



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

**"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ROBOT TETRÁPODO SEMBRADOR DE SEMILLAS
PARA LEGUMINOSAS"**

AUTOR: DÍAZ ARAQUE, RICARDO DAVID

DIRECTOR: ING. CORTEZ PAZMIÑO, BYRON HERNAN

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TETRÁPODO SEMBRADOR DE SEMILLAS PARA LEGUMINOSAS**”, fue realizado por el señor: *Díaz Araque, Ricardo David* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 agosto del 2018

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Byron Cortez', escrita sobre una línea horizontal punteada.

ING. Cortez Pazmiño, Byron Hernán.

CC. 171447108-1

DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Díaz Araque, Ricardo David*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TETRÁPODO SEMBRADOR DE SEMILLAS PARA LEGUMINOSAS***" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 21 de agosto de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ricardo David Díaz Araque', written over a horizontal dashed line.

Díaz Araque, Ricardo David

C.C.: 172053435-1



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Díaz Araque, Ricardo David* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TETRÁPODO SEMBRADOR DE SEMILLAS PARA LEGUMINOSAS" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 21 de agosto de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Ricardo David Díaz Araque". La firma está sobre una línea horizontal punteada.

Díaz Araque, Ricardo David

C.C.: 172053435-1

DEDICATORIA

Dedico todo mi esfuerzo a Dios todo poderoso y a todos los miembros que componen mi familia.

Para mis padres Ricardo y Martha por haberme apoyado en cada momento, con los recursos necesarios para permitirme surgir y seguir adelante, por toda su sabiduría y por la confianza, que depositaron en mí, pero sobre todo por su amor incondicional.

A mis hermanos Andy y Ely, por ser mis segundos padres, por brindarme el sustento y apoyo que tanto necesitaba, en todo momento, el cariño que siempre me brindaron fue parte importante del día a día durante el transcurso de mi carrera universitaria y mi vida.

Gracias por ser parte de mi vida.

Ricardo David

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todos los miembros de mi familia, que me brindaron un soporte, y fueron el empuje para seguir adelante.

A los profesores, que supieron la manera de guiarme de manera cordial y brindarme sus anécdotas y conocimientos.

A mis compañeros y amigos con los pasé buenos y malos ratos.

A todos aquellos que conforman el área administrativa, biblioteca y técnicos, y todos aquellos que no se mencionan por vanos prejuicios, señores y señoras del área de servicios, gente importante y trabajadora que brindaron su granito de arena para que la ESPE sea mejor y yo sea parte de ella.

Ricardo David

ÍNDICE DE REQUISITOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	4
1.7. ALCANCE.....	5
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.....	8
2.1.1 RESEÑA HISTÓRICA.....	8
2.1.2 INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ROBÓTICA.....	10
2.1.3 RESPONSABILIDAD EN LA ROBÓTICA.....	11
2.1.4 INTRODUCCIÓN DE LA ROBÓTICA EN LAS LABORES AGRÍCOLAS.....	13
2.1.5 ROBOTS DE CUATRO PATAS.....	13
2.1.6 ESPECIFICACIONES Y NECESIDADES PARA LOS ROBOTS EN LA INDUSTRIA AGRÍCOLA.....	17
2.1.7 NORMA ISO 9283.....	19
2.1.8 NORMA ISO-UNE-EN 4254/1.....	20
2.1.9 ARADO DE TIERRA.....	20
2.1.10 SECCIONES DE SURCOS.....	21
2.1.11 DISEÑOS DE SEMBRADORAS.....	24
2.1.12 REPERCUSIONES ECONÓMICAS.....	26
2.1.13 MODELADO DE ROBOT.....	28
2.1.14 CINEMÁTICA DIRECTA.....	28

2.1.15 EL PROBLEMA CINEMÁTICO DIRECTO.....	28
2.1.16 MANIPULADORES INDUSTRIALES.....	29
CAPÍTULO III	31
3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	31
3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO CASA DE LA CALIDAD DE PLATAFORMA STEWART ..	31
3.2 MÓDULO 1. ESTRUCTURA	33
3.3 SUBSISTEMAS 1. EXTREMIDADES	34
3.3.1 ACERCAMIENTO AL FUNCIONAMIENTO DE LAS PIERNAS DE LOS SALTAMONTES Y LAS ARAÑAS.....	34
3.3.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA EXTREMIDAD.....	36
3.3.3 CINEMÁTICA DIRECTA	37
3.3.4 CINEMÁTICA INVERSA DEL MÉTODO ANALÍTICO	40
3.3.5 CINEMÁTICA INVERSA (MÉTODO GEOMÉTRICO).....	42
3.3.6 ANÁLISIS DINÁMICO DE LA EXTREMIDAD.....	45
3.3.7 ANÁLISIS DEL PRIMER ESLABÓN- HOMBRO	46
3.3.8 ANÁLISIS DEL SEGUNDO ESLABÓN - FÉMUR.....	46
3.3.9 ANÁLISIS DEL TERCER ESLABÓN - TIBIA.....	47
3.3.10 ANÁLISIS DE ENERGÍA TOTAL	49
3.3.11 TEOREMA LAGRANGIANO.....	49
3.3.12 MODELO DEL TORQUE DEL ESLABÓN 1	50
3.3.13 MODELO DEL TORQUE DEL ESLABÓN 2	50
3.3.14 ANÁLISIS DE POSICIÓN.....	51
3.3.15 SELECCIÓN DE MATERIAL DE LA ESTRUCTURA.....	56
3.3.16 SELECCIÓN DE SERVOMOTORES	60
3.3.17 SELECCIÓN DE BATERÍA.....	64
3.3.18 CÁLCULO DE POTENCIA NECESARIA PARA IMPULSAR EL TORNILLO SIN FIN.	68
3.3.19 MATERIALES DE CLASE II	68
3.3.20 POTENCIA DE ACCIONAMIENTO	72
3.3.21 TORQUE NECESARIO PARA MOVER EL MECANISMO DE PERFORACIÓN.....	73
3.3.22 FACTOR DE SEGURIDAD.....	75
3.3.23 MÓDULO DE BALASTO	79
3.3.24 MÓDULO 2. LOCOMOCIÓN	82
3.3.25 INFORMACIÓN TARJETA DE CONTROL	85
3.3.26 MÓDULO DE CONTROL PARA SERVOS.....	86
CAPÍTULO IV.....	89
4. IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	89
4.1 IMPLEMENTACIÓN	89
4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	92
4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SIN CARGA.....	92
4.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA	93
4.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN CAMPO.....	94
4.6 CORRECCIÓN DE ERRORES.....	95
4.7 PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO EN DIFERENTES TERRENOS.....	99

CAPÍTULO V	100
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1 CONCLUSIONES	100
5.2 RECOMENDACIONES.....	101
ANEXOS	108
ANEXO A	108
ANEXO B.....	109
ANEXO C.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Calibres de las semillas de maíz.</i>	22
Tabla 2. <i>Variaciones Normales en las Profundidades para la Siembra de los Cultivos de Referencia.</i>	23
Tabla 3. <i>Tipo de articulaciones.</i>	29
Tabla 4. <i>Ponderaciones casa de la calidad.</i>	32
Tabla 5. <i>Módulos de operación.</i>	33
Tabla 6. <i>Parámetros de Denavit & Hatenberg de la extremidad del robot Hexápodo.</i>	37
Tabla 7. <i>Análisis de datos de entrada de posición.</i>	54
Tabla 8. <i>Ángulos abortos y cruzados que se forman en las cuatro barras.</i>	54
Tabla 9. <i>Alternativas de material para la estructura.</i>	56
Tabla 10. <i>Ponderación de criterios para la selección del material de las extremidades.</i>	57
Tabla 11. <i>Evaluación de las alternativas según el costo.</i>	58
Tabla 12. <i>Evaluación de las alternativas respecto a las propiedades mecánicas.</i>	58
Tabla 13. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la facilidad de reciclaje.</i>	58
Tabla 14. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la disponibilidad en el mercado.</i>	59
Tabla 15. <i>Evaluación de las alternativas respecta a su facilidad de manufactura.</i>	59
Tabla 16. <i>Resultados de la prioridad de materiales a ser usados en las extremidades.</i>	59
Tabla 17. <i>Alternativas de servomotores.</i>	60
Tabla 18. <i>Ponderación de criterios para la selección de los servomotores.</i>	61
Tabla 19. <i>Evaluación de las alternativas respecto al costo.</i>	61
Tabla 20. <i>Evaluación de las alternativas respecto torque.</i>	62
Tabla 21. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la velocidad.</i>	62
Tabla 22. <i>Evaluación de las alternativas respecto al peso.</i>	62

Tabla 23. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la fácil sujeción.</i>	63
Tabla 24. <i>Evaluación de las alternativas respecto al tamaño.</i>	63
Tabla 25. <i>Alternativas de baterías.</i>	64
Tabla 26. <i>Ponderación de criterios para la selección de la batería.</i>	65
Tabla 27. <i>Evaluación de las alternativas respecto al costo.</i>	65
Tabla 28. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la densidad de almacenamiento.</i>	65
Tabla 29. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la descarga por funcionamiento.</i>	66
Tabla 30. <i>Evaluación de las alternativas respecto a la Vida útil.</i>	66
Tabla 31. <i>Resultados de prioridad para la selección de la batería.</i>	67
Tabla 32. <i>Voltajes y amperajes necesarios para los elementos del robot.</i>	67
Tabla 33. <i>Velocidad de giro recomendada.</i>	68
Tabla 34. <i>Materiales de Clase I.</i>	68
Tabla 35. <i>Materiales de Clase II.</i>	69
Tabla 36. <i>Materiales de Clase III.</i>	69
Tabla 37. <i>Valores del coeficiente de relleno.</i>	70
Tabla 38. <i>Capacidad de transporte debido a la inclinación.</i>	70
Tabla 39. <i>Capacidad de transporte del tornillo sin fin:</i>	71
Tabla 40. <i>Coeficiente de relleno.</i>	71
Tabla 41. <i>Resistencia del terreno.</i>	73
Tabla 42. <i>Factor de seguridad</i>	75
Tabla 43. <i>Valores del módulo de balasto.</i>	79
Tabla 44. <i>Patrones de locomoción utilizados.</i>	88
Tabla 45. <i>Estabilidad en función de la cantidad de pasos que se ejecutan en la programación.</i>	96
Tabla 46. <i>Cantidad de pasos que se pueda ejecutar y porcentaje de memoria disponible.</i>	96
Tabla 47. <i>Distancia programada y la distancia ejecutada realmente.</i>	97
Tabla 48. <i>Muestreo del tamaño de grano.</i>	109
Tabla 49. <i>Descripción de conexión pines Arduino.</i>	113
Tabla 50. <i>Descripción de conexión pines módulo controlador de servos.</i>	114
Tabla 51. <i>Descripción de conexión pines acelerómetro.</i>	115
Tabla 52. <i>Descripción de conexión pines módulo bluetooth.</i>	116
Tabla 53. <i>Descripción de conexión pines sensores ultrasónicos.</i>	116

