CONSTANTE	BAJA POTENCIA	ALTO COSTO

Fuente: Elaboración Propia

Para la selección de los motores se toma en cuenta que el robot móvil se pueda desplazarse continuamente con un par de torsión medio, por lo que se elige el motor DC. Se tiene en cuenta que el motor debe contar con encoder para poder realizar el control del mismo, se utiliza el motor con caja reductora y encoder de 12 V HYS modelo A58SW-555B (ver Anexo 1). En la tabla 12 se muestra sus principales características.

Tabla 12. Características del motor HYS A58SW-555B

Característica	Motor hys a58sw-555b
Potencia	12v 25w
Velocidad sin carga	260 rpm
Autobloqueo	si
Pulsos del encoder	16

Fuente: FUZHOU BRINGSMART INTELLIGENT. (s.f)

En la figura 42 se muestra una imagen del motor HYS modelo A58SW-555B con sus respectivas medidas.

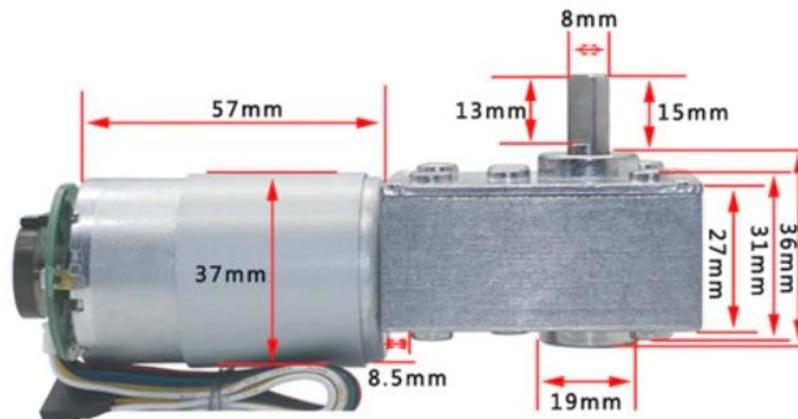


Figura 42. Medidas del motor HYS

Fuente: Aliexpress. (s.f).

3.2.2 Selección del controlador del motor DC

Para el control de la velocidad y giro de los motores DC se usa un puente H, por lo que se selecciona una configuración de acuerdo a las siguientes necesidades: se debe controlar 3 motores, debe soportar un voltaje de alimentación de un mínimo de 12 V y una corriente de 2.25 A.

En la tabla 12 se muestra una comparativa entre la principal ventaja y desventaja de configuraciones del puente H más usadas, teniendo en cuenta los requisitos mencionados.

Tabla 13. Ventajas y desventajas de diferentes configuraciones de puente H.

	Relé	Transistores	Circuito Integrado
Ventajas	Soporta mucha corriente	Facil diseño y control	Un solo integrado controla 2 motores
Desventajas	Se requiere de 4 relés para el control de 1 motor.	No soporta mucha corriente	Útil para tareas simples

Fuente: Elaboración propia.

Los puentes H con relé soportan corrientes altas de hasta 50 A, son mayormente utilizados para motores que requieren mucha potencia, además permiten aislar la fuente que alimenta al motor de la que acciona los relés. Sin embargo, se requieren 4 de relés para el control de un motor, ocupando mucho espacio si se necesita controlar una gran cantidad de motores.

La configuración de puente H con transistores permite un mejor control, pero se debe tomar en cuenta que no soportará corrientes mayores de 2 A según sea el transistor utilizado.

Un circuito integrado tampoco soporta mucha corriente, por lo que es usado en proyectos con motores medianos que no requieran mucho amperaje. Por otro lado, simplifica mucho el diseño del controlador al poder controlar 2 motores con un solo integrado.

Se controla 3 motores de corriente continua de 12V y 2.25 A, y considerando que los motores solo avanzarán, se opta por utilizar los circuitos integrados.

Una vez seleccionado la configuración de puente H, se considera los módulos basados en circuitos integrados mostrados en la tabla 14, donde se muestra sus características según los requisitos necesarios.

Tabla 14. Comparación entre diversos módulos de puente H.

	Sabertooth Dual	L298N	TB6612FNG	L293D para Arduino
Voltaje Permitido (V)	6 to 24	7 to 35	5 to 15	4.5 to 24
Amperaje Pico (A)	12	2	3	1
Motores controlables (unidad)	2	2	2	4

Fuente: Elaboración propia

El robot móvil constará de 3 motores DC de 12V 2.25 A, por lo que el driver tiene que ser capaz de controlar al menos 2 motores eficientemente, y brindar los amperajes necesarios para el correcto funcionamiento de los motores. Por lo explicado anteriormente el módulo TB6612FNG, fabricado por Toshiba, es el seleccionado para el control de los motores. En la figura 43 se muestra el diagrama de conexiones de dicho controlador.

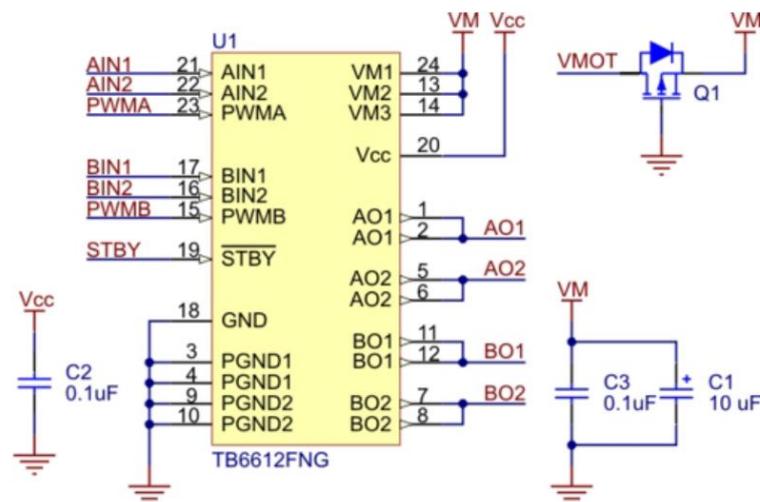


Figura 43. Diagrama de esquemático del módulo TB6612FNG

Fuente: RobotGear Australia (2009). Pololu TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier

Teniendo en cuenta el puente H elegido, es necesario controlarlo mediante modulación por ancho de pulsos (PWM por sus siglas en inglés).

El PWM es una técnica en la que se modifica el tiempo o ciclo de trabajo de una señal periódica (senoidal o cuadrática) para controlar la información que se envía.

En la figura 44 se muestra una señal eléctrica de corriente continua en la que se varia su valor de 5V a 0V, donde el tiempo (T) es la suma del tiempo donde la señal esta activa (Ton) y el tiempo en que la señal esta apagada (Toff).

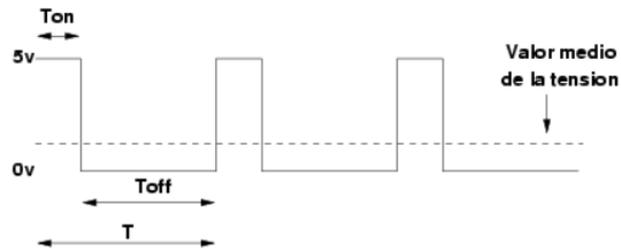


Figura 44. PWM de una señal de corriente continua.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Selección de la placa Arduino

Debido a que no se necesita procesar grandes cantidades de información ni se tiene secuencias de funcionamiento complejas, se opta por utilizar la placa Arduino. Se selecciona el modelo de placa entre los más utilizados, teniendo en cuenta las características mostradas en la tabla 15.

Tabla 15. Comparación de modelos de la placa Arduino.

	Arduino Uno	Arduino Mega	Arduino Nano
Voltaje de Operación	5V	5V	5V
Pines digitales/PWM	14/6	54/15	14/6
Pines analogicos de entrada	6	16	8
Dimension	6.8cm x 5.3cm	10.1cm x 5.3cm	4.2cm x 1.85cm

Fuente: Elaboración propia.

Para controlar correctamente los motores por medio del driver elegido, es necesario al menos 6 puertos con PWM, además de mínimo 8 puertos digitales para los sensores u otros dispositivos, también debe de contar con mínimo 3 pines para interrupciones. Debido a que 2 de los 3 modelos

presentados cumplen con los requerimientos necesarios, se elegirá el modelo Arduino Mega (ver Anexo 2). En la figura 45 se muestra el diagrama de pines de la placa elegida.

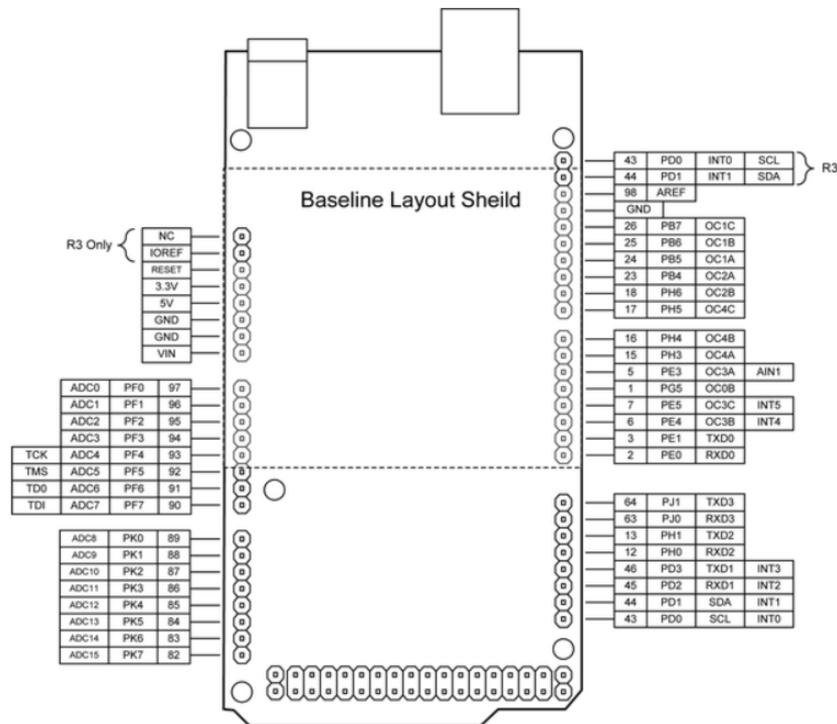


Figura 45. Diagrama de pines de la placa Arduino Mega
Fuente: Hughes. (2016). Arduino: A technical reference.

3.2.4 Control de direccionamiento

El robot trasplantador debe ir lo más recto posible para aprovechar correctamente el terreno al trasplantar, para eso se necesitará una guía.

El módulo para Arduino MPU6050 está basado en el sensor del mismo nombre y es capaz de medir movimiento en 6 grados de libertad además de contar con un giroscopio y un acelerómetro de 3 ejes. Cuenta con una librería desarrollada para Arduino y se conecta mediante la interfaz I2C. En la tabla 12 se muestra sus principales características.

Tabla 16. Características del módulo MPU6050.

Características	MPU6050
Rango de voltaje	3V-5V
Rango de aceleración	+/-2g, +/-4g, +/-8g y +/-16g
Dimensión	21.2mm*16.4mm*3.3mm
Peso	2.1 gramos
Corriente de operación	3.9mA
Rango del giroscopio	+/- 250, 500, 1000, 2000 °/s

Fuente: Adaptado de NoMADA. (2016). Especificaciones técnicas del acelerómetro-giroscopio.

El módulo será capaz de saber en qué dirección se desplaza el robot, gracias a su giroscopio incorporado, y mediante programación, se podrá corregir la orientación si es que el robot trasplantador sale de su curso esperado.

3.2.5 Control de desplazamiento

Se debe tener en cuenta que cada trasplante se debe dar cada 15 cm aproximadamente, para esto se debe medir la distancia que se desplaza el robot trasplantador antes de accionar el mecanismo de trasplante. Se utiliza una velocidad constante de 0.5 m/s para tener un adecuado control del desplazamiento del robot trasplantador.

Para esto utilizaremos como medida el radio de las llantas y el ángulo de giro realizado. En la ecuación 17 se muestra que la distancia recorrida por una rueda está en relación a su radio y la diferencia del ángulo al comenzar el desplazamiento.

$$S=r \Delta\theta \quad (17)$$

Donde:

S= Distancia recorrida por la rueda.

R = Radio de la rueda.

$\Delta\theta$ = Variación del ángulo de giro de la rueda.

Para que el robot trasplantador avance uniformemente tanto la rueda derecha como la izquierda deben desplazarse la misma distancia.

Teniendo en cuenta que es necesario conocer el ángulo de giro de la rueda, que sería también el ángulo de giro del motor, se utilizará un encoder.

3.2.6 Dimensionado de la batería eléctrica.

Teniendo en cuenta todos los elementos que conforman el robot trasplantador, se elabora la tabla 17, calculando el consumo eléctrico de todo el sistema

Tabla 17. Cálculo del consumo eléctrico del sistema.

Elementos	Voltaje	Amperaje
Motor 1 (llanta derecha)	12	1.25
Motor 2 (llanta izquierda)	12	1.25
Motor 3 (Sist. Trasplante)	12	1.25
Sensor MPU6050	5	3.8 mA
Microcontrolador (Arduino)	6-12	93 mA
TOTAL		3.852

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo un consumo del sistema total de 3.852 A, se calcula la capacidad de la batería, teniendo en cuenta que el sistema trasplantará por periodos de 1 hora y 30 minutos máximo, utilizando la ecuación 6.

$$C = 1.25 * 3.852 * 1.5$$

$$C = 7.3 \text{ Ah}$$

Una vez calculada la capacidad de la batería, tomando en cuenta que esta debe de ser de 12 V y aproximando su capacidad a 8 Ah, se optará por un paquete de baterías de litio de 12 V y 8 Ah. Se elige el banco de baterías fabricadas por Shenzhen Chuangneng Ruiyuan Electronics.

3.3 Programación de la placa de control

Como se mencionó anteriormente, se utiliza como controlador del sistema la placa Arduino Mega, por lo mismo se programa en el entorno de la misma placa.

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es un software, escrito en lenguaje Java, que permite escribir y subir un código de programación a las placas Arduino fácilmente. Es posible usar este entorno en diversos sistemas operativos como Windows, Mac OS y Linux. En la figura 47 se muestra el entorno de dicho software.



Figura 46. IDE Arduino.

Fuente: Arduino.

3.3.1 Programación del sensor MPU6050

Para obtener el ángulo de giro del MPU6050 se utiliza su Procesador de Movimiento Digital o Digital Motion Processor (DMP) para evitar el uso de filtros externos al sensor.

Como primer paso se debe calibrar el DMP utilizando el programa desarrollado por Luis Ródenas (ver Anexo 3), el cual proporciona los valores de offset del sensor.

En la figura 48 se muestra la declaración de las librerías que se utilizarán para el control del mpu6050, la dirección para la conexión I2C, que será 0x69, y el pin donde ocurre la interrupción hecha por el sensor.

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include "Wire.h"
#endif
// Se utiliza la direccion 0x69
MPU6050 mpu;
// Se define el pin 0 para interrupcion
#define INTERRUPT_PIN 0
bool blinkState = false;
```

Figura 47. Declaración de librerías.

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a inicializar el I2C y se realiza una prueba de la conexión con el sensor. También se inicia la conexión con el puerto serial, configurándolo a 9600 Baudios para poder leer los valores del MPU6050, como se visualiza en la figura 49.

```

void setup() {
  // Se agrega el bus I2C
  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    Wire.begin();
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
  #endif
  Serial.begin(9600);
  // Iniciar MPU6050
  Serial.println(F("Iniciando conexión con MPU6050..."));
  mpu.initialize();
  // Se configura el pin 0 como pin de entrada
  pinMode(INTERRUPT_PIN, INPUT);
  // Comprobar conexión
  Serial.println(F("Probando conexión..."));
  Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU6050 conectado") : F("MPU6050 no conectado"));
}

```

Figura 48. Inicialización del sensor MPU6050.

Fuente: Elaboración propia.

Se utiliza los datos de offset obtenidos para calibrar el sensor, lo cual se muestra en la figura 50, para luego poder recibir las interrupciones por el pin 0 y se inicializa el DMP, el cual dará un error en caso de fallar la inicialización.

```

// Iniciar DMP
Serial.println(F("Iniciando DMP..."));
devStatus = mpu.dmpInitialize();
// Valores de calibracion
mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);
mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1688);

// Activar DMP
if (devStatus == 0) {
  Serial.println(F("Activando DMP..."));
  mpu.setDMPEnabled(true);
  // Activar interrupcion
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(INTERRUPT_PIN), dmpDataReady, RISING);
  mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();
  Serial.println(F("DMP listo..."));
  dmpReady = true;
  packetSize = mpu.dmpGetFIFOpacketSize();
} else {
  Serial.print(F("Inicialización de DMP fallido, error: "));
  Serial.print(devStatus);
  Serial.println(F(""));
}

```

Figura 49. Calibración del offset y activación del DMP.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los datos del giroscopio se multiplican por 180, se divide entre la constante pi y son mostrados en el monitor serial del IDE mediante la programación mostrada en la imagen 51.

```

// Mostrar Yaw, Pitch, Roll
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
Serial.print("ypr\t");
Serial.print(ypr[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(ypr[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(ypr[2] * 180/M_PI);

```

Figura 50. Mostrando datos del MPU6050 en el monitor serial.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Programación para el desplazamiento

Para controlar el desplazamiento del robot trasplantador, se utiliza un sistema de lazo cerrado, teniendo como retroalimentación del sistema al encoder que está unido al motor que accionan las llantas.

En la figura 52 se muestra la declaración de la librería “math”, la variable que contiene el número de ranuras que tiene el encoder, las variables para el tiempo de muestro y las variables PWM para cada motor.

```

// Se incluye libreria para utilizar funciones matemáticas
#include <math.h>
// Se define el valor de la constante pi
#define PI 3.1415926535897932384626433832795
// Se define el número de ranuras del encoder
int N = 16;
// Se define la variable para almacenar las interrupciones
int contadorTicks = 1;
int tam = 10;
// Se define el tiempo de muestreo
int k = 10;
// variables para el tiempo de muestreo
volatile unsigned muestreoActual = 0;
volatile unsigned muestreoAnterior = 0;
volatile unsigned deltaMuestreo = 0;
// Error entre variables
float error = 0;
float Kp = 40;
// PWM para la llanta derecha
int PWMr = 0;
// PWM para la llanta izquierda
int PWMl = 0;

```

Figura 51. Declaración de variables para el control de motores

Fuente: Elaboración propia.

Para el desplazamiento del robot, se declara variables para una posición inicial y una posición deseada, como se muestra en la figura 53. Se utiliza la fórmula “atan2” para encontrar el ángulo que debe girar el robot móvil para llegar a la posición deseada.

```
///VARIABLES DE POSICION DEL ROBOT
// Centro de gravedad
float Cdistancia = 0;
// Distancia al centro de gravedad con respecto al eje X
float x = 0;
// Distancia al centro de gravedad con respecto al eje Y
float y = 0;
// Posición angular
float phi = 0;

///VARIABLES DE POSICION DESEADA
float Xd = 0;
float Yd = 100;
float Phid= atan2(Yd-y, Xd-x);
```

Figura 52. Variables de posición del robot trasplantador.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 54 se muestra el programa donde se define las variables del motor derecho, las cuales son, variables para las interrupciones del encoder derecho, el pin de entrada para el encoder y el pin de salida para el control del motor, y la velocidad angular y lineal del motor. También se define la variable para los ticks, que se puede definir como cada interrupción que produce el encoder, y la variable para la distancia recorrida por la llanta.

```

//VARIABLES DEL MOTOR DERECHO
// variables para el tiempo de interrupción y cálculo de la velocidad motor derecho
volatile unsigned muestreoActualInterrupcionR = 0;
volatile unsigned muestreoAnteriorInterrupcionR = 0;
double deltaMuestreoInterrupcionR = 0;
// pin de conexión del encoder derecho
int encoderR = 3;
// pin de conexión para la llanta derecha
int llantaR = 11;
// frecuencia de interrupción llanta derecha
double frecuenciaR = 0;
// Velocidad angular de la llanta derecha
double Wr = 0;
// velocidad Lineal de la llanta derecha
double Vr = 0;
// contador ticks
int CR = 0;
// vector de almacenamiento de datos para promedio del tiempo de interrupcione
float vectorR[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
// distancia recorrida llanta derecha
float Rdistancia = 0;
// ticks del encoder derecho
int Rtick = 0;
// ticks del encoder derecho anteriores
int RtickAnt = 0;
// diferencia del encoder derecho
int deltaRtick = 0;

```

Figura 53. Declaración de variables para el motor derecho.

Fuente: Elaboración propia.

Se declaran las mismas variables para el motor izquierdo (ver apéndice 9). Se filtra la señal producida por los ticks del encoder utilizando el promedio de una cantidad de datos almacenados, como se muestra en la figura 55. Se realiza el mismo filtrado con el encoder izquierdo.