Tabla 54. Descripción de conexión pines sensor infrarrojo.....	117
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pendiente máxima de diseño.....	6
Figura 2. Obstáculo máximo	6
Figura 3. Robot araña diseño Epheastus-R1.	13
Figura 4. Prueba de estabilidad de un robot zoomórfico.....	14
Figura 5. Diseño robot tetrápodo modelo vigilante de corrales.	14
Figura 6. Robot zoomórfico tetrápodo canido de vigilancia.	15
Figura 7. Robot zoomórfico tetrápodo de aplicación militar ruso modelo (Rys) planteado para el transporte de armas o tareas de vigilancia.....	15
Figura 8. Robot zoomórfico tetrápodos tipo molusco con capacidad de camuflaje.....	16
Figura 9 . Robot zoomórfico con ruedas y articulaciones	16
Figura 10. Navegación en un campo de maíz con líneas en curva.....	18
Figura 11. Navegación avanzada según un patrón complejo	19
Figura 12. Patrón dispersión.....	19
Figura 13. Patrón dispersión.....	19
Figura 14. Surcos en la tierra para sembrío	21
Figura 15. Tipos más comunes de herramientas para abrir surcos.	21
Figura 16. Dimensiones del surco.	22
Figura 17. Equipos de plantación manual para hacer hoyos.	23
Figura 18. Planteamiento del método de siembra del robot tetrápodo.	24
Figura 19. Sembradora volumétrica mecánica acarreada por un tractor.	24
Figura 20. Sembrador mono-grano.	25
Figura 21. dosificador siembra a chorrillo.	25
Figura 22. Rodillo escalonado.	26
Figura 23. Rodillo Chevron.....	26
Figura 24. Dosificador de placa horizontal.	26
Figura 25. Fotografía de tres patas de un lado de un saltamontes.....	34
Figura 26. Fotografía disección saltamontes.	34
Figura 27. El sistema de palanca.	35
Figura 28. Diagrama ejemplificado de los músculos y tendones a comparación de las extremidades del robot articulado.....	35

Figura 29. Módulos del robot.	36
Figura 30. Módulos del robot.	37
Figura 31. Traslación del sistema de referencia de la articulación de la coxa al centro del cuerpo.....	40
Figura 32. Vista superior de extremidades del robot.....	43
Figura 33. Diagrama Triangulo rectángulo.	43
Figura 34. Numeración del sistema de cuatro barras.	50
Figura 35. movimiento continuo entre cuatro barras.....	51
Figura 36. Determinación de ángulos reales en el robot por el metodo de cuatro barras.	52
Figura 37. Ángulo de desplazamiento de 25 grados, generado por la estructura del brazo, sin intercepciones, gracias al cálculo de barras.	54
Figura 38. Diagrama momento de fuerza.	55
Figura 39. Distancia máxima del servo al punto más extremo de la pata es (D1)	55
Figura 40. Distancia máxima del servo al punto más extremo del hombro	56
Figura 41. Conjunto Motor - Tornillo sin fin, usado en el robot.....	73
Figura 42. Ángulos del Tubo.....	73
Figura 43. Diámetros mecanismo Tubo.	73
Figura 44. Longitud mázima Tubo.	73
Figura 45. Sumatorias de fuerzas en la manivela	74
Figura 46. Captura de pantalla SolidWorks, Ensamble total robot.	77
Figura 47. Captura de pantalla SolidWorks, tibia robot.....	77
Figura 48. Captura de pantalla SolidWorks, tibia robot.....	78
Figura 49. Captura de pantalla SolidWorks, refuerzo de tibia robot.....	78
Figura 50. Captura de pantalla SolidWorks, fémur robot.	78
Figura 51. Captura de pantalla SolidWorks, fémur robot.	79
Figura 52. Donde la masa del robot más la masa de la carga total es igual $M1=2.92\text{kg}$	80
Figura 53. Distribución del peso en un paso.	80
Figura 54. Análisis carga normal y axial carga máxima femur1.....	81
Figura 55. Análisis carga normal y axial carga máxima femur2.....	81
Figura 56. Análisis carga normal y axial carga máxima hombro.....	81
Figura 57. Análisis carga normal y axial carga máxima tibia.	82

Figura 58. Arquitectura del sistema del robot tetrapodo.	82
Figura 59. Diagrama de flujo del programa.	83
Figura 60. Pantallas de inicio de la aplicación	84
Figura 61. Pantallas de control.	84
Figura 62. Pantalla de instrucciones.	84
Figura 63. Pantallas de aviso de advertencia.	85
Figura 64. Unión de dos pantallas para evitar error de desconexión.	85
Figura 65. Tarjeta de control Arduino Mega.	86
Figura 66. Módulo de control servomotores.	86
Figura 67. Sensor Ultrasónico HC SR04.	86
Figura 68. Sensor Ultrasónico HC SR04.	87
Figura 69. Módulo de comunicación Bluetooth.	87
Figura 70. Secuencia de movimiento robot.	87
Figura 71. Silo de ingreso del grano.	89
Figura 72. Placa superior que sujeta los sensores y el silo de ingreso del grano.	89
Figura 73. Túnel de ingreso y conteo sujeto a la palca inferior.	89
Figura 74. Garra dispensadora sujeta a la palca inferior.	90
Figura 75. Placa inferior que sostiene todos los componentes intermedios.	90
Figura 76. Armazón del hombro que enlaza con los eslabones finales del robot.	90
Figura 77. Extremidades finales que conforman las patas del robot.	90
Figura 78. Brazo que conecta con el tubo para perforar.	91
Figura 79. Tubo que perfora el hueco de deposición de la semilla.	91
Figura 80. Ensamblaje del armazón.	91
Figura 81. Ensamblaje de los servomotores.	91
Figura 82. Comprobación del funcionamiento de la máquina.	92
Figura 83. Pruebas Programación de los movimientos del robot con 160 pasos.	97
Figura 84. Programación del movimiento con el programa con menor número de caídas y menor consumo de memoria.	97
Figura 85. Caída provocada por inestabilidad.	98
Figura 86. Línea de Tiempo para la selección de las extremidades	98
Figura 87. Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie liza.	99
Figura 88. Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie con césped cortado.	99

<i>Figura 89.</i> Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie arenosa.	99
<i>Figura 90.</i> Diagrama de circuitos del robot.	108
<i>Figura 91.</i> Diagrama placa impresa, circuito de conexión de los sensores con el Arduino Mega.	108
<i>Figura 92.</i> Diámetro de las partes del maíz considerando.	112

RESUMEN

El proyecto presenta la realización del diseño y construcción de un prototipo de robot tetrápodo como una herramienta didáctica para la siembra de granos. que dosifica, detecta e introduce semillas en tierras tratadas para cultivos de leguminosas, en una profundidad específica para la gramínea, utilizando como forma de locomoción un robot tetrapodo, que facilitando su traslado y desplazamiento ante obstáculos. El diseño de las extremidades del robot permite llegar a lugares de difícil acceso. Este desarrollo pretende convertirse en una herramienta útil para aquellos trabajos en los que los equipos y formas convencionales no son eficaces. Sabiendo que en cada forma de siembra como: voleo, en línea, en hoyos, semilleros, etc. existen pérdidas. El objetivo principal de la máquina es identificar las ventajas y falencias que puede tener esta herramienta de siembra al incorporarse a nuestro medio a través de pruebas de funcionamiento.

PALABRA CLAVE:

- **PROTOTIPO**
- **ROBOT TETRÁPODO**
- **HERRAMIENTA**
- **SEBRADOR**

ABSTRACT

The project presents the design and construction of a prototype of a tetrapod robot as a didactic tool for sowing grains. It doses, detects and introduces seeds in lands treated for leguminous crops, in a specific depth for the grass, using as a form of locomotion a tetrapod robot, which facilitates their transfer and displacement before obstacles. The design of the robot's extremities makes it possible to reach places that are difficult to access. This development aims to become a useful tool for those jobs in which conventional equipment and forms are not effective. Knowing that in each form of sowing as: broadcast, in line, in holes, seedbeds, etc. there are losses. The main objective of the machine is to identify the advantages and shortcomings that this sowing tool can have when incorporated into our environment through operational tests.

KEY WORD:

- **PROTOTYPE**
- **TETRAPOD ROBOT**
- **TOOL**
- **SEED DRILL**

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo trata la problemática que aborda el presente proyecto de tesis, relatando de forma concreta las áreas que se ven involucradas en este contexto, al referimos a su aplicabilidad y las soluciones que ella aborda. En un entorno actual se describirá las carencias que sufre el Ecuador, con respecto a la agricultura, remarcado la importancia de realizar un aporte técnico y tecnológico en dicha área.

1.1. Problemática y motivación

En el Ecuador, al tener una topografía muy accidentada debido a que nos encontramos en la cordillera de los Andes, las faldas de los volcanes quebradas y laderas, forma parte de nuestra mejor tierra cultivable, lo cual genera un problema al implementar maquinaria pesada o de sembrado continuo, por lo que se busca una mejor forma de locomoción para que la maquinaria pueda despasarse o adaptarse y trabajar en pendientes o terrenos pequeños, de difícil acceso.

En los últimos años la necesidad de generar nuevos sistemas de locomoción ha tenido como resultados grandes avances en la robótica, con precios cada vez más accesibles, disminuyendo costos de producción y aumentando la eficiencia en los procesos monótonos, que por lo general son riesgosos y generan pérdidas debido al error humano. Fomentado el desarrollo de dispositivos capaces de cumplir con sofisticadas tareas en tiempos reducidos.

El Gobierno ecuatoriano hoy en día impulsa la matriz productiva, ayudado en el desarrollo de investigaciones que generen dispositivos capaces de suplir o ayudar a las personas a realizar tareas que pueden tener una mejor productividad.

Por lo que el presente proyecto se busca la fabricación de un equipo que permita realizar estos estudios dentro de la universidad, colaborando con la institución para el continuo desarrollo de la Carrera de Mecatrónica, para saber la viabilidad de fabricar un robot

comercial autónomo, que pueda depositar semillas en ubicaciones pre programadas, que se encuentre en lugares de difícil acceso. Compitiendo con herramientas que actualmente se operan en el Ecuador, que son operadas de forma manual o netamente rudimentaria.

1.2. Antecedentes

Existen desafíos a considerar en el desarrollo de los robots en las actividades desde la siembra hasta la cosecha y en cada cultivo, con variaciones, por ejemplo: el color, forma y ubicación de los frutos aun tratándose de una misma especie hortícola, y el complejo entorno: los desniveles de suelo, variación de la luz, lluvia, polvo, etc. (Morales García, 2013, p. 17).

La importancia de los robots en la agricultura debido a la demanda de alimentos, se ha convertido en un factor preponderante en la sociedad, según la compañía JOHN DEERE, "hoy en el mundo necesita alimentar a 7,000 millones de personas y 200 millones de personas se suman a ese número diariamente" (John Deere, 2016), por lo que el sector agrícola depende de la actualización de su maquinaria y mecanismos de automatización. En estos años se han realizado grandes avances en los sistemas de locomoción. En los que los robots articulados son una solución para sortear obstáculos, dentro de los cuales los robots tipo araña o zoomórficos comprenden una parte central de investigaciones de locomoción debido a su eficiencia. En busca de crear un diseño que se adapte a la topografía irregular existen varios diseños zoomórficos que han encontrado adecuados para adaptarse a terrenos difíciles.

La introducción de la robótica en las labores agrícolas de campo constituye la vanguardia de la agricultura de precisión y supone un cambio de paradigma en la investigación y el desarrollo de maquinaria. Actualmente la mayor parte de las prácticas de producción en campo se centran en la utilización de equipos de gran potencia, pesados, costosos y con grandes capacidades de trabajo. Sin embargo, algunas universidades y centros de investigación están tratando de aprovechar las fenomenales posibilidades que ofrecen los avances en microelectrónica, tecnologías de la información y sensorial, para rediseñar los equipos agrícolas¹. Se persigue así la fabricación de vehículos robotizados

ligeros, inteligentes, autónomos y relativamente baratos. (Barreiro Elorza & Diezma Iglesias, La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro, 2006, p. 1)

Los robots araña, destinados a la "exploración/reconocimiento de lugares de difícil acceso o peligrosos para seres humanos u otro tipo de vehículos (robots dotados de ruedas u orugas)" (García Villaseñor, 2007), (...), por lo que son capaces "de desplazarse sobre cualquier tipo de superficie" (García Villaseñor, 2007).

Si bien las investigaciones aplicadas sobre los robots agrícolas comenzaron hace más de 25 años, ha sido recientemente cuando el desarrollo de diferentes "tecnologías facilitadoras" asociadas a las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicaciones) han permitido un progreso sustancial en su desarrollo, (John Deere, 2016).

De lo que se considera la evolución de los robots artrópodos o con articulaciones, a la manera de control que tiene a una mejora continua y sustancial en su manera de estabilizarse. Como uno de los ejemplos más promisorios en la industria de los robots artrópodos zoomórficos tenemos a los avances que tuvo la milicia norteamericana con un robot de carga táctico, destinado para transporte de material para tropas, que demuestra la enorme capacidad que tiene un robot en terreno difícil, gracias a la variedad de sistemas de control de estabilidad que permiten a los robots átropos permanecer en pie bajo pruebas muy demandantes.

1.3. Justificación e importancia

La justificación de este proyecto se basa en que actualmente la producción agropecuaria en el mundo enfrenta el gran reto, generar alimentos suficientes para las futuras generaciones, sin menoscabar en ambiente o las interacciones sociales, es por esto que la tecnología debe ser creativa e innovadora para contribuir incluso a mejorar el ambiente en el que se desarrolla. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015).

En Ecuador "el gasto del gobierno en la agricultura ha sido tradicionalmente bajo, contradictoriamente a la importancia en aporte a la economía y generación de divisas y empleo; apenas el 3% promedio anual en la última década (...). (MORENO ALBAN,

2012, p. 76). El principal objetivo de Ecuador debe ser mejorar la productividad, ésta es la herramienta más eficaz y factor determinante para aumentar el nivel de vida de las personas y el crecimiento continuo es la fuente central y perpetua para acumular bienestar.

Hay que tener presente que las mejoras en la tasa de productividad. (MORENO ALBAN, 2012, p. 83). Por lo que se debe implementar soluciones de bajo costo, para mejorar la producción agrícola, utilizando maquinaria que pueda elaborarse de manera local, como el uso de robots en pequeña escala, que podría ayudar a mejorar las condiciones laborales de nuestros agricultores e incrementar la producción y competitividad de nuestros sembríos.

1.4. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un equipo robotizado prototipo y una herramienta para la siembra de semillas.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar y diseño exoesqueleto mecánico y electrónico.
- Construir los componentes necesarios para la implementación del equipo agrícola.
- Montaje y ensamblado de partes.
- Implementar circuitos de acondicionamiento para lograr que el sistema sea estable y robusto.
- Creación del HMI para sistemas Android 6.0.1 que permita modificación de parámetros de dirección, distancia y velocidad de la célula robótica.
- Verificar el correcto funcionamiento del equipo mediante pruebas para asegurar que la máquina cumpla con los objetivos planteados.

1.6. Estructura del documento

En el capítulo uno se tratará de sintetizar la motivación y los antecedentes que dieron lugar para el diseño y la construcción de la herramienta y la célula robótica como tal.

Continuaremos con los objetivos a lograr y una breve reseña del alcance que tiene el proyecto

En el capítulo dos se dará a conocer los temas requeridos para la realización de la célula robótica. Se denota una reseña histórica de los robos artrópodos y su impacto en el mundo, las técnicas y maquinarias que se han requerido para la siembra, el papel que han tenido los robots en algunas de estas actividades y la forma de control de la célula robótica que se plantea en este proyecto.

En el capítulo tres se proponen posibles soluciones a las necesidades que presenta la elaboración del proyecto de tesis. Se refleja un estudio empleando la técnica de la Casa de la calidad, en el que se busca satisfacer los requerimientos del cliente, que posteriormente expondrá la mejor solución posible a implementar en la célula robótica propiamente dicha.

En el capítulo cuatro se describe los pasos de diseño y construcción de la célula robótica a la cual se le adapta la herramienta de sembrado y los resultados que se ha tenido en la implementación del sistema, Además se describen los pasos y métodos en las etapas del sistema.

En el capítulo cinco se plasman las conclusiones finales de proyecto y recomendaciones que se encontraron a través de la elaboración del mismo, al realizar los estudios pertinentes, tanto el diseño y la construcción.

1.7. Alcance

El alcance de este proyecto es el diseño y construcción de un prototipo robótico programable y una herramienta tubular de penetración de terreno agrícola, acoplada a un mecanismo sembrador de granos de maíz seco, de un promedio de ocho milímetros cúbicos.

Al ser un prototipo robótico diseñará con normas de seguridad para sistemas colaborativos. Para no ponerse en riesgo así mismo o a los demás. (ISO/TS 15066:2016). El sistema de alimentación de maíz seco se adaptará en el dorso del robot dependiendo

de la distribución final de la batería. La célula robótica soportará una carga máxima de una libra de maíz seco. Para entablar comunicación con la célula el sistema Bluetooth tendrá un rango máximo de veinte metros. Según la norma IEEE 802.15.3.

El robot podrá sortear una pendiente máxima de diez grados. Ubicado en el subsistema de alimentación. Su velocidad máxima de desplazamiento lineal será de tres metros por minuto, como se muestra en la Figura 1.

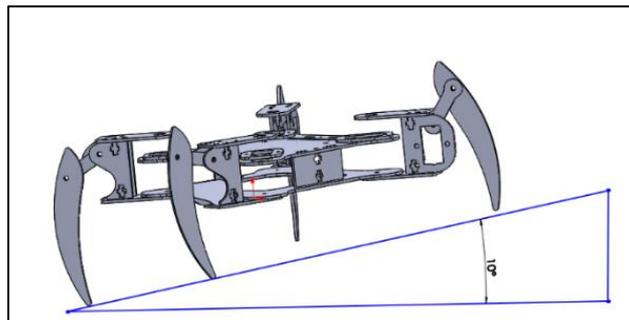


Figura 1. Pendiente máxima de diseño

El robot podrá evitar un obstáculo mientras se desplaza, al avanzar con sus extremidades, teniendo como un máximo desplazamiento geométrico en cada paso, de 38mm, como se muestra en la Figura 2.

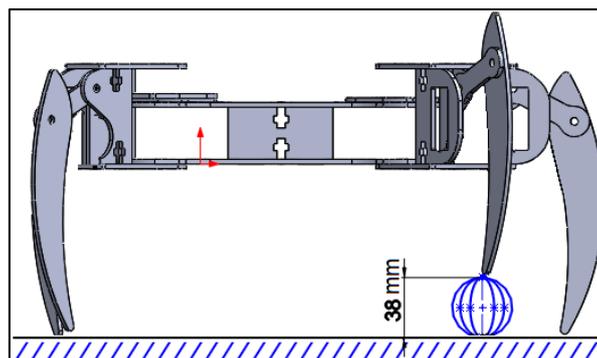


Figura 2. Obstáculo máximo

La herramienta dosificará una semilla de máximo ocho milímetros cúbicos o un grano de maíz seco por cada secuencia y cada grano depositado será contabilizado por un sensor de presencia, pero en cada agujero se podrán dosificar hasta tres granos.

La herramienta de inserción tubular podrá perforar un terreno agrícola preparado, previamente arado, blando, hasta una profundidad máxima de veinticinco milímetros. Que es la profundidad sugerida para sembrar una semilla de maíz seco.

El sistema de control en lazo cerrado estará dispuesto para realizar correcciones en el equilibrio del centro de gravedad del robot a través de un acelerómetro. Así el robot evitará volcarse, frenado o acareando su caminar evitando la vibración.

Todo el sistema estará energizado por baterías recargables que tendrán una autonomía máxima de treinta minutos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presenta una reseña histórica de los diferentes tipos de herramientas que se utilizan para la siembra, los diferentes tipos de robots, su clasificación, de acuerdo morfología artrópodos y los conceptos básicos para su manipulación. También se da a conocer las ventajas y desventajas al emplear algunos sensores para hacer un reconocimiento de su entorno.

2.1 AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.

El interés a compartir en esta sección corresponde a los avances enfocados en la agricultura, vinculados a diferentes herramientas agrícolas, que posteriormente se enlazarían con el manejo de robots en la industria a fin de mejorar, agilizar y aumentar la producción en los diferentes procesos.

2.1.1 Reseña histórica

A través de historia de la humanidad, la agricultura, ha sido una de las tareas más necesarias para la supervivencia de la sociedad y la integración de los pueblos. Pero ésta, debido a la gran cantidad de esfuerzo y tiempo que requiere, ha llevado al hombre a buscar métodos que la perfeccionen, para alimentar a cada vez más personas.

La tecnificación y la creación de máquinas, que reduzcan las acciones repetitivas y disminuyan el tiempo de trabajo, ha sido crucial para la evolución de civilización. Definiendo como exitosas a muchas culturas y la llevando a la extinción a otras. Al facilitar la obtención y almacenamiento de recursos alimenticios para sus habitantes y su posterior intercambio y comercialización.

Partiendo de la cultura babilónica con la introducción de animales de tira y sus logros en la metalurgia para la fabricación de herramientas, posteriormente la cultura egipcia y sus memorables adelantos tecnológicos en mecánicas de irrigación, arado y

almacenamiento, llegando por los sistemas chinos de terrazas y su manera tan particular de realizar herramientas para la siembra de arroz, siguiendo con la creación de acueductos en la época romana, la introducción de máquinas simples como bombas y molinos de viento en tiempos de Bizancio y comienzos del renacimiento, hasta la concepción de la era industrial, llegando la época actual.

La innovación en la agricultura se ha visto como una forma política para dar seguridad alimentaria a sus pobladores civiles y militares, dando balance y sostenibilidad a la producción de alimentos en masa.

Como se ha dicho, fijar un punto exacto en la historia del comienzo de la revolución científica en la agricultura no es posible. Pequeños acontecimientos han ido surgiendo y favoreciendo el desarrollo de determinados aspectos científicos y técnicos aislados, que cuajarían más tarde en la refundación de ciencias como la biología, que se tomarían multidisciplinarias dados los nuevos campos de estudio y aplicación.

La agricultura tradicional no sufrió apenas modificaciones durante la Edad Media, salvo en el cultivo de las nuevas especies introducidas desde el Nuevo Mundo en el siglo XVI, tales como el maíz, la patata o el tabaco. (Domínguez, 2017, p. 1).

A mediados del siglo XVII comenzó la aplicación de mejoras mecánicas al arado tradicional. Éstas consistieron básicamente en el fortalecimiento de las láminas de madera mediante la fijación de puntas de hierro. (Domínguez, 2017, p. 2).

A finales del siglo XVIII un herrero canadiense llamado Charles Newbold dio al arado un impulso técnico importante, mediante la introducción de la reja de hierro fundido, más tarde en 1830 mejorado con la reja de acero por el herrero estadounidense Jhon Deere. Hoy en día, con numerosas mejoras añadidas, sigue siendo básicamente el sistema de arado más utilizado. (Domínguez, 2017, p. 2).

En 1831 apareció la segadora del norteamericano Cyrus McCormick, y con ella multitud de máquinas para la agricultura, tales como trilladoras, desgranadoras de maíz, rastrilladoras, cultivadoras, etc. Con la revolución industrial se comenzó a utilizar el vapor

como fuerza de tracción de las máquinas en lugar de la fuerza animal. (Domínguez, 2017, p. 2).

Los transportes, junto con los canales y carreteras, adquirieron en el siglo XIX una importancia capital para la agricultura. El ferrocarril, especialmente, permitió a los agricultores comercializar sus productos en mercados más amplios, además de obtener todos los suministros que necesitaban para sus explotaciones agrícolas. (Domínguez, 2017, p. 3).

En el siglo XX, tras la II Guerra Mundial, se manifestó una explosión demográfica con la consiguiente demanda de alimentos, esto dio lugar a la llamada "revolución verde", que supuso el cultivo selectivo de determinadas especies tradicionales con objeto de obtener el máximo rendimiento. (Domínguez, 2017, p. 3)

La agricultura moderna depende enormemente de la tecnología y las ciencias físicas y biológicas. La irrigación, el drenaje, la conservación y la sanidad, que son vitales para una agricultura exitosa, exigen el conocimiento especializado de ingenieros(...). (MORENO ALBAN, 2012, p. 30).