```

void REncoder() {
// Número de ticks del encoder derecho
    Rtick++;
// incremento del contador de ticks
    CR++;
// si el contador de ticks alcanza el valor determinado se realiza el filtrado
    if (CR == contadorTicks){
        float media = 0;
//FILTRO PROMEDIO
        for(int i=0;i < tam-1;i++){
            vectorR[i]=vectorR[i+1];
        }
// último dato del vector (medida actual)
        vectorR[tam-1]=deltaMuestreoInterrupcionR ;
// Suma de los valores del vector
        for(int i=0;i<tam;i++){
            media = vectorR[i]+ media;
        }
// división por el total de datos del vector
        media = media/tam;
// Se reemplaza por su valor medio
        deltaMuestreoInterrupcionR = media;
    }
}

```

Figura 54. Filtro promedio para el encoder derecho.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realiza la comparación entre las distancias recorridas por la llanta izquierda y derecha para hallar su posición actual respecto a su posición inicial, utilizando la odometría, como se muestra en la figura 56.

```

// comparación de los ticks recorridos desde el último cálculo de la llanta derecha
deltaRtick = Rtick - RtickAnt;
// distancia recorrida por la llanta derecha desde el último cálculo
Rdistancia = PI*diametro*(deltaRtick/(double) 20);
// comparación de los ticks recorridos desde el último cálculo llanta izquierda
deltaLtick = Ltick - LtickAnt;
// distancia recorrida por la llanta izquierda desde el último cálculo
Ldistancia = PI*diametro*(deltaLtick/(double) 20);
// distancia recorrida por el punto central desde el último cálculo
Cdistancia = (Rdistancia + Ldistancia)/2;
// posición del punto X actual
x = x + Cdistancia*cos(phi);
// posición del punto Y actual
y = y + Cdistancia*sin(phi);
// posición Angular actual
phi = phi + ((Rdistancia - Ldistancia)/longitud);
//transformación de la posición angular entre -PI y PI
phi = atan2(sin(phi),cos(phi));
// actualización de la variable RtickAnt con los valores de Rtick
RtickAnt = Rtick;
// actualización de la variable LtickAnt con los valores de Ltick
LtickAnt = Ltick;

```

Figura 55. Estimación de la posición actual del robot móvil.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Diseño de la placa electrónica

El circuito se diseña en el software Proteus 8 Professional, se considera 2 motores con encoder para el control de las llantas izquierda y derecha y un motor para el sistema de trasplante. Estos están conectados a dos puentes H, funcionando solo en dirección horaria. Uno de los pines de los encoder está conectado a 5 voltios, el pin central está conectado al Arduino y el restante se conecta a tierra. Se simula el sensor MPU6050 con terminales de salida, debido a que el software no cuenta con el modelo del MPU. Este diseño se muestra en la figura 57.

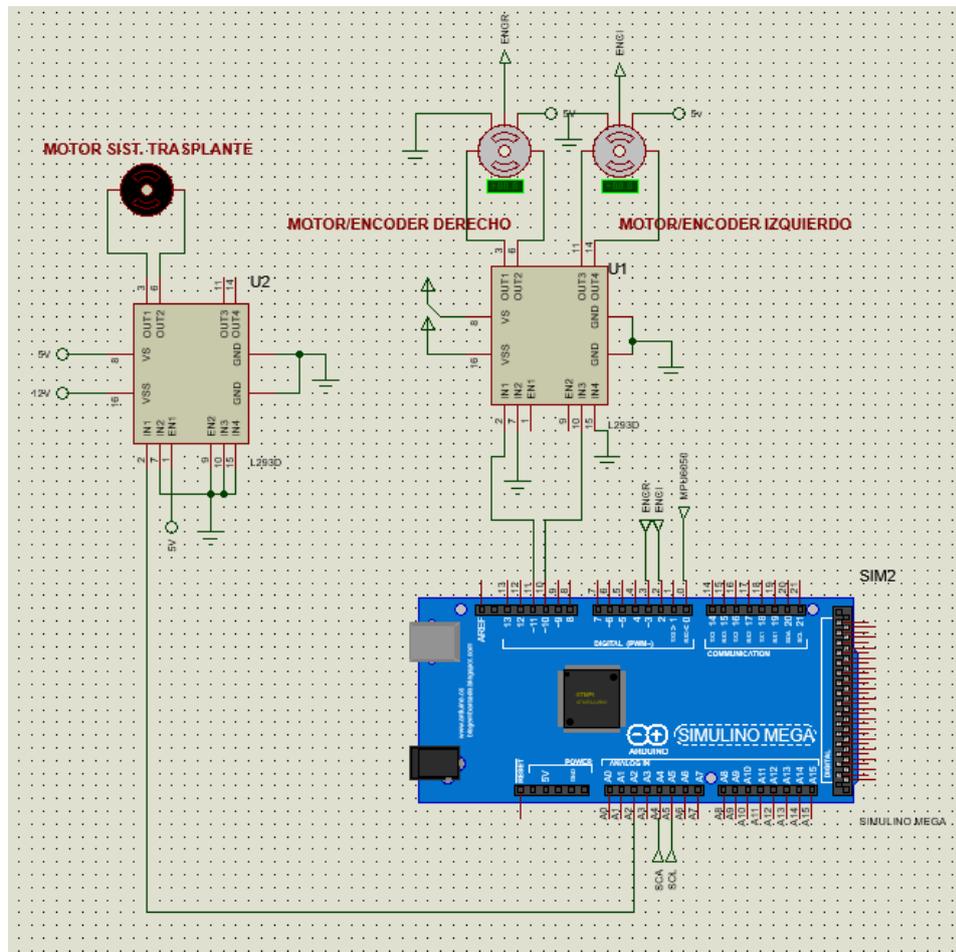


Figura 56. Diseño de la placa electrónica en Proteus 8.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se mostrará a detalle los resultados obtenidos a lo largo de la investigación junto con un análisis explicando la importancia de cada resultado para el logro de los objetivos planteados al inicio de la misma.

4.1 Análisis de Resultados Sistema Mecánico

Análisis del material

Para realizar la estructura del robot móvil se tuvo que tener en cuenta el campo de trabajo por el cual iba a operar el modelo, es por eso que teniendo en consideración las características de este ambiente se limitó a elegir dentro de cuatro materiales utilizados frecuentemente para trabajos similares, se optó por el material Acero inoxidable 304 por las propiedades que este presentaba y gracias el software SolidWorks se pudo comprobar dichas propiedades del material en cuestión, que son mostradas en la figura 58.