La agricultura del siglo XXI está atravesando una transformación importante, en un momento en el que el acceso a las tecnologías de la información, protagonizan los nuevos paradigmas de la productividad en la sociedad.

Resulta entonces un imperativo social para el sector agropecuario, acceder a recursos tecnológicos innovadores que mejoren significativamente sus capacidades para producir alimentos seguros de manera sustentable. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015, p. 15)

2.1.2 Inteligencia artificial en la robótica

En la actualidad, las tecnologías de la información, la inteligencia artificial, la robótica y la biología sintética plantean nuevos paradigmas de cara a la forma como estamos produciendo los alimentos, dado el progreso acelerado de la tecnología, se espera que en

los próximos años veamos nuevas y grandes revoluciones en cuanto a la productividad y a la calidad. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015, p. 15)

Por este motivo, consideramos que es importante exponer los hitos de la tecnología agropecuaria, presentar algunas de las innovaciones que actualmente están aplicándose, e imaginar nuevas formas innovadoras de hacer más eficiente al agro. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015, p. 16)

La robótica abre una nueva y decisiva etapa en el actual proceso de mecanización y automatización creciente de los procesos de producción. Consiste esencialmente en la sustitución de máquinas o sistemas automáticos que realizan operaciones concretas, por dispositivos mecánicos de uso general, dotados de movimientos y capaces de adaptarse a la automatización de un número muy variado de procesos y operaciones. (ASIMOV & FRENKEL, 1995, p. 4).

2.1.3 Responsabilidad en la robótica

La robótica se ha caracterizado por el desarrollo de sistemas cada vez más flexibles y versátiles, mediante la utilización de nuevas estructuras mecánicas y de nuevos métodos de control y percepción. La robótica nace a raíz de la necesidad que tiene el hombre por realizar los procesos repetitivos, de tal forma que le permita mejorar la producción tanto en calidad como en tiempo. (ASIMOV & FRENKEL, 1995, pp. 4,5)

La posibilidad de estructurar el entorno industrial permite la navegación de vehículos con una capacidad sensorial y de razonamiento mínimas, de este modo, la tarea se ordena en una secuencia de acciones en la que a su término el vehículo supone que ha alcanzado el objetivo para el que está programado. Ante cualquier cambio inesperado en el área de trabajo que afecte el desarrollo normal de la navegación, el sistema de navegación del vehículo se encontrará imposibilitado para ejecutar acciones alternativas que le permitan reanudar su labor. (Una Introducción a los Robots Móviles, 2008, p. 10).

Sin embargo, por sus potenciales aplicaciones fuera del ámbito industrial, donde resulta costoso o imposible estructurar el entorno, se les dotó, en la búsqueda de un

vehículo de propósito general apto para desenvolverse en cualquier clase de ambiente, de un mayor grado de inteligencia y percepción. Así en los años noventa surgen el robot móvil. Una definición correcta de robot móvil plantea la capacidad de movimiento sobre entornos no estructurados, de los que se posee un conocimiento incierto, mediante la interpretación de la información suministrada a través de sus sensores y del estado actual del vehículo. (Una Introducción a los Robots Móviles, 2008, p. 10).

El Dr. Eldert J. Van Renten, investigador de la Universidad de Wageningen, comentó que se están realizando diversos cambios en la agricultura mundial, entre los que destacan el uso de agro-robots para realizar diferentes actividades desde la siembra hasta la cosecha, debido a que los costes de la mano de obra para las labores agrícolas representan una tercera parte del coste total en las producciones agrícolas. (Morales García, 2013, p. 17).

Existen desafíos a considerar en el desarrollo de los robots en las actividades desde la siembra hasta la cosecha y en cada cultivo, con variaciones como, por ejemplo: el color, forma y ubicación de los frutos aun tratándose de una misma especie hortícola, y el complejo entorno: los desniveles de suelo, variación de la luz, lluvia, polvo, etc. (Morales García, 2013, p. 17).

La importancia de los robots en la agricultura debido a la demanda de alimentos, se ha convertido en un factor preponderante en la sociedad, según la compañía JOHN DEERE, "hoy en el mundo necesita alimentar a 7,000 millones de personas y 200 millones de personas se suman a ese número diariamente" (John Deere, 2016), por lo que el sector agrícola depende de la actualización de su maquinaria y mecanismos de automatización. En estos años se han realizado grandes avances en los sistemas de locomoción.

Siendo los robots articulados una solución plausible para sortear obstáculos en terrenos agrícolas, dentro de los cuales los robots tipo araña o zoomórficos comprenden una parte central de investigaciones de locomoción, debido a las ventajas que los arácnidos e insectos tienen en la naturaleza, debido a miles de años de evolución. En busca de crear un diseño que se adapte a la topografía irregular existen varios diseños zoomórficos que han encontrado adecuados para adaptarse a terrenos difíciles.

2.1.4 Introducción de la robótica en las labores agrícolas

La introducción de la robótica en las labores agrícolas de campo constituye la vanguardia de la agricultura de precisión y supone un cambio de paradigma en la investigación y el desarrollo de maquinaria.

Actualmente la mayor parte de las prácticas de producción en campo se centran en la utilización de equipos de gran potencia, pesados, costosos y con grandes capacidades de trabajo. Sin embargo, algunas universidades y centros de investigación están tratando de aprovechar las fenomenales posibilidades que ofrecen los avances en microelectrónica, tecnologías de la información y sensorial, para rediseñar los equipos agrícolas.

Se persigue así la fabricación de vehículos robotizados ligeros, inteligentes, autónomos y relativamente baratos. (Barreiro Elorza & Diezma Iglesias, La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro, 2006, p. 1)

2.1.5 Robots de cuatro patas

Los robots araña, destinados a la "exploración/reconocimiento de lugares de difícil acceso o peligrosos para seres humanos u otro tipo de vehículos (robots dotados de ruedas u orugas)" (García Villaseñor, 2007), (...), por lo que son capaces "de desplazarse sobre cualquier tipo de superficie" (García Villaseñor, 2007) , como se muestra en la Figura 3.

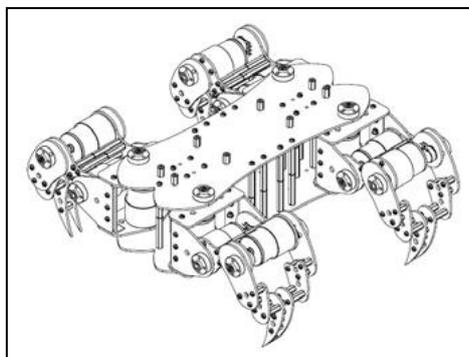


Figura 3. Robot araña diseño Epheastus-R1.
Fuente: (García Villaseñor, 2007)

Las investigaciones aplicadas sobre los robots agrícolas comenzaron hace más de veinte y cinco años, ha sido recientemente avances en el control de movimiento, los han

permitido el desarrollo de diferentes “tecnologías facilitadoras” asociadas a las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicaciones) fomentado un progreso sustancial en su desarrollo, (John Deere, 2016).

De lo que se considera la evolución de los robots artrópodos o con articulaciones, a la manera de control que tiene a una mejora continua y sustancial en su manera de estabilizarse. Como uno de los ejemplos más promisorios en la industria de los robots artrópodos zoomórficos tenemos a los avances que tuvo la milicia norteamericana con un robot de carga táctico, destinado para transporte de material para tropas, que demuestra la enorme capacidad que tiene un robot en terreno difícil, gracias a la variedad de sistemas de control de estabilidad que permiten a los robots átropos permanecer en pie bajo pruebas muy demandantes, cómo se muestra, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Prueba de estabilidad de un robot zoomórfico.
Fuente: (Parke, 2015)

Diseñado por la compañía de robótica Boston Dynamics. El Spot que se usó para demostrar qué tan robusto puede ser un robot artrópodo, cuestionó el futuro del diseño, nos vincula a la posibilidad de realizar una máquina capaz de sortear obstáculos comunes en la agricultura.

La evolución que presento este tipo de diseños nos impulsa a seguir investigando. Por ello muchos ingenieros ha trabajado en la viabilidad de introducir robots con extremidades en el campo laboral, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Diseño robot tetrápodo modelo vigilante de corrales.
Fuente: (Carlos, 2017)

En la búsqueda de un diseño que pueda adaptarse fácilmente a pendientes de denotan varios tipos de células robotizadas que usan cuatro patas dependiendo de la orientación de sus patas. De las cuales se distinguen tres tipos fundamentales por su distribución a articular o su orientación.

Aquellos que tiene una distribución articular de manera frontal o fisiológicamente similar a los mamíferos cuadrúpedos, así como los pertenecientes a la familia de los canidos o felinos, que mantienen su centro de gravedad bajo para mayor estabilidad, moviendo sus patas en una sola dirección para su locomoción, como se muestra en la Figura 6.

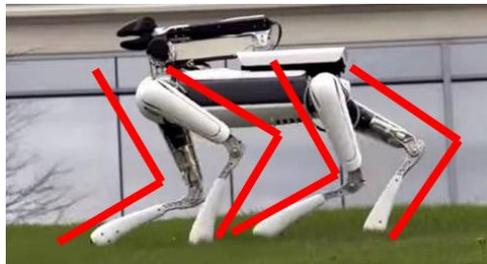


Figura 6. Robot zoomórfico tetrápodo canido de vigilancia.
Fuente: (Vanguardia, 2016)

Aquellos que tiene una distribución articular de manera paralela, fisiológicamente similar a los insectos, así como los pertenecientes a la familia de los arácnidos o artrópodos, que mantienen su centro de gravedad bajo pero con una mayor movilidad en sus patas, moviendo sus patas en direcciones iguales por pares para su locomoción, cómo se muestra, como se muestra en la Figura 7.

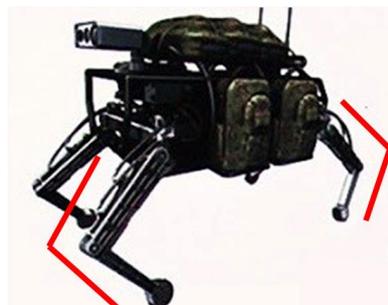


Figura 7. Robot zoomórfico tetrápodo de aplicación militar ruso modelo (Rys) planteado para el transporte de armas o tareas de vigilancia. Fuente: (Jlópotov, 2016)

Aquellos que tiene una distribución articular de manera independiente, fisiológicamente similar a los moluscos, así como los pertenecientes a la familia de los

cefalópodos, que no tienen un esqueleto, pero con una mayor movilidad bajo el agua, dando movimientos independientes a sus patas en direcciones distintas para su locomoción, como se muestra en la Figura 8.

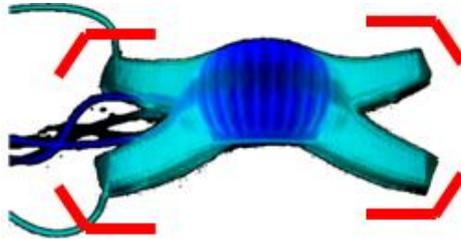


Figura 8. Robot zoomórfico tetrápodos tipo molusco con capacidad de camuflaje.
Fuente: (Club El Comercio, 2012)

La tecnología robótica aplicada al sector agrícola se encuentra en un estado de desarrollo avanzado, con algunas aplicaciones comerciales y otras en experimentación, aunque su uso es aún poco frecuente en operaciones de producción en campo abierto o bajo agricultura protegida. Sin embargo, la necesidad de reducir costos y aumentar la productividad, de manera sustentable, está dando paso a la transición de la mecanización a la automatización de la agricultura, en donde la robótica agrícola tendrá un protagonismo destacado. El objetivo consiste en diseñar tecnología específica que funcione para los agricultores y les ayude a controlar, administrar y cosechar sus cultivos, de manera sostenible, (...). (John Deere, 2016), como se muestra en la Figura 9.