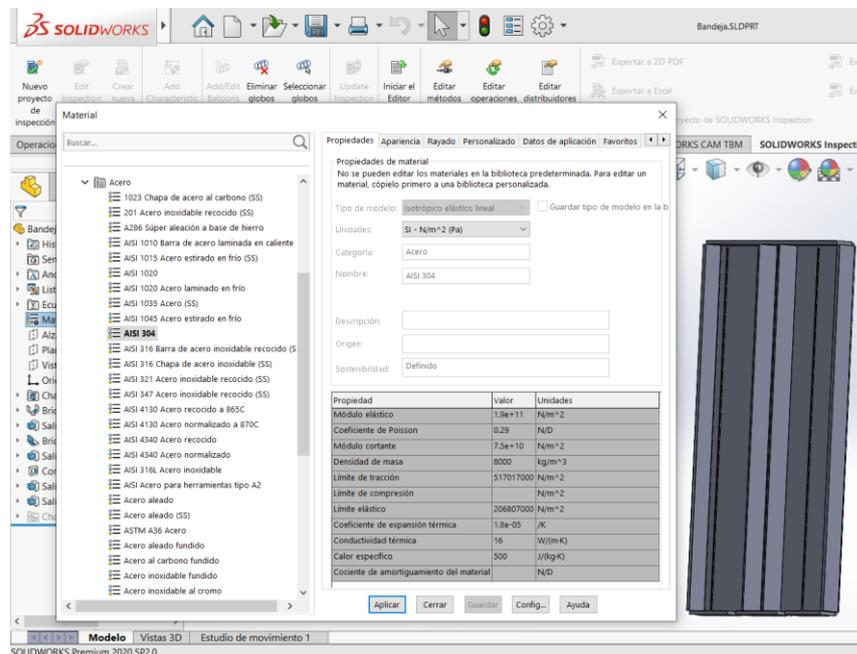


Figura 57. Análisis de propiedades de AISI 304

Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente imagen se puede observar una tabla con las propiedades del material es cuestión donde se puede observar la densidad de la masa que coincide con la anterior tabla, se muestra también el límite elástico del material que es una

propiedad importante para verificar que podrá trabajar sin deformarse con el peso al que estará expuesto además de la conductividad térmica que tendrá que ser baja debido a que el ambiente de trabajo es a una altura temperatura y podría comprometer a los componentes de su interior, gracias al software SolidWorks se pudo comprobar las propiedades mencionadas anteriormente y conocer más sobre el material.

Análisis estático de la estructura

Para este análisis se calculó el peso de las plántulas de 20 Kilogramos que estarían en la bandeja más el peso mismo de la bandeja misma de 6 Kilogramos, dicha masa que sería soportada por la de la estructura del robot móvil para ello se realiza un análisis de tensiones sobre dichos elementos para ver su comportamiento respecto a la fuerza ejercida debido al peso, que será mostrada en la figura 59.

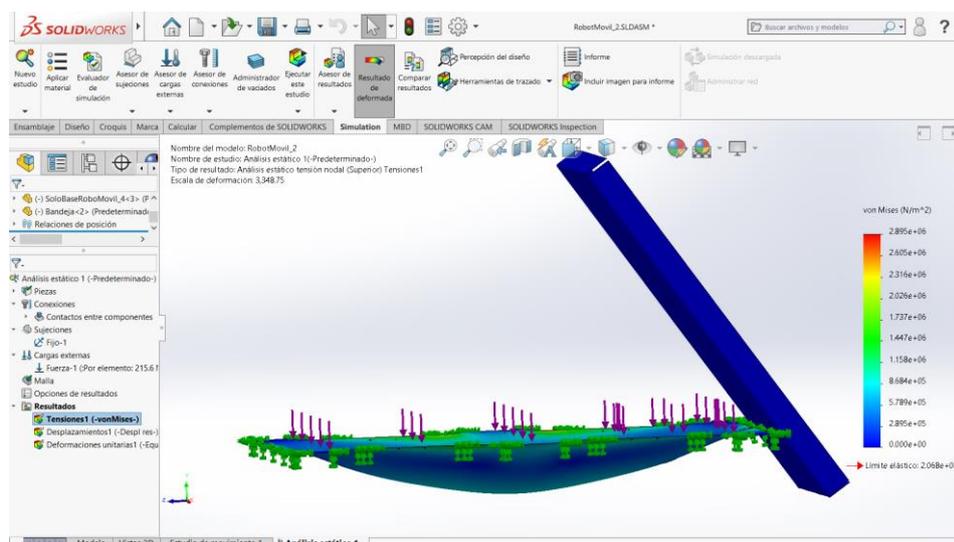


Figura 58. Análisis de peso en la estructura del robot móvil

Fuente: Elaboración propia

En la figura 59 se puede visualizar la parte superior de la estructura del robot a la cual se le está ejerciendo el peso antes mencionado, para así poder realizar un análisis al comportamiento del modelo según los colores de la reglas de presiones al lado derecho, se puede apreciar que el lado inferior donde aparece la deformación es de color verde lo que quiere decir que a una presión de $1.158 \text{ e}+06 \text{ N/m}^2$ se podrá visualizar dicha deformación, con lo cual se logra comprobar que el modelo podrá trabajar sin ningún deformación con el peso que soportará.

Análisis cinemático del sistema de 4 barras

Con la herramienta SolidWorks Motion se realizó un estudio de movimiento del modelo de 4 barras utilizado en el sistema de trasplante para verificar que, según la Ley de Grashof, la suma del eslabón más largo con el más corto debe ser menor o igual a la suma de los eslabones intermedios. Dicha ley queda confirmada con la elaboración de este modelo que se logra visualizar en la figura 60.

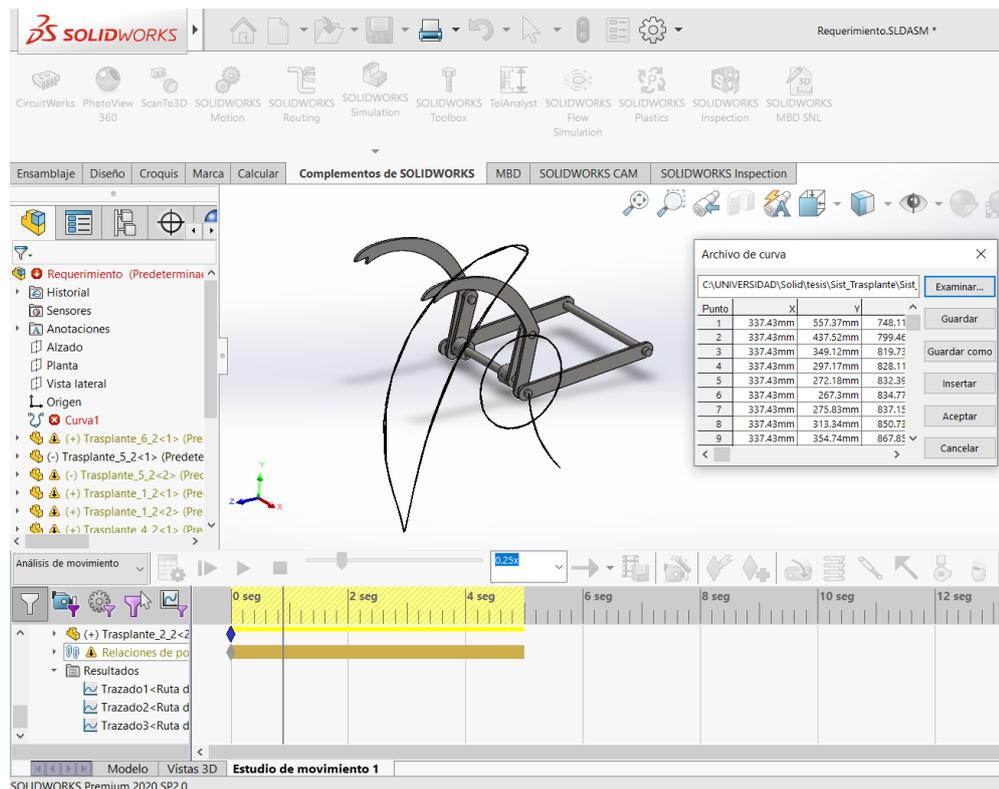


Figura 59. Estudio Cinemático del sistema de 4 barras

Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede apreciar el Estudio de movimiento del sistema de 4 barras, donde se realiza un análisis a los trayectos de los 3 puntos de los eslabones que se puede visualizar por el mismo software, la velocidad angular que se le aplica al motor es de 120 rpm dando un total de 2 revoluciones por segundo, es decir que cada segundo se va a realizar dos trasplantes en las dos hileras.

4.2 Demostración de funcionamiento del programa

En la figura 61 se muestra el funcionamiento del programa en el software Proteus, en el cual se activan los motores DC, girando ambos en un mismo sentido, lo que demuestra que el robot trasplantador avanzará en una dirección. También se muestra, en la herramienta de osciloscopio virtual del software, las interrupciones

que producen los encoder cuando los motores están activos, las cuales serán procesadas en la placa Arduino para conocer el ángulo de giro del motor.

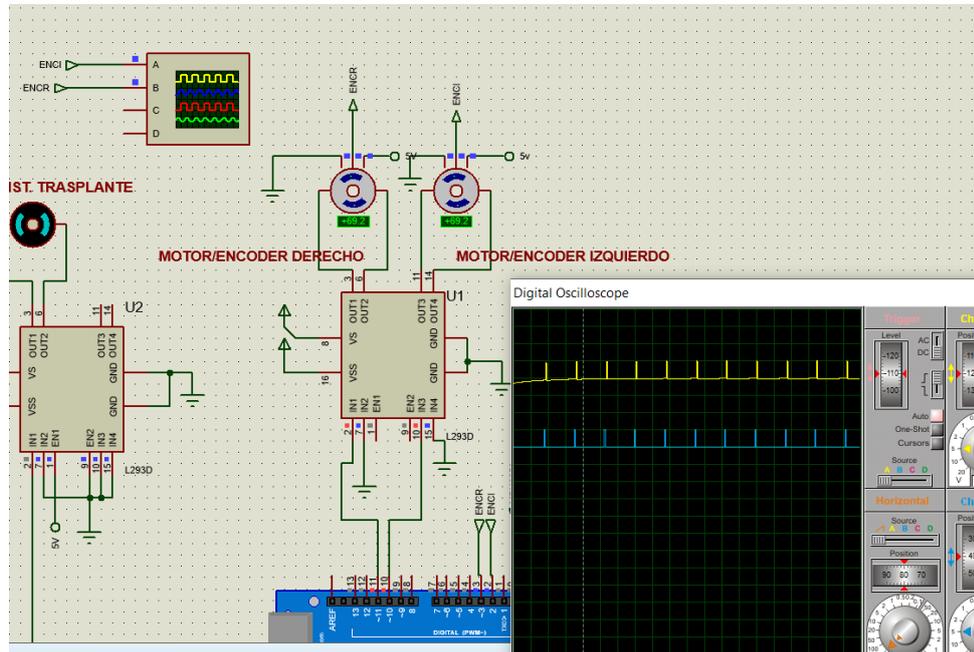