Figura 9 . Robot zoomórfico con ruedas y articulaciones capacitado para distinguir malas hiervas.
Fuente: (Moya, 2015)

Cabe decir también que la inclusión de todos estos sistemas en el robot no sólo es fruto de la inquietud o la curiosidad por sus respectivos campos de aplicación, sino que responden conjuntamente al objetivo final del robot, que no es otro que el de ser un robot explorador. Así pues, las características para las que se diseña no están en absoluto carentes de un objetivo común, sino que se enfocan a perfeccionar el modo en que este robot discurre de forma autónoma o tele-operada por un territorio desconocido,

inaccesible u hostil, potenciando su capacidad de adaptación a un terreno irregular e imprevisible y la accesibilidad de su interfaz con un usuario. (Pedrosa Lojo & Horrillo Tello, 2008). En el caso particular de diseñar robots zoomórficos para el campo de la agricultura siempre dependerá de la simplicidad y robustez de sus elementos.

Para escalas pequeñas, los robots. (...) permiten eludir obstáculos, transportar insumos y, además, medir humedad, temperatura y radiación. (Esperbent C. , 2016, p. 4). por lo cuales son perfectos para labores con gran autonomía y menor gasto energético. volviéndolos de mayor eficiencia y mejor desempeño para labores de dispersión de semillas.

2.1.6 Especificaciones y necesidades para los robots en la industria agrícola

Uno de los investigadores pioneros en el ámbito de la robótica aplicada a la agricultura es Simon Blackmore que incluso se ha lanzado a crear su propia empresa denominada unibots (University Robots). Blackmore y colaboradores a lo largo de un conjunto de trabajos en los que han participado varias universidades europeas establecen las siguientes categorías de especificaciones técnicas para los robots: tamaño, peso, autonomía de comportamiento, navegación, capacidad exploratoria, autodiagnóstico, gestión de tareas, comunicación, coordinación, colaboración y seguridad. (Barreiro Elorza & Diezma Iglesias, La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro, 2006, p. 1)

Características en los robots Agrícolas

- Tamaño: mínimo necesario para funcionar con baterías o celdas recargables.
- Peso: categorías de peso que van de los 100kg a inferiores de 10kg.
- Autonomía de comportamiento: Posibilidad de moverse en largos periodos de tiempo.
- Navegación: Capacidad de realizar giros y movimientos basados en diferentes tipos de tecnologías de referenciación, cómo se muestra, como se muestra en las figuras 10, 11, 12 y 13.

- Capacidad exploratoria: Fortalezas y limitaciones de movimiento.
- Autodiagnóstico: Capacidad de percepción de los parámetros normales de funcionamiento.
- Gestión de tareas con micro-equipos: La idea es que existan equipos con una funcionalidad similar a los actuales, pero con dimensiones reducidas.
- Comunicación: Protocolos que permitan verificar los procesos realizados
- Coordinación: Vinculación con otros equipos de la misma o varias especies.
- Colaboración: Equipos deben ser capaces de trabajar de forma conjunta
- Seguridad: La seguridad se expresa en términos de integridad de terceros, integridad propia y del cultivo. Para poder lograr este propósito son necesarios sistemas sensores inteligentes y sistemas redundantes.

Los patrones que se consiguen con los distintos tipos de navegación, permiten visualizar la distribución que se tiene de las semillas. Por lo que, de acuerdo a las siguientes figuras, podemos equiparar o distinguir las siguientes correspondencias como se muestra en la figura 10, 11, 12, 13.

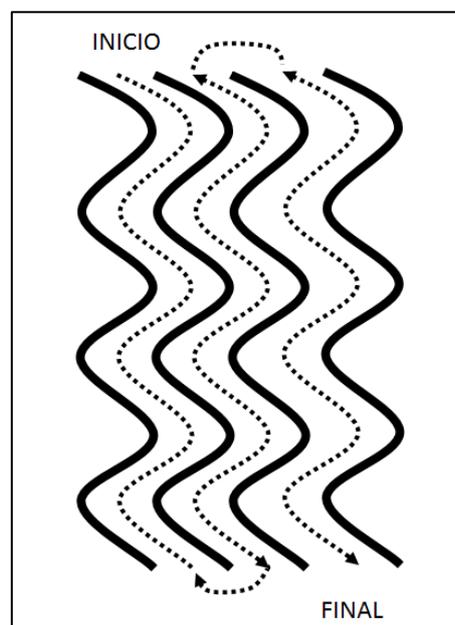


Figura 10. Navegación en un campo de maíz con líneas en curva.

Los robots tienen que seguir las líneas girar en cabeceras y continuar siguiendo la línea adyacente. Fuente: (Barreiro Elorza & Diezma Iglesias, La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro, 2006)

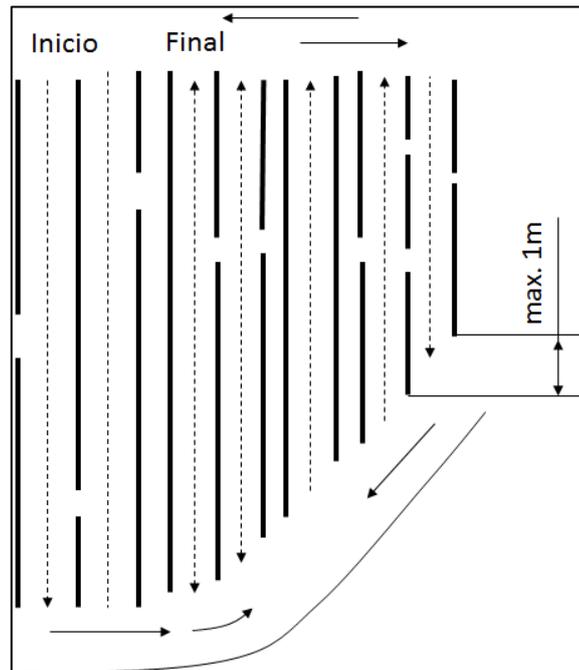
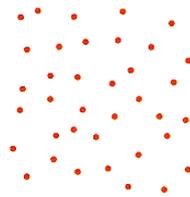


Figura 11. Navegación avanzada según un patrón complejo definido en un campo de maíz con líneas de diferentes longitudes y con fallos.
Fuente: (Barreiro Elorza & Diezma Iglesias, La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro, 2006)

Tipos de distribución

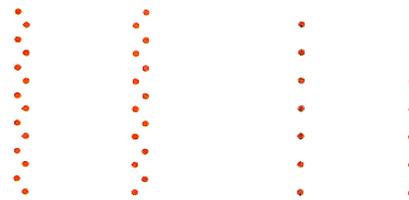
Voleo



Voleo

Figura 12. Patrón dispersión por voleo.
Fuente:(Sembradoras, p. 2)

Hileras



Chorrillo

Individual

Figura 13. Patrón dispersión por chorrillo e individual.
Fuente:(Sembradoras, p. 2)

2.1.7 Norma ISO 9283

La norma ISO 9283 es parte de una serie de normas internacionales que tratan sobre robots industriales, prototipos y otras normas tratan temas como seguridad, características generales, sistemas de coordenadas, terminología, e interfaces mecánicas. (abrox.net, 2001)

ISO 9283 trata de facilitar el entendimiento entre usuarios y fabricantes de robots y sistemas robóticos. Define las principales características de funcionamiento, describe como deben especificarse y recomienda como se deben realizar los test. También se recogen ejemplos prácticos de cómo deben realizarse los informes de resultados. (abrox.net, 2001).

2.1.8 Norma ISO-UNE-EN 4254/1

La norma ISO-UNE-EN 4254/1 trata sobre la seguridad en el diseño y la fabricación de máquinas agrícolas, excluidos los tractores, para protección contra peligros de origen mecánico. (mapama.gob.es, 2004). En esta norma, editada el 2004, está recopilada la antigua norma UNE-EN 1553 que:

- Aplica para cualquier tipo de máquina agrícola (excluidos los tractores).
- Se debe de complementar con normas específicas para determinados grupos de máquinas.
- No incluye aspectos relacionados con el medio ambiente.

2.1.9 Arado de tierra

Es necesario trabajar o labrar la tierra, de manera que sea más fácil de cultivarla, denotando la necesidad de irrigación y aprovechamiento del espacio físico, para ello los seres humanos han perfeccionado distintos métodos de arado.

El arado es una actividad en que usan herramientas tradicionales o no tradicionales, para nivelar y formar cúmulos de tierra que promuevan el crecimiento y mantenimiento de plantas cultivables.

Para la preparación del suelo (...) se realizan surcos (...). La siembra, es la colocación de las semillas en los surcos en el suelo, cuando no se realizan surcos, la siembra se la realiza al boleó, esparciendo semillas en toda la superficie del terreno anteriormente preparado, como se ve en la Figura 14.



Figura 14. Surcos en la tierra para sembrío personas realizando la técnica de siembra por voleo.
Fuente: (Quiñónez, 2010)

Los tipos más conocidos de abre surcos para la siembra directa son de aza de excavación, puntas de metal, arados de reja, arado de caballones, rejas rotatorias, por discos, etc. Cómo se observa en la Figura 15. Ya sean estos métodos manuales, con propulsión animal, o motorizada, tiene como finalidad, remover y emparejar la tierra, para hacerla más suave y formar los canales de irrigación.

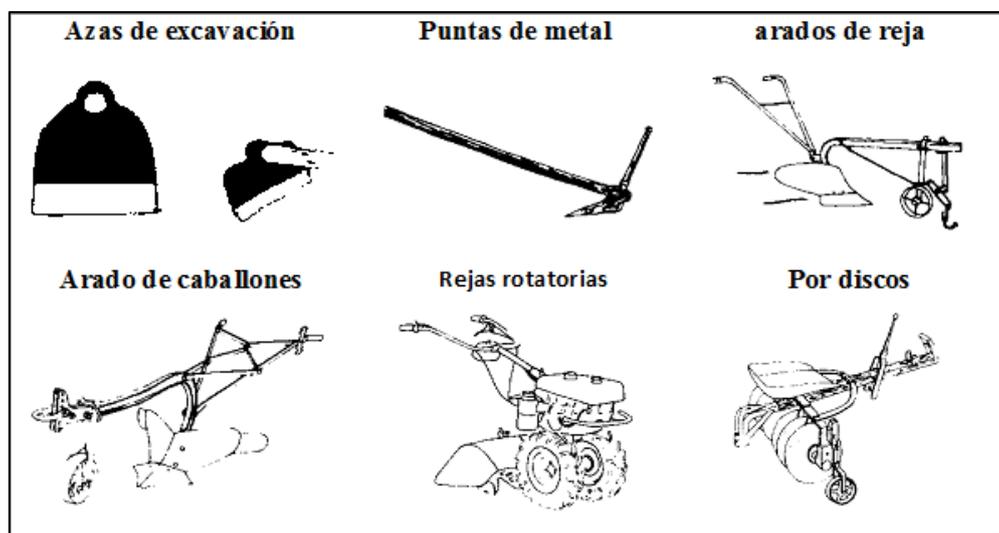


Figura 15. Tipos más comunes de herramientas para abrir surcos.
Fuente: (Leonard, et al., n.d.)

2.1.10 Secciones de surcos.

La sección transversal del surco ha de ser suficientemente amplia para conducir el caudal necesario. La forma más corriente es la sección en "V" abierta, con una altura que varía, sobre todo, con el tipo de cultivo: para cultivos en una sola fila por surco y marco

reducido se suele dar una altura de hasta 20 cm (...) (A, 2008), cómo se ve en la Figura 16.

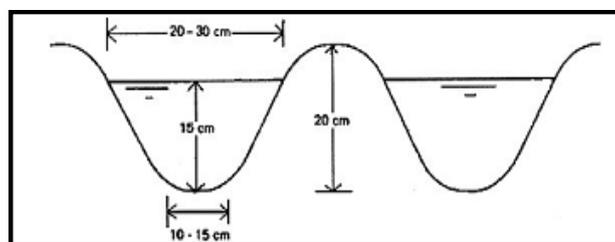


Figura 16. Dimensiones del surco.
Fuente: (A, 2008)

En donde la variedad de formas de las semillas de leguminosas, tiene o se asumen diferentes calibres, para dimensionar los parámetros de la herramienta para sembrar en los surcos de tierra, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.
Calibres de las semillas de maíz.

Parámetros	Semilla(calibres)*				
	1-R6	2-R4c	3-C1	Mezcla Sin Calibrar	
	Dimensiones (mm)				
Largo mínimo	8.3	6.3	7.4	6.6	7.1
Largo máximo	11.1	10.5	12.2	12.1	13.6
Brecha largo mínimo- máximo	2.8	4.2	4.8	5.5	6.5
Ancho mínimo	5	6.1	8	5.1	5.2
Ancho máximo	6.5	9.2	10.4	10.1	9.9
Brecha largo mínimo- máximo	1.8	3.1	2.4	5	4.7
Espesor mínimo	4.8	4.9	3.8	3.6	2.6
Espesor máximo	6.5	7.5	5.9	6.9	6.5
Brecha largo mínimo- máximo	1.7	2.6	2.1	3.3	3.9
Dispersión relativa	Coefficiente de Variación (%)				
Largo:	6.2	10.5	7	11.8	14.5
Ancho:	5.8	8	4	17.9	11.2
Espesor:	6.3	8.9	8.5	17.1	14.5
Peso de las semillas	Peso(g)				
1.000 unidades	199	254	392	292	256

Fuente: (Maroni & Asenjo, 2006)

En la plantación manual se emplean comúnmente herramientas para realizar los hoyos, como se ve en la Figura 17. La profundidad óptima de la siembra varía según el cultivo, el tipo de suelo, (arenoso o arcilloso), y la fuerza de absorción del suelo. Las semillas se deben colocar con suficiente profundidad para que haya humedad para la germinación, pero a un nivel suficientemente superficial para que la emergencia de la planta semillero no sea difícil.

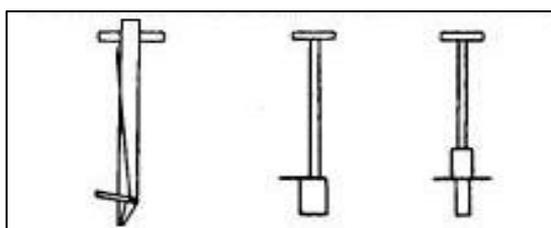


Figura 17. Equipos de plantación manual para hacer hoyos.
Fuente: (García Arce , 2005)

Los agricultores locales deben considerar (...) la mejor profundidad para la siembra, pero las variaciones normales en las profundidades para la siembra de los Cultivos de referencia son las que se observan en la tabla 2.

Tabla 2.

Variaciones Normales en las Profundidades para la Siembra de los Cultivos de Referencia.

CULTIVOS DE REFERENCIA	PROFUNDIDA DE SIEMBRA
El Maíz:	3.75-8 cm
El Sorgo:	3.75-6 cm
El Mijo:	2-4 cm
Los Cacahuets, los frijoles y las Arvejas de Vaca:	3-8 cm

Fuente: (Leonard, es.iisc.ernet.in, n.d.)

En nuestro caso se definirá a la navegación a los caminos a seguir, llamados guachos o surcos de tierra remontada, para sembrío, y los patrones de distribución de semillas, que

se interpretan como la ubicaciones o rastros, al soltar un conjunto de semillas, como se muestra en la Figura 18.

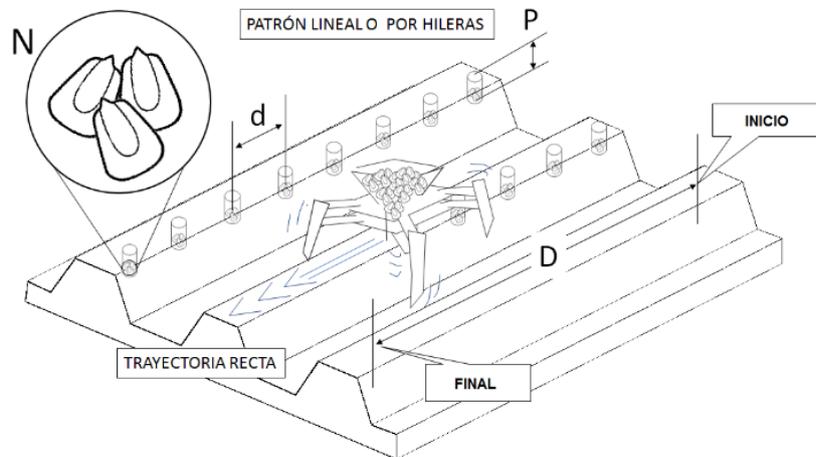


Figura 18. Planteamiento del método de siembra del robot tetrápodo.

Asumiendo una trayectoria recta y un patrón por hileras de una tierra agrícola con surcos, donde: “N” es el número de semillas, “D” es la distancia recorrida desde el inicio del movimiento, hasta el final del movimiento, “d” la distancia entre semillas y “p” la profundidad a la que se siembran las semillas.

2.1.11 Diseños de sembradoras

Existen tipos de sembradoras dentro de las cuales encontramos las volumétricas, mono-grano y sembradoras de precisión (Gil, p. 9). Las sembradoras volumétricas tienen por objetivo tener grandes tolvas acarreadas por un tractor haciendo surcos y usar rastrillos enterradores, como se muestra en la Figura 19



Figura 19. Sembradora volumétrica mecánica acarreada por un tractor.

Fuente: (John Deere, 2013)

Las sembradoras mono-grano tiene por objetivo establecer una mayor densidad de plantas en un área de terreno, dejando una distancia específica entre cada semilla en hileras más pequeñas. Existiendo de tipo mecánico y neumático, como se muestra en la Figura 20.

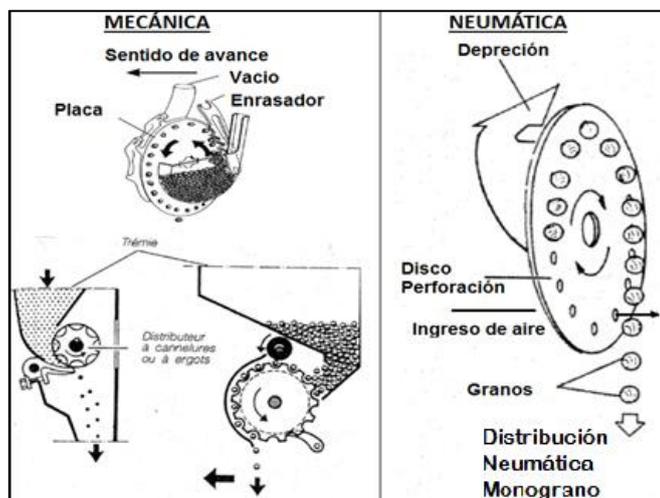


Figura 20. Sembrador mono-grano.

Fuente: (Gill, 2000)

Los dosificadores mecánicos más utilizados para la siembra a chorrillo son cuatro: rotor cilíndrico de eje horizontal de capacidad fija (roldana doble) y rodillo cilíndrico de eje horizontal de capacidad variable (rodillo acanalado) en sus dos versiones: dientes rectos y dientes helicoidales y CHEVRON. (Dosificadores para siembra a chorrillo, p. 1), como se muestra en la Figura 21.

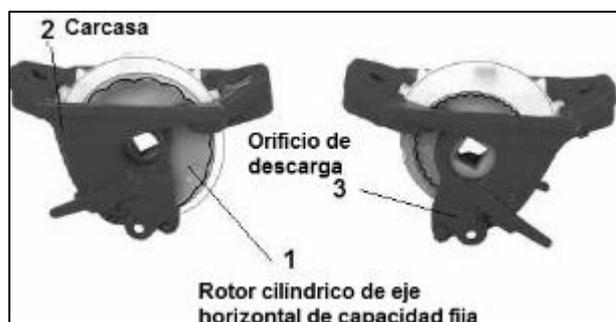


Figura 21. dosificador siembra a chorrillo.

Fuente: (Dosificadores para siembra a chorrillo, p. 1).

El rodillo cilíndrico de eje horizontal de capacidad variable (rodillo acanalado) también pertenece al sistema de dosificación por expulsión forzada. (...). La semilla ubicada en el interior de la carcasa es forzada a salir al exterior por un orificio de sección regulable por la apertura de una compuerta basculante, ubicada en la parte inferior del citado compartimento. (Dosificadores para siembra a chorrillo, p. 2), como se muestra en la Figura 22,23,24.

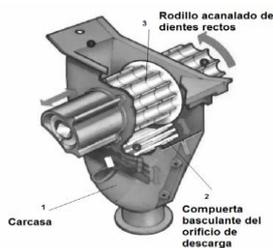


Figura 22. Rodillo escalonado.
Fuente:
(Dosificadores para siembra a chorrillo, p. 3)



Figura 23. Rodillo Chevron.
Fuente:
(Sembradoras, p. 18)



Figura 24. Dosificador de placa horizontal.
Fuente:
(Sembradoras, p. 18)

Para las llamadas sembradoras directas, aptas para sembrar en condiciones de labranza cero, existen dos conceptos fundamentales para el diseño de los abre surcos: los de perturbación máxima de suelo y los de perturbación mínima de suelo. Sembradoras del primer tipo de perturbación máxima de suelo siguen al concepto de la agricultura convencional.

El objetivo de estas máquinas es reducir las operaciones de labranza a la operación de siembra y crear al menos en el surco para la semilla unas condiciones comparables a una cama de siembra convencional. Sembradoras de esta categoría usan herramientas con un movimiento agresivo de suelo, tales como cinceles o azadas con rejas de alas anchas, discos sencillos o herramientas propulsadas por la toma de fuerza. Aplican de esta forma una labranza mínima o de conservación a lo ancho del equipo o en fajas limitadas al surco. (Friedrich, 2007).

2.1.12 Repercusiones económicas

La implementación de electrónica, software, geoposicionamiento y mecatrónica tanto para la siembra, monitoreo o cosecha de un campo, es hoy una realidad. De hecho, con casi ocho millones de hectáreas sembradas con tecnología de precisión, (...) se ubica entre los países más tecnificados del mundo para la producción de granos. (Esperbent, 2016, p. 1)

Los desarrollos de software con inteligencia precargada para que la máquina tome decisiones sin depender del operario, con alta eficiencia en el curso de las acciones y trazabilidad de los procesos. Esto se logró mediante el uso de un chip y con la ayuda de un sistema de lectura. Así, “un fardo, por ejemplo, puede proporcionar información acerca de su procedencia –no sólo la zona, sino las coordenadas que permiten establecer exactamente de dónde salió–, el día en que se armó y su contenido de humedad”, (Esperbent, 2016, p. 2).

Para América Latina, entrar en la carrera científica y tecnológica a nivel global es un gran reto, y debemos alinearnos a los nuevos desarrollos, para dejar de ser únicamente consumidores de las creaciones del mundo desarrollado, y convertirnos en generadores de conocimiento, de ciencia y de tecnología. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015, p. 16)

Bajo esta conceptualización esta investigación busca el análisis del impacto de la producción agrícola basado en la utilización de maquinaria para este efecto, determinar una preferencia de características para el consumo y medición del nivel de satisfacción de consumidores con el fin de elaborar una propuesta para la inclusión de maquinaria agrícola con características definidas para las principales provincias de producción de la sierra central. (Moreno Alban, 2012, p. 31).

Actualmente la producción agropecuaria en el mundo enfrenta el gran reto de generar alimentos suficientes para las futuras generaciones, sin menoscabar el ambiente o las interacciones sociales, es por esto que la tecnología debe ser creativa e innovadora para contribuir incluso a mejorar el ambiente en el que se desarrolla. (Ramírez, Ruilova, & Garzón, 2015). En Ecuador, el gasto del gobierno en la agricultura ha sido tradicionalmente bajo, contradictoriamente a la importancia en aporte a la economía y generación de divisas y empleo; apenas el 3% promedio anual en la última década (...). (Moreno Alban, 2012, p. 76). El principal objetivo de Ecuador debe ser mejorar la productividad, ésta es la herramienta más eficaz y factor determinante para aumentar el nivel de vida de las personas y el crecimiento continuo es la fuente central y perpetua para acumular bienestar. Hay que tener presente que las mejoras en la tasa de productividad. (Moreno Alban, 2012, p. 83).