Figura 60. Funcionamiento de los motores DC e interrupciones de los encoder.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se diseñó el armazón del robot móvil trasplantador con las medidas de 1.20 metros de largo, 0.46 metros de ancho y 0.2 metros de alto, y se eligió como material Acero Inoxidable 304, una aleación de acero con 18% de cromo y 0.08% de carbono, resistente a la corrosión y de bajo costo, utilizado en diversas industrias.
2. El proceso de trasplante se realiza mediante un mecanismo de 4 barras de longitudes de 230 mm, 218.9 mm, 97.5mm, 82.5mm, lo que permite un movimiento constante del mecanismo al cumplir la Ley de Grashof. Estas longitudes también permiten que el mecanismo pueda colocar la plántula a una profundidad de 4.38 cm. Para el mecanismo de trasplante se eligió Acero Inoxidable 304.
3. El sistema locomotor se basó en tracción diferencial de cuatro llantas, siendo las llantas traseras las que permiten el cambio de giro al variar las velocidades de las mismas, teniendo las llantas delanteras como soporte. Se eligió llantas de 14 pulgadas con banda de rodadura R2, de material caucho, lo que permitirá al robot trasplantador moverse por el terreno fangoso.
4. Teniendo en cuenta el peso del robot trasplantador y de las plántulas a transportar, se halló una potencia requerida para desplazar todo el sistema de 50 W. Por lo que se eligió dos motores DC de 12 V y 25 W modelo A58SW-555B fabricados por HYS. Para el control de los mismos, se eligió el módulo TB6612FNG, fabricado por Toshiba.
5. Se calculó la capacidad de batería, para una autonomía de aproximadamente 1 h y 30m, teniendo en cuenta un consumo constante de 3.85 A, necesitando una capacidad de 8 Ah. Por lo cual se eligió un banco de baterías Litio de 12V 8Ah fabricadas por Shenzhen Chuangneng Ruiyuan Electronics.

6. Se eligió como placa de control la placa Arduino Mega, y se programó la misma en su interfaz Arduino IDE, pudiendo controlar los motores del sistema locomotor mediante estimación de la posición basándose en la rotación de las ruedas. También se eligió como control de orientación el sensor MPU6050, con el cual, mediante programación, se podrá controlar el sistema locomotor para que este no se desvíe de su ruta.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una mejora en el sistema trasplante, ya que este al estar en contacto con el campo de trabajo genera una resistencia extra además de su peso mismo, esto hace que se produzca una carga a los motores, se puede evitar haciendo que este sistema sea de forma flotante.
2. Se recomienda aumentar la cantidad de hileras del robot trasplantador con el fin de reducir el tiempo en el que se trasplanta la hectárea, pero teniendo en cuenta que se requerirá mayor potencia en los motores, así como un dimensionamiento de la estructura mayor.
3. Se sugiere la retroalimentación de las plántulas cambiando las bandejas de forma autónoma para que el robot móvil no tenga la necesidad de realizar un paro para la recarga de plántulas de arroz.
4. Se recomienda utilizar el método de control PID, con el fin de controlar con mayor precisión la posición y trayectoria del robot trasplantador.
5. Se sugiere aumentar más sensores, como GPS o redes neuronales por cámara, para que el robot trasplantador vaya lo más recto posible, aprovechando más el terreno, mejorando el rendimiento por hectárea trasplantada.
6. Se recomienda, que, al implementar, se varíe los valores de PWM del programa que controlan los motores, ya que cada motor funciona a diferentes velocidades incluso si el PWM es el mismo, para esto, es recomendable utilizar el software MATLAB para graficar las velocidades en RPM utilizando el encoder de los motores.

BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, L (2015). Diseño e Implementación de un Robot Móvil con Control de trayectoria mediante principios Odométricos. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Lima-Perú.
- Bambino, I. (2008). Una introducción a los robots móviles. Recuperado el 10 de octubre del 2020 de https://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf
- Borda, A. (2016). Diseño de un Robot Móvil Recolector de Objetos basado en un sistema Visión Artificial. (Tesis de Licenciatura). Universidad pedagógica Nacional facultad de Ciencia y Tecnología, Bogotá- Colombia.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (1980). Crecimiento Y Etapas de Desarrollo de la Planta de Arroz. Cali, Colombia.
- Contreras, J. (2014). Diseño y construcción de un prototipo recolector de material plástico flotante en el agua. (Tesis de Grado). Universidad de la Salle facultad de Ingeniería, Bogotá- Colombia.
- Cordova, E. (2014). Estudio de factibilidad económica para la mecanización del proceso de producción de arroz en las zonas arroceras de la provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador.
- Dipac. (s.f.). Catálogo de aceros. <https://es.scribd.com/doc/49974227/CATALOGO-DIPAC>
- IRRI. (2003). Machine Transplanting. International of Rice Research Institute (IRRI). Rice fact sheets.

Mosquete, C. (2010). El cultivo de arroz. Técnico, CEDAF, Santo Domingo. Recuperado el 9 de setiembre del 2020 de <http://www.rediaf.net.do/publicaciones/guias/download/arroz.pdf>

Ramos, E, Morales, R, Silva, R. (2010). Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial. http://www.lajpe.org/sep10/420_Ramon_Silva.pdf

Rosel, E. (2005). Manual de fórmulas técnicas de tracción y potencia: útiles para el Ingeniero Agrícola. México.

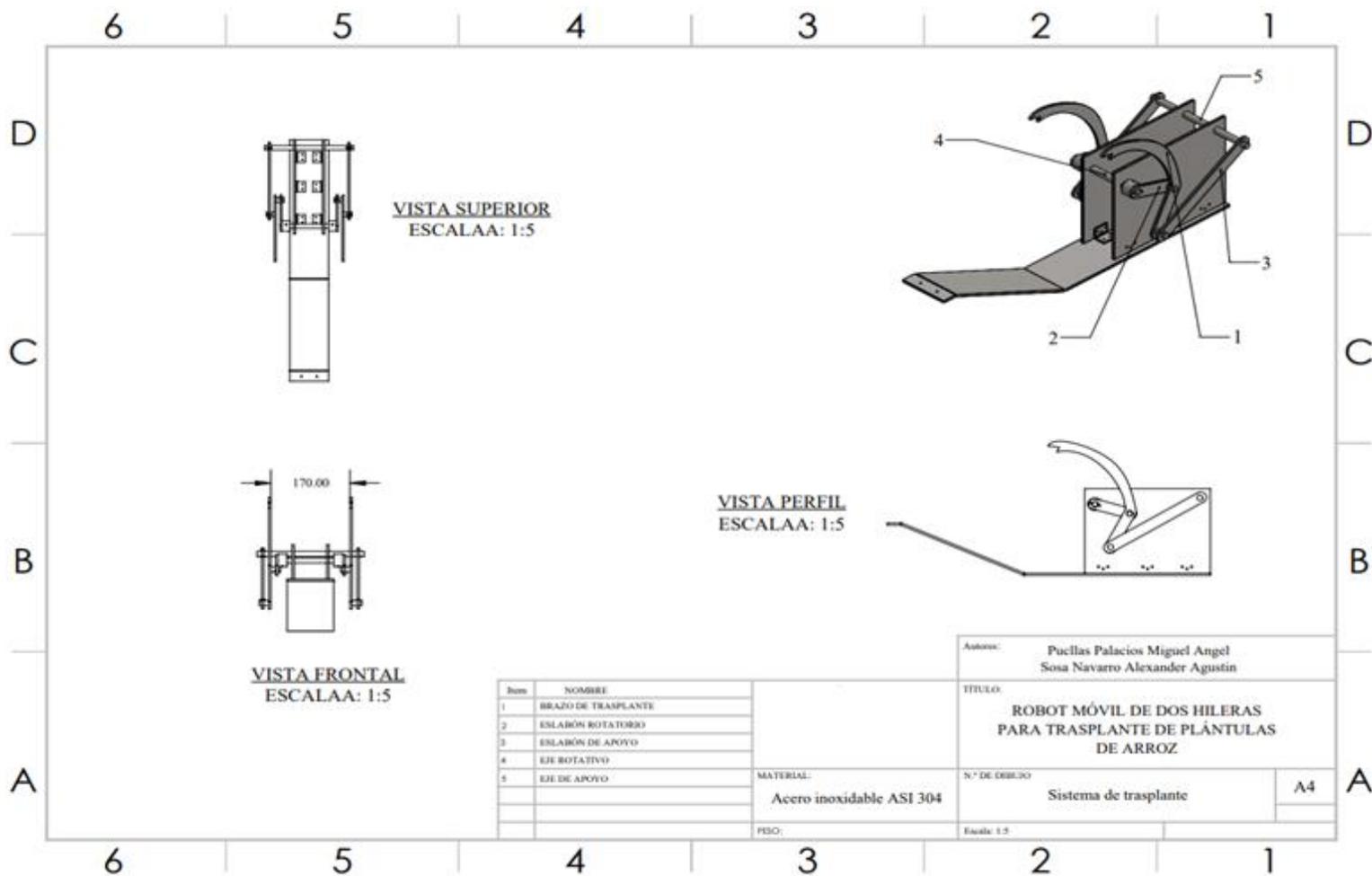
Sanchez, F. (2018). Control de motores con Arduino. https://bricolabs.cc/wiki/guias/control_de_motores#drivers_con_puentes_h%20ANCHEZ

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura. (2017). Seguimiento del mercado del arroz de la FAO. Recuperado el 15 de noviembre del 2020 de <http://www.fao.org/3/I8317ES/i8317es.pdf>

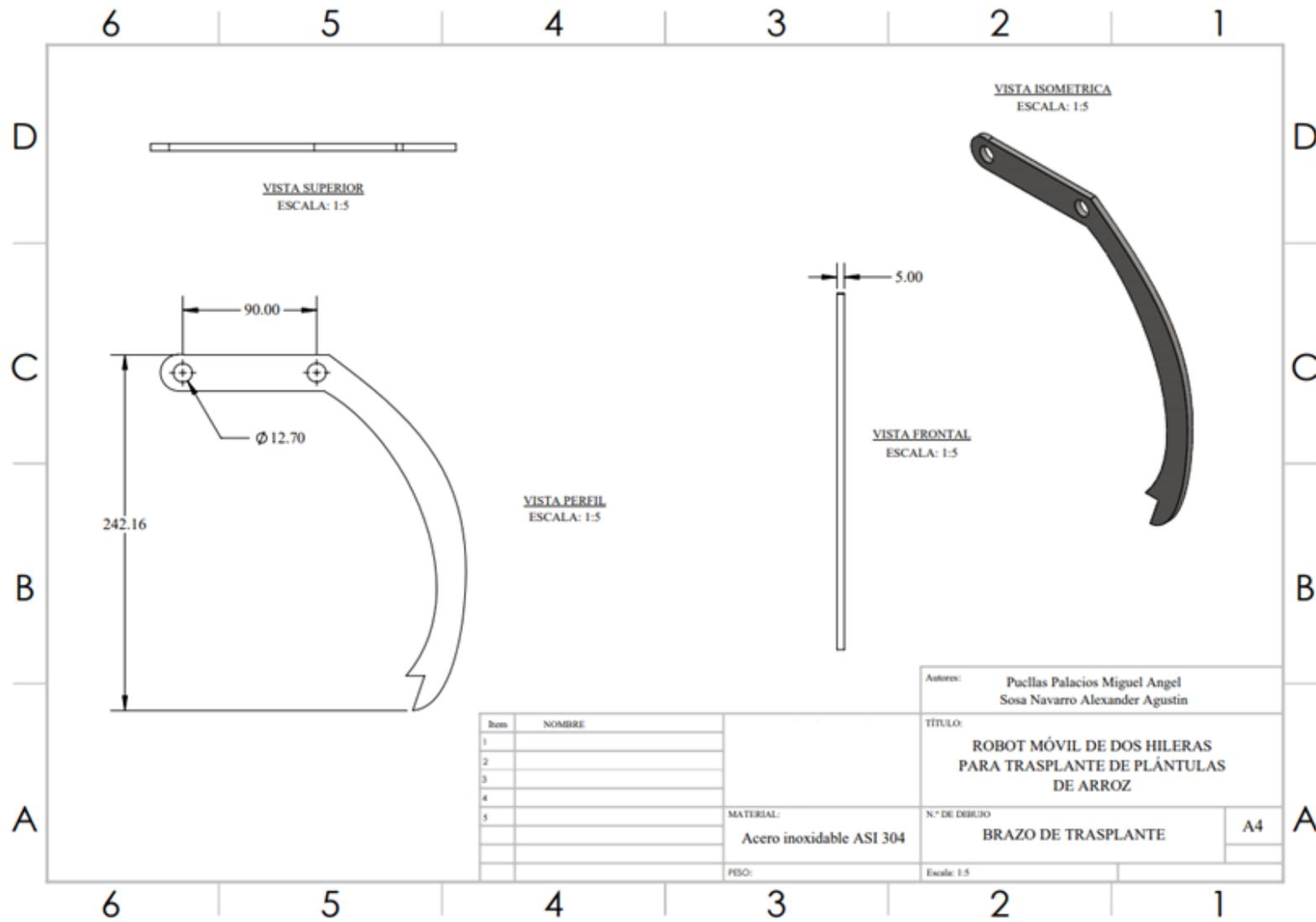
Quintero, A. (2015). Diseño e Implementación de un prototipo de Robot Recolector de Basura Automático para el uso interno de oficinas del departamento de gestión de desarrollo organizacional de la dirección general de registro civil identificación y cedula del ecuador (digercic - dgdo). (Tesis de Grado). Universidad Tecnológica Israel, Quito- Ecuador.

APÉNDICES

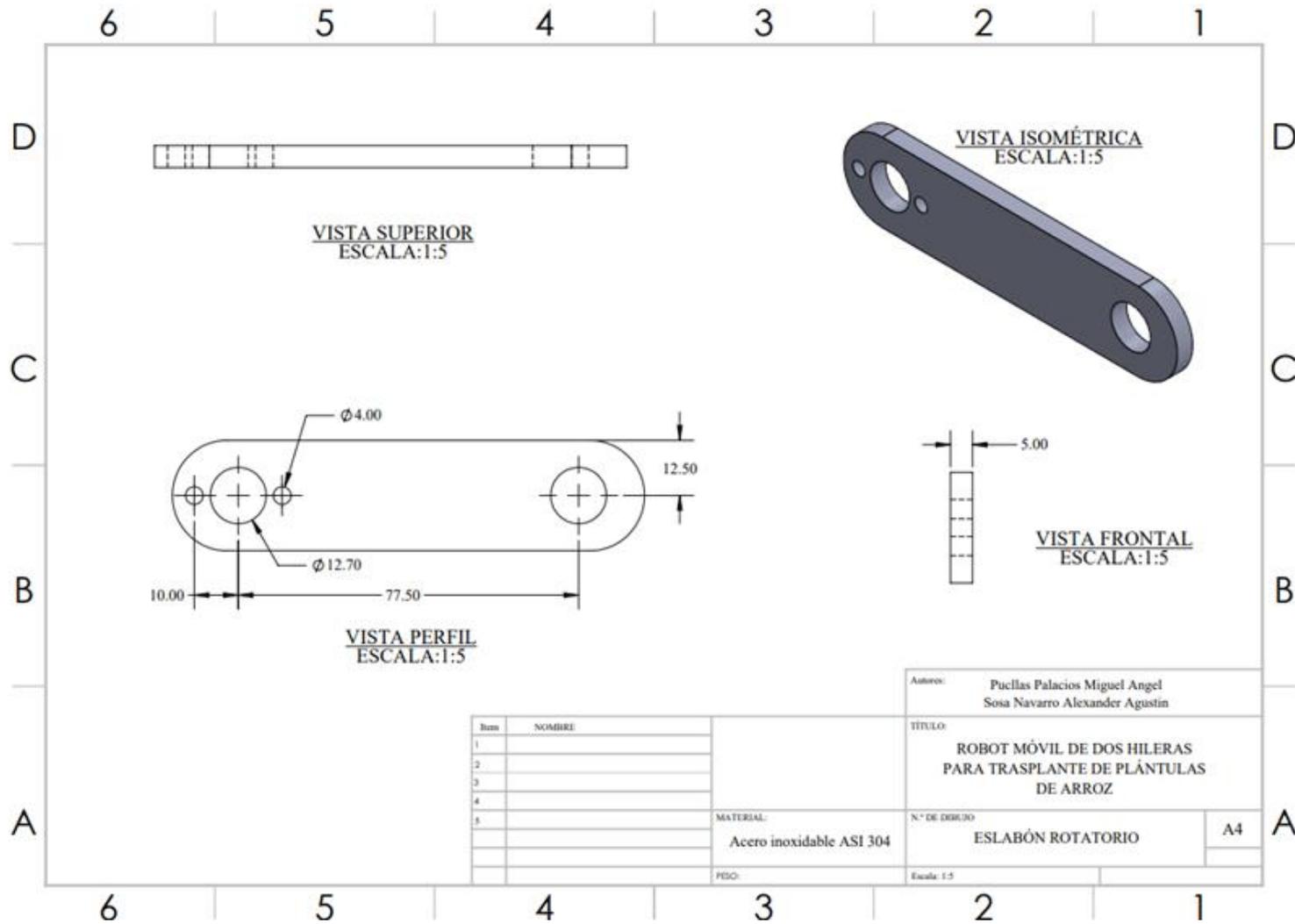
A1: SISTEMA DE TRASPLANTE



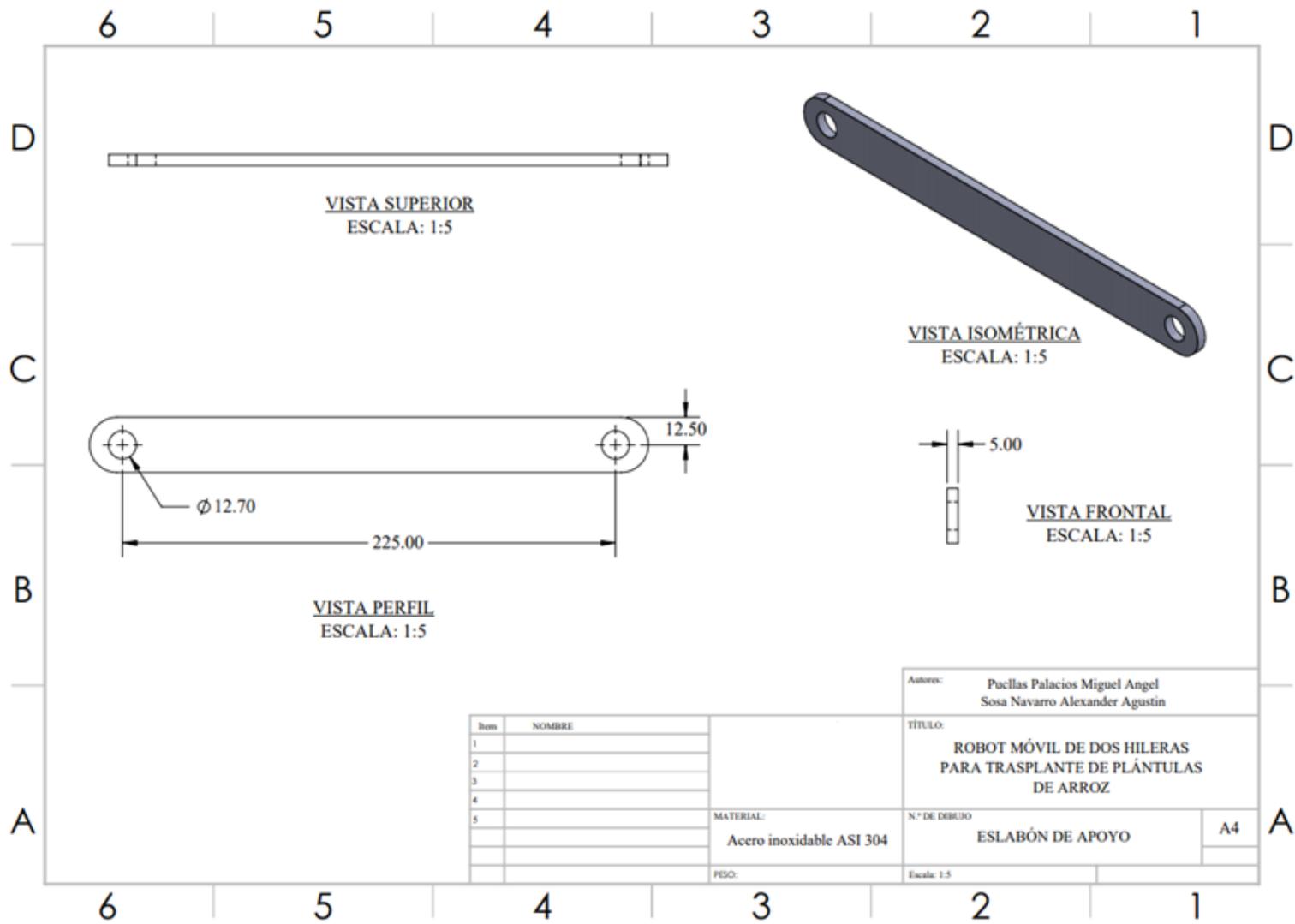
A2: BRAZO DE TRASPLANTE



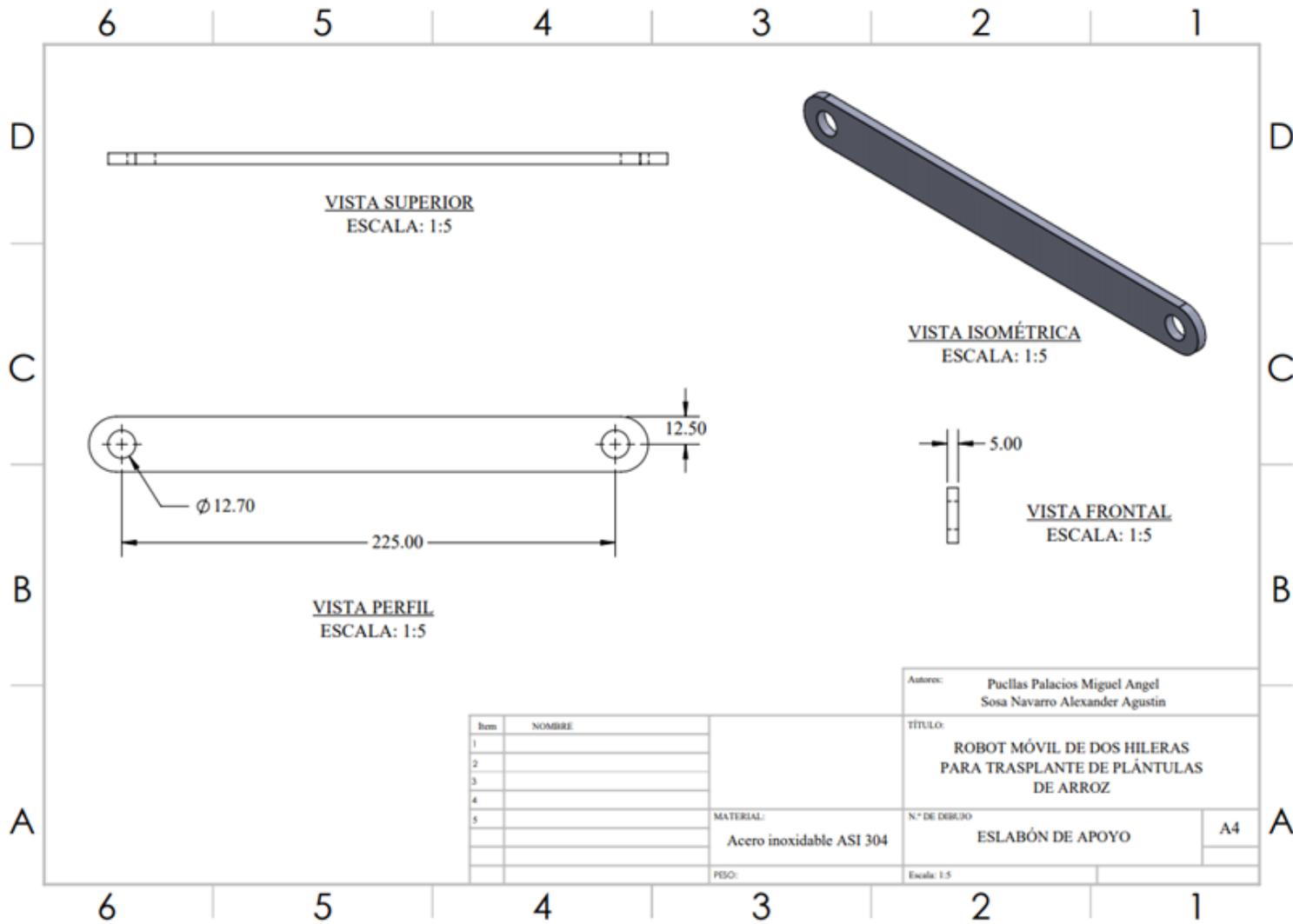
A3: ESLABÓN ROTATORIO



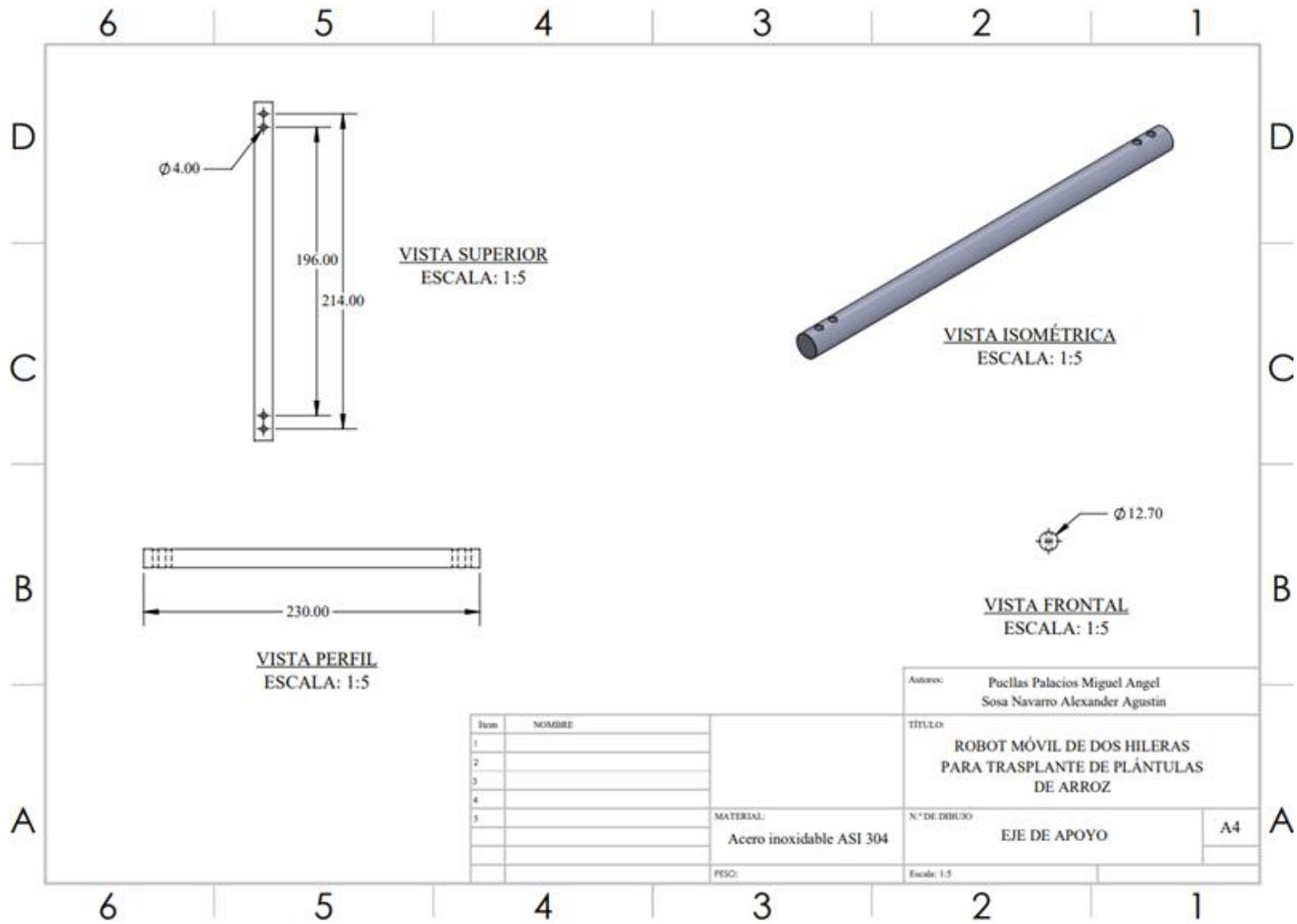
A4: ESLABÓN DE APOYO



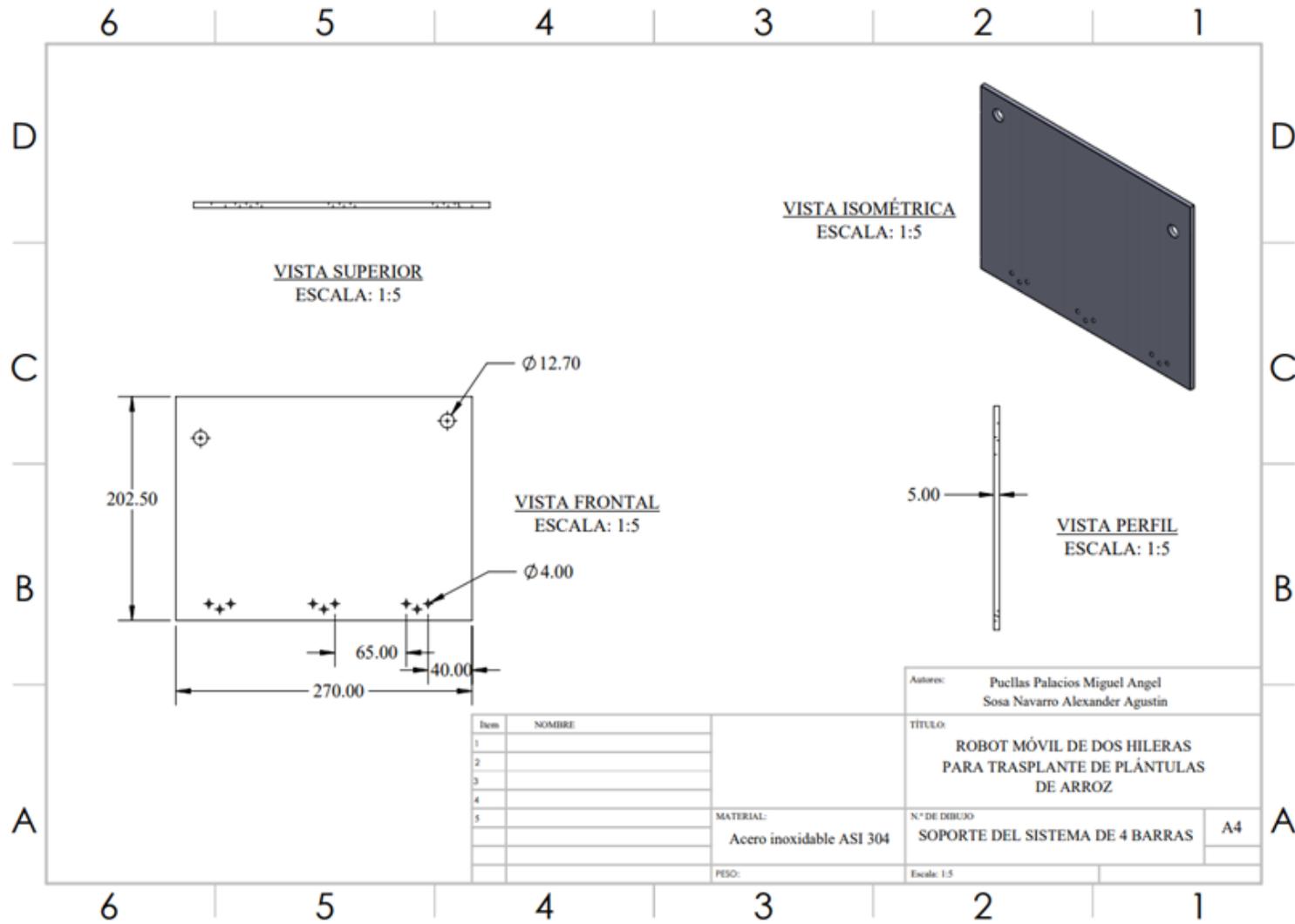
A5: EJE ROTATIVO



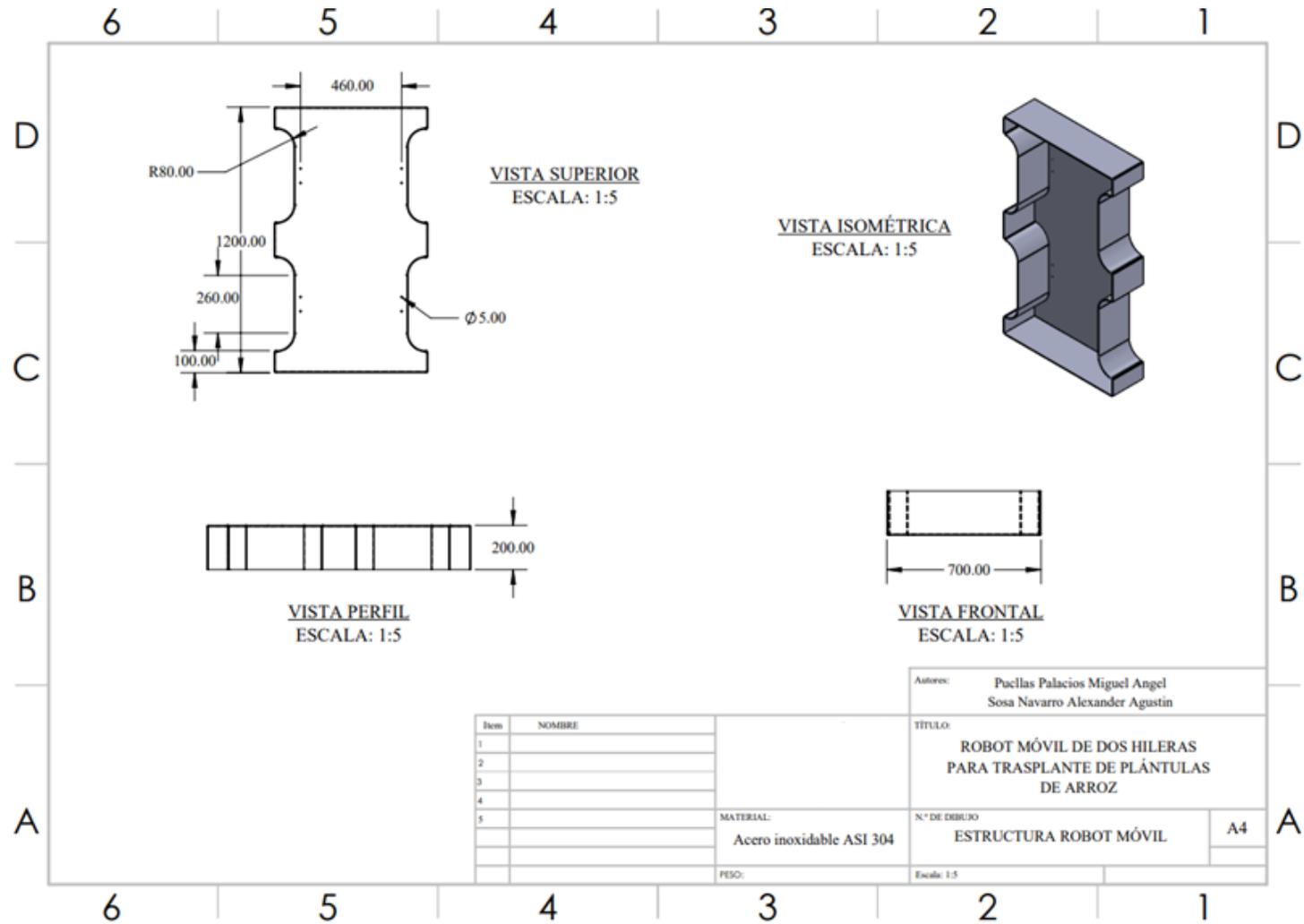
A6: EJE DE APOYO



A7: SOPORTE DEL SISTEMA DE 4 BARRAS



A8: ESTRUCTURA ROBOT MÓVIL



A9: ESTRUCTURA ROBOT MÓVIL

//VARIABLES DEL MOTOR IZQUIERDO

// variables para el tiempo de interrupción y cálculo de la velocidad motor izquierdo

volatile unsigned muestreoActualInterrupcionL = 0;

volatile unsigned muestreoAnteriorInterrupcionL = 0;

double deltaMuestreoInterrupcionL = 0;

// pin de conexión del encoder izquierdo

int encoderL = 2;

// pin de conexión para la llanta izquierda

int llantaL = 10;

// frecuencia de interrupción llanta izquierda

double frecuenciaL = 0;

// Velocidad angular de la llanta izquierda