2.1.13 MODELADO DE ROBOT

El modelado matemático del movimiento del robot propone algoritmos de control de posicionamiento y trayectoria, que comprenden un análisis de estabilidad, buscando compensación en caso de inestabilidad.

2.1.14 CINEMÁTICA DIRECTA

La cinemática del robot trata con el estudio analítico de la geometría del movimiento de un robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo, como una función del tiempo, sin considerar las fuerzas/momentos que originan dicho movimiento, así pues, trata de la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como función del tiempo, en particular las relaciones entre variables espaciales de tipo articulación y la posición y orientación del efector final del manipulador.

En el estudio cinemático de un robot se abordan dos problemas:

- 1.- El modelo directo.
- 2.-Modelado inverso.

Por lo que en la presente situación nos enfocaremos en modelado directo, que aborda la problemática de la cinemática directa.

La cinemática directa parte de los ángulos de las articulaciones para obtener la posición/orientación del efector final, mientras que la cinemática inversa se obtiene los ángulos de las articulaciones requeridos para que el efector quede en una posición/orientación deseada.

2.1.15 El problema cinemático directo.

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. Dado que un robot puede considerarse como una cadena cinemática formada

por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia.

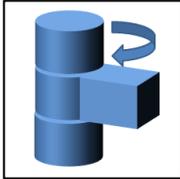
De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Esta matriz T será función de las coordenadas articulares.

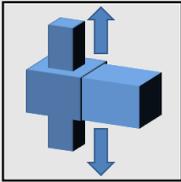
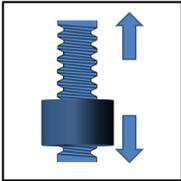
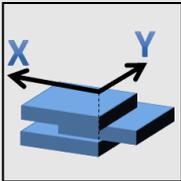
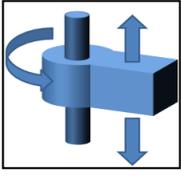
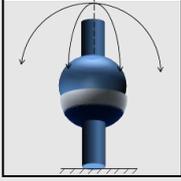
2.1.16 Manipuladores industriales

Los manipuladores industriales surgen por una combinación de tecnologías del control automático y en particular el control de máquinas y herramientas (Baturone 2005). El objetivo del control autónomo es que la mínima intervención humana prácticamente nula se mantenga al mínimo después de una etapa de configuración.

Existen varias clases de clasificar un robot, en nuestro caso se tomará en cuenta como factor preponderante los tipos de articulaciones, estos nos indican los grados de libertad que posee el robot, ver tabla 3.

Tabla 3.
Tipo de articulaciones.

TIPO	GRÁFICOS	GRADOS DE LIBERTAD
Rotacional	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 10px;">1</div>  </div>	1 Grado De Libertad

Prismática	2		1 Grado De Libertad
Tornillo	3		1 Grado De Libertad
Planar	4		2 Grados De Libertad
Cilíndrica	5		2 Grados De Libertad
Esférico	6		3 Grados De Libertad

CAPÍTULO III

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

El presente capítulo trata de la realización del proyecto, utilizando la técnica de diseño, conocida como Ingeniería Concurrente. Dicha técnica es considerada como una nueva filosofía orientada a Integrar diferentes procesos, interdisciplinarios, sistemáticamente y de forma simultánea, para el diseño y desarrollo de productos.

El diseño de la estructura recopila los cálculos de cinemática y dinámica del robot, cruzando por la selección de materiales, motores, y el suministro de energía.

La programación de los algoritmos de control de los diferentes motores, vinculados a movimiento de desplazamiento, conteo e inserción, y la interpretación de las señales reaccionadas a los sensores para la evasión de obstáculos y la contabilización de granos a sembrar.

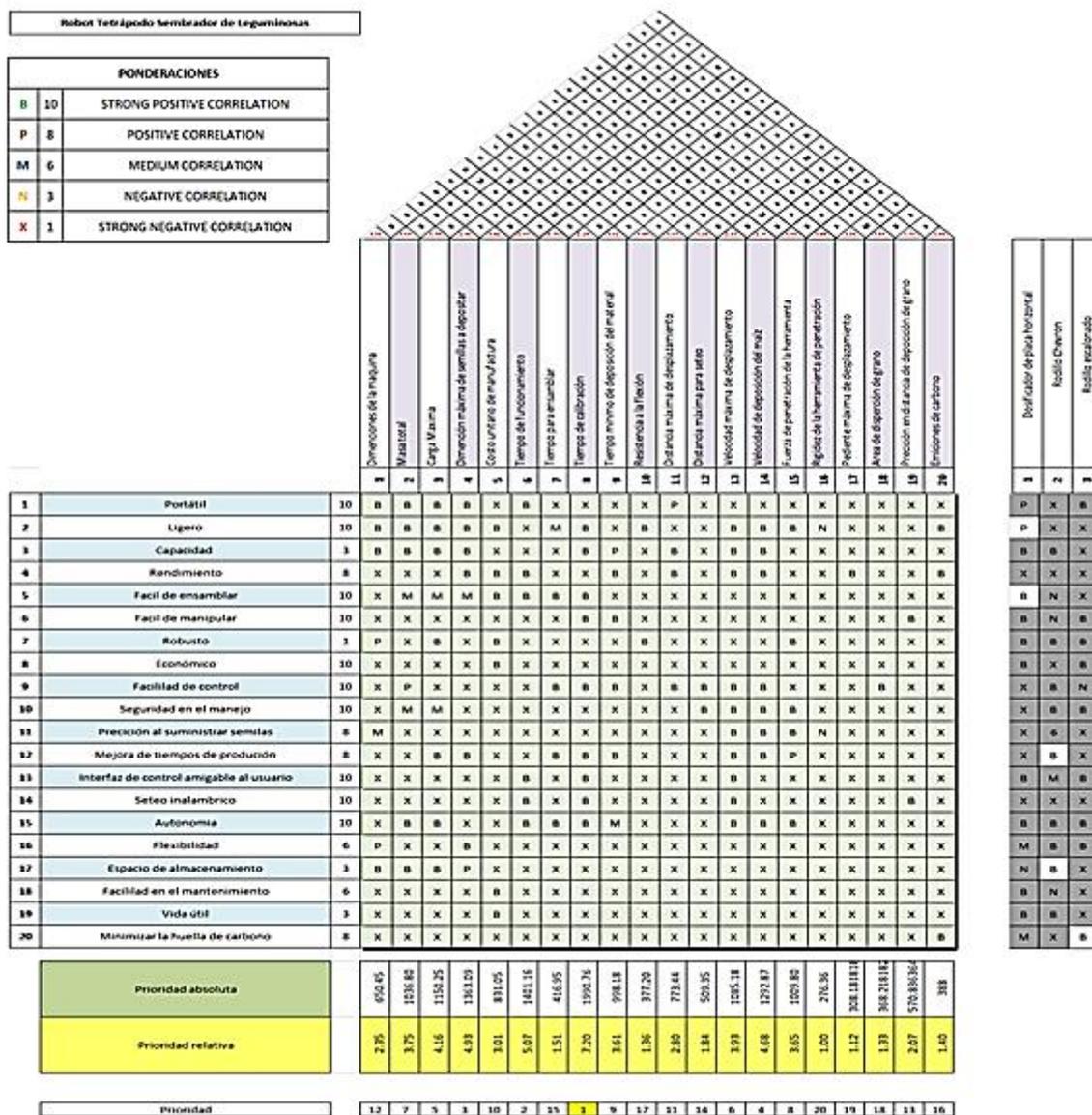
La programación de una conexión inalámbrica y de su interface con el usuario, capaz de modificar los parámetros de desplazamiento y suministro de granos. obteniendo un modelo funcional de los componentes del robot.

3.1 Metodología de diseño Casa de la Calidad de Plataforma Stewart

Se utilizó la metodología de diseño de la función de calidad (QFD, siglas en inglés), de acuerdo al documento de trabajo elaborado por Yacuzzi & Matín (2003); con el fin de establecer el enfoque que se debería usar para la planificación y construcción del sistema robótico.

Como resultado se obtendrá una matriz, llamada matriz de calidad, en la que se indican las características ingenieriles para el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Ver tabla 4.

Tabla 4.
Ponderaciones casa de la calidad.



Las dos características más importantes, resultantes de la matriz de la calidad, son los grados de libertad por extremidad y el torque de los servomotores. Estas características inciden en la capacidad del robot zoomórfico caminante de desplazarse por terrenos irregulares y de tener una locomoción natural. la tercera característica de mayor relevancia, la comunicación inalámbrica, es la base fundamental del control bluetooth y es la función necesaria para la inspección o exploración de los entornos. todas estas características cumplen con los dos requerimientos objetivos de mayor ponderación que son: la capacidad todo terreno del robot y su control remoto.

Los resultados obtenidos de la matriz de calidad se agrupan en módulos para formar una estructura funcional. A través de los módulos se puede distribuir las diversas operaciones funcionales para satisfacer los requerimientos objetivos del proyecto de una manera eficaz. (ver Tabla 5).

Tabla 5.
Módulos de operación.

N°	MODULO	SUBSISTEMA	FUNCIONES	HITOS A CUMPLIR
1	ESTRUCTURA	ALIMENTACIÓN	Capacidad de alimentación del grano	2,7,10
		ACARREO Y CONTABILIZACIÓN DEL MATERIA	Capacidad De Contabilización Del Grano	3
		INSERCIÓN DEL MATERIAL	Capacidad De Inserción Del Grano	2,10
		EXTREMIDADES	Grados De Libertad	4,6,10
		2	PROGRAMACIÓN	MOVIMIENTO
		CONTABILIZACIÓN	Programación Detección Del Grano	5,10
		COMUNICACIÓN	Programación Del Movimiento	1
3	INTERFACE	INTERFACE DE CONTROL	Programación De La Interface de Control	5

3.2 MÓDULO 1. ESTRUCTURA

El robot zoomórfico por su configuración radial está diseñado respecto a la forma de una araña (*Argiope argentata*) o araña tigre. Donde la posición típica formando una X con sus cuatro pares de patas resulta útil para disimular que tiene más patas ante sus predadores, y le resultan prácticas para la locomoción en tierra, éstas arañas principalmente se encuentra en el centro y sur de américa. (Olejnik, 2007).

3.3 SUBSISTEMAS 1. EXTREMIDADES

Debido a la necesidad de identificar la forma que deben tener las extremidades se realizó una interpolación entre las estructuras que existen en la naturaleza y las extremidades de los robots preexistentes.

3.3.1 ACERCAMIENTO AL FUNCIONAMIENTO DE LAS PIERNAS DE LOS SALTAMONTES Y LAS ARAÑAS

la familia de arácnidos goza de una morfología que facilita su locomoción, en todo tipo de terreno. Donde sus patas actúan como su medio de locomoción. Sin embargo, la estructura que tienen las patas de los saltamontes tiene mayor semejanza a las funciones que desempeñan los soportes que tienen los robots artrópodos, que por convención tiene tres posiciones básicas de sus extremidades: en frente, en medio y atrás. Como se puede ver en la Figura25.