double Wl = 0;

// velocidad Lineal de la llanta izquierda

double Vl = 0;

// contador ticks

int CL = 0;

// vector de almacenamiento de datos para promedio del tiempo de interrupciones

float vectorL[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

// distancia recorrida llanta izquierda

float Ldistancia = 0;

// ticks del encoder izquierdo

int Ltick = 0;

// ticks del encoder izquier anteriores

int LtickAnt = 0;

// diferencia del encoder izquierdo

int deltaLtick = 0;

ANEXOS:

ANEXO 1: Tabla de características del motor HYS A58SW-555B en sus versiones de 12V y 24V

Reduction ratio (коэффициент уменьшения)	Rated voltage (Номинальное напряжение)	No load		Load (Рабочая нагрузка)			Stall (Maximum)	
		Speed	Current	Speed	Current	Rated torque (крутящий момент)	Torque (крутящий момент)	Current
(1 : 00)	(V)	r/min (±10%)	(A)	r/min (±10%)	(A)	(kg.cm)	(kg.cm)	(A)
500	12	12	0.5	12	1.2	60	70	4.7
290	12	27	0.5	20	1.2	42	70	4.7
200	12	40	0.5	30	1.2	29	51	4.7
100	12	80	0.5	60	1.2	14.5	25	4.7
50	12	160	0.5	130	1.2	7.3	12.5	4.7
31	12	260	0.5	200	1.2	4.5	8	4.7
17	12	470	0.5	380	1.2	2.5	4.3	4.7
500	24	16	0.25	12	1.5	60	70	5.2
290	24	27	0.25	20	1.5	50	70	5.2
200	24	40	0.25	30	1.5	40	70	5.2
100	24	80	0.25	60	1.5	30	50	5.2
50	24	160	0.25	130	1.5	15	50	5.2
31	24	260	0.25	200	1.5	9.5	31	5.2
17	24	470	0.25	380	1.5	8	17	5.2

Sincere reminder

Your project load should not exceed the rated torque of the motor load, otherwise the life of the motor will be reduced.

Fuente: HYSMOTOR official Store. (s.f)

ANEXO 2: Principales características de Arduino Mega.

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Fuente: Arduino.cc (s.f).

ANEXO 3: Programación para calibrar el DMP del MPU6050

/* ===== LICENSE =====

I2Cdev device library code is placed under the MIT license
Copyright (c) 2011 Jeff Rowberg
Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
in the Software without restriction, including without limitation the rights
to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell
copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is
furnished to do so, subject to the following conditions:
The above copyright notice and this permission notice shall be included in
all copies or substantial portions of the Software.
THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY
KIND, EXPRESS OR
IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF
MERCHANTABILITY,
FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO
EVENT SHALL THE
AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM,
DAMAGES OR OTHER
LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR
OTHERWISE, ARISING FROM,
OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER
DEALINGS IN
THE SOFTWARE.

=====
*/
// I2Cdev and MPU6050 must be installed as libraries
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"
////////////////////// CONFIGURATION //////////////////////////////////////
//Change this 3 variables if you want to fine tune the sketch to your needs.
int buffersize=1000; //Amount of readings used to average, make it higher to get
more precision but sketch will be slower (default:1000)
int acel_deadzone=8; //Acelerometer error allowed, make it lower to get more
precision, but sketch may not converge (default:8)
int giro_deadzone=1; //Giro error allowed, make it lower to get more precision, but
sketch may not converge (default:1)
// default I2C address is 0x68
// specific I2C addresses may be passed as a parameter here
// AD0 low = 0x68 (default for InvenSense evaluation board)
// AD0 high = 0x69
//MPU6050 accelgyro;
MPU6050 accelgyro(0x68); // <-- use for AD0 high

```

int16_t ax, ay, az,gx, gy, gz;
int mean_ax,mean_ay,mean_az,mean_gx,mean_gy,mean_gz,state=0;
int ax_offset,ay_offset,az_offset,gx_offset,gy_offset,gz_offset;
////////////////////////////////// SETUP //////////////////////////////////////
void setup() {
  // join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
  Wire.begin();
  // COMMENT NEXT LINE IF YOU ARE USING ARDUINO DUE
  TWBR = 24; // 400kHz I2C clock (200kHz if CPU is 8MHz). Leonardo measured
250kHz.
  // initialize serial communication
  Serial.begin(115200);
  // initialize device
  accelgyro.initialize();
  // wait for ready
  while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer
  while (!Serial.available()){
    Serial.println(F("Send any character to start sketch.\n"));
    delay(1500);
  }
  while (Serial.available() && Serial.read()); // empty buffer again
  // start message
  Serial.println("\nMPU6050 Calibration Sketch");
  delay(2000);
  Serial.println("\nYour MPU6050 should be placed in horizontal position, with package
letters facing up. \nDon't touch it until you see a finish message.\n");
  delay(3000);
  // verify connection
  Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" :
"MPU6050 connection failed");
  delay(1000);
  // reset offsets
  accelgyro.setXAccelOffset(0);
  accelgyro.setYAccelOffset(0);
  accelgyro.setZAccelOffset(0);
  accelgyro.setXGyroOffset(0);
  accelgyro.setYGyroOffset(0);
  accelgyro.setZGyroOffset(0);
}
////////////////////////////////// LOOP //////////////////////////////////////
void loop() {
  if (state==0){
    Serial.println("\nReading sensors for first time...");
    meansensors();
    state++;
    delay(1000);
  }
  if (state==1) {
    Serial.println("\nCalculating offsets...");
    calibration();
  }
}

```

```

state++;
delay(1000);
}
if (state==2) {
meansensors();
Serial.println("\nFINISHED!");
Serial.print("\nSensor readings with offsets:\t");
Serial.print(mean_ax);
Serial.print("\t");
Serial.print(mean_ay);
Serial.print("\t");
Serial.print(mean_az);
Serial.print("\t");
Serial.print(mean_gx);
Serial.print("\t");
Serial.print(mean_gy);
Serial.print("\t");
Serial.println(mean_gz);
Serial.print("Your offsets:\t");
Serial.print(ax_offset);
Serial.print("\t");
Serial.print(ay_offset);
Serial.print("\t");
Serial.print(az_offset);
Serial.print("\t");
Serial.print(gx_offset);
Serial.print("\t");
Serial.print(gy_offset);
Serial.print("\t");
Serial.println(gz_offset);
Serial.println("\nData is printed as: acelX acelY acelZ giroX giroY giroZ");
Serial.println("Check that your sensor readings are close to 0 0 16384 0 0 0");
Serial.println("If calibration was succesful write down your offsets so you can set
them in your projects using something similar to mpu.setXAccelOffset(youroffset)");
while (1);
}
}
////////////////////////////////////// FUNCTIONS ////////////////////////////////////////
void meansensors(){
long i=0,buff_ax=0,buff_ay=0,buff_az=0,buff_gx=0,buff_gy=0,buff_gz=0;
while (i<(buffersize+101)){
// read raw accel/gyro measurements from device
accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);

if (i>100 && i<=(buffersize+100)){ //First 100 measures are discarded
buff_ax=buff_ax+ax;
buff_ay=buff_ay+ay;
buff_az=buff_az+az;
buff_gx=buff_gx+gx;
buff_gy=buff_gy+gy;

```

```

    buff_gz=buff_gz+gz;
}
if (i==(buffersize+100)){
    mean_ax=buff_ax/buffersize;
    mean_ay=buff_ay/buffersize;
    mean_az=buff_az/buffersize;
    mean_gx=buff_gx/buffersize;
    mean_gy=buff_gy/buffersize;
    mean_gz=buff_gz/buffersize;
}
i++;
delay(2); //Needed so we don't get repeated measures
}
}
void calibration(){
    ax_offset=-mean_ax/8;
    ay_offset=-mean_ay/8;
    az_offset=(16384-mean_az)/8;
    gx_offset=-mean_gx/4;
    gy_offset=-mean_gy/4;
    gz_offset=-mean_gz/4;
    while (1){
        int ready=0;
        accelgyro.setXAccelOffset(ax_offset);
        accelgyro.setYAccelOffset(ay_offset);
        accelgyro.setZAccelOffset(az_offset);
        accelgyro.setXGyroOffset(gx_offset);
        accelgyro.setYGyroOffset(gy_offset);
        accelgyro.setZGyroOffset(gz_offset);
        meansensors();
        Serial.println("...");
        if (abs(mean_ax)<=acel_deadzone) ready++;
        else ax_offset=ax_offset-mean_ax/acel_deadzone;
        if (abs(mean_ay)<=acel_deadzone) ready++;
        else ay_offset=ay_offset-mean_ay/acel_deadzone;
        if (abs(16384-mean_az)<=acel_deadzone) ready++;
        else az_offset=az_offset+(16384-mean_az)/acel_deadzone;
        if (abs(mean_gx)<=giro_deadzone) ready++;
        else gx_offset=gx_offset-mean_gx/(giro_deadzone+1);
        if (abs(mean_gy)<=giro_deadzone) ready++;
        else gy_offset=gy_offset-mean_gy/(giro_deadzone+1);
        if (abs(mean_gz)<=giro_deadzone) ready++;
        else gz_offset=gz_offset-mean_gz/(giro_deadzone+1);
        if (ready==6) break;
    }
}
}

```

Fuente: Ródenas (2014).