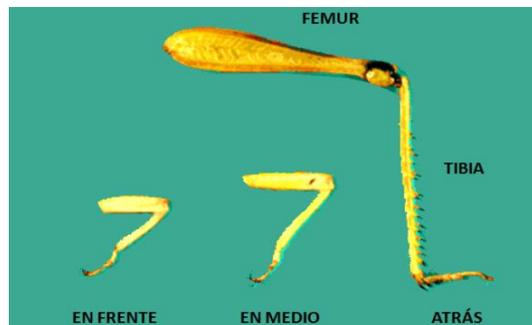


Figura 25. Fotografía de tres patas de un lado de un saltamontes.
Fuente: (Heilter, 2007)

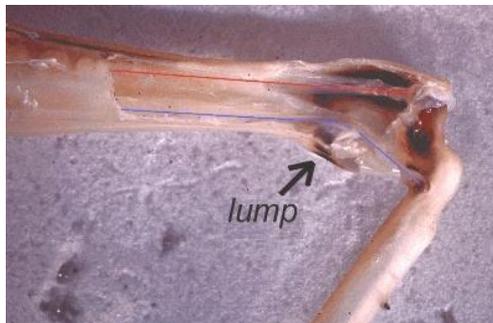


Figura 26. Fotografía disección saltamontes.
Fuente: (Heilter, 2007)

Debido a que los saltamontes son insectos y los insectos tienen sus esqueletos en el exterior de los cuerpos (un exoesqueleto), todos los músculos están dentro del caparazón

duro. Los dos músculos principales son el músculo extensor de la tibia que hace que la pierna se extienda y el músculo flexor de la tibia que hace que la pierna se flexione.

Estos músculos tiran de los tendones que están unidos a la tibia a cada lado del pivote de la articulación. Estos tendones se pueden ver al quitar la cutícula de un lado de la pierna en la región articular. (Heilter, 2007), como se muestra en la Figura 27.

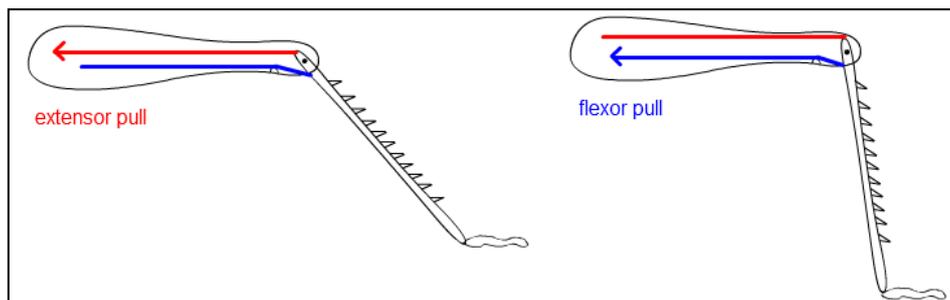


Figura 27. El sistema de palanca.
Fuente (Heilter, 2007)

Las piernas largas son una ventaja para saltar, ya que aumentan la distancia que el saltamonte puede empujar sobre el suelo. La parte gruesa en la parte superior de la pierna (fémur) contiene los músculos que hacen que se mueva la parte inferior más delgada (tibia). El pie al final de la pierna tiene garras afiladas, que le dan al saltamonte un buen agarre para que su pie no resbale cuando empuja el suelo al saltar. Fuente (Heilter, 2007), como se muestra en la Figura 28.

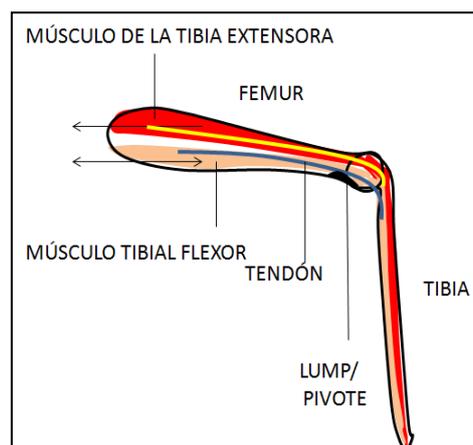


Figura 28. Diagrama ejemplificado de los músculos y tendones a comparación de las extremidades del robot articulado.

Al interpolar el diseño del robot con la pata de él insecto, consideramos al hombro, como la distancia entre ejes de acción de los motores unidos al cuerpo del robot. El segundo par

de servomotor representan el fémur y la tibia son los eslabones rígidos, cuya articulación de unión articulada por ejes, representados por tornillos, para terminar con un pie o casco. El fémur es el eslabón más robusto, mientras la tibia es el más largo y tiene correlación entre la longitud del triple de largo aproximadamente que en primera instancia, se denotada en el la fisiología del insecto y posteriormente interpretada como una necesidad al permitir que el robot no dé lugar a intercepciones con el piso.

3.3.2 Análisis cinemático de la extremidad

El análisis cinemático consta de varias consideraciones geométricas, para el estudio del movimiento de cada eslabón.

Las extremidades del robot, será considerada como una cadena cinemática formada por tres eslabones: Hombro, Fémur y tibia, tres servomotores que actúan como articulaciones, como se muestra en la Figura 29.

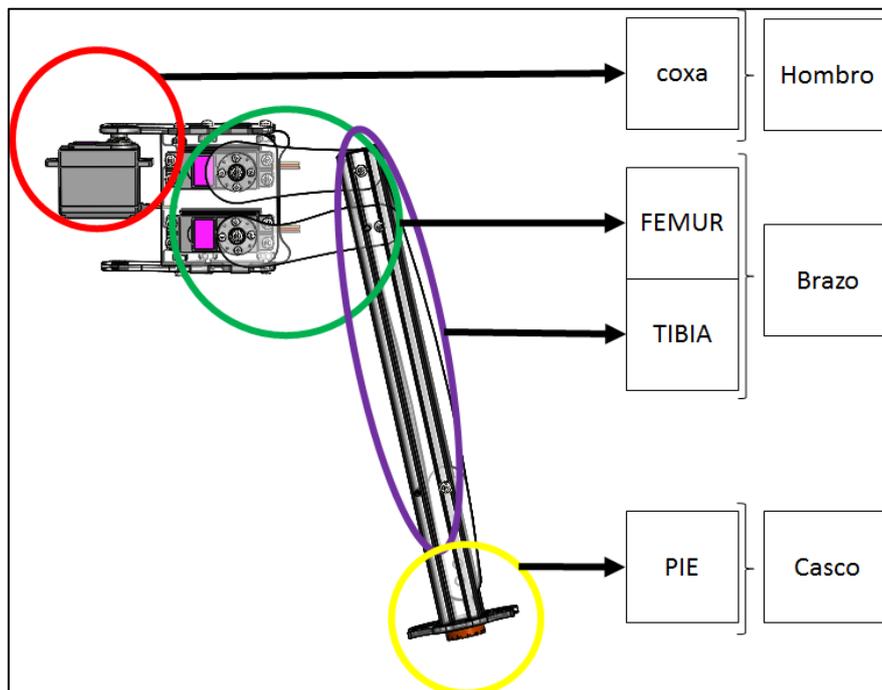


Figura 29. Módulos del robot.

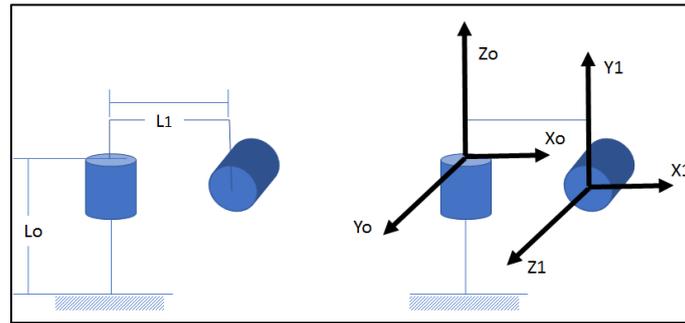


Figura 30. Módulos del robot.

3.3.3 Cinemática directa

La manera de moverse de los insectos en función al diseño del robot, está formada por rotaciones que se ejecutan por los diferentes elementos articulares y la geometría simplificada de sus extremidades.

Usando el logaritmo de Denavit & Hatemberg para facilitar el cálculo de la matriz de transformación que relacione la posición y orientación del extremo de la pata del robot respecto a un sistema de referencia.

Es suficiente el análisis de una sola extremidad debido a que contará con la misma disposición articular, tipo de movimiento, dirección y sentido de desplazamiento que las demás. Los parámetros de Denavid & Hatemberg definidos por el movimiento de toda la cadena, desde el hombro hasta el extremo en el brazo, se exponen a continuación. (ver la Tabla 6).

Tabla

6.

Parámetros de Denavit & Hatemberg de la extremidad del robot Hexápodo.

Nro	Articulación	θ	D	A	α	Θ
1	hombro	$q_1 + \pi/2$	L1	0	$\pi/2$	Q_1
2	brazo	q_2	0	L2	0	Q_2

De los parámetros geométricos del robot encontramos las matrices de transformación homogénea, correspondiente al problema cinemático de la extremidad, de acuerdo a la Ec.1 planteada por Barrientos, Peñin, Balaguer, Aracil (1997).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.1

Ec.1 matrices pertinentes para cada articulación. Teniendo en cuenta que $q'_i = q_i + q'_i{}^{desf}$.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q'_1) & 0 & -\sin(q'_1) & l_c \cos(q'_1) \\ \sin(q'_1) & 0 & -\cos(q'_1) & l_c \sin(q'_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.2

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q'_2) & -\sin(q'_2) & 0 & l_f \cos(q'_2) \\ \sin(q'_2) & \cos(q'_2) & 0 & l_f \sin(q'_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.3

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q'_3) & -\sin(q'_3) & 0 & l_t \sin(q'_3) \\ \sin(q'_3) & \cos(q'_3) & 0 & l_t \cos(q'_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.4

La matriz de localización T del extremo de la pata del robot con respecto a del hombro viene expresada por:

$$T = {}^0A_3 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3$$

Ec.5

Operando como está indicado en la Ec.5, se obtiene

$$T = \begin{bmatrix} n_x & O_x & a_x & p_x \\ n_y & O_y & a_y & p_y \\ n_z & O_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.6

En donde:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(q'_1) \cos(q'_2 + q'_3) & -\cos(q'_1) \sin(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_1) & p_x \\ \sin(q'_1) \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_1) \sin(q'_2 + q'_3) & -\cos(q'_1) & p_y \\ -\sin(q'_2 + q'_3) & \cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.7

Para el desarrollo de la matriz anteriormente descrita en el libro de Barrientos. (1997). Determina la orientación y el vector de posición p , podemos interpretar las posiciones del punto más extremo de la tibia con respecto a la articulación del hombro del robot, y corresponde a el vector de la cuarta de la matriz de localización del eslabón que corresponde a la tibia.

Se trasporta el sistema de referencia, de la matriz de localización T , al centro del robot, mediante su aplicación con una matriz de desplazamiento.

$$p_x = \cos(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

Ec.8

$$p_y = \sin(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

Ec.9

$$p_z = -l_t \sin(q'_2 + q'_3) - l_f \sin(q'_2)$$

Ec.10

Donde:

$$T' = {}^0_{A_3} \times T = {}^0_{A_3}$$

Ec.11

Se traslada el sistema de referencia de la matriz de localización T al centro del robot, mediante su aplicación con una matriz de desplazamiento, como se muestra en la Figura 31.

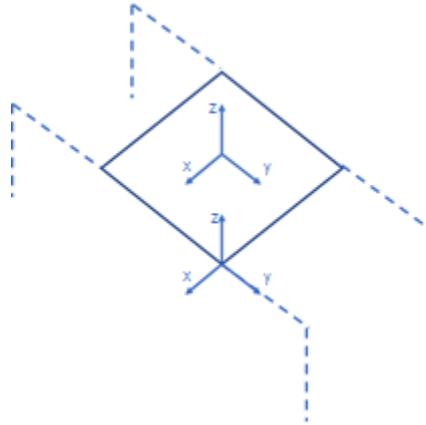


Figura 31. Traslación del sistema de referencia de la articulación de la coxa al centro del cuerpo.

Como resultado la matriz de desplazamiento al centro del cuerpo, está definida, por las coordenadas d_x , d_y y d_z respecto a la articulación del hombro del robot.

$${}^{0'}_{A_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 1 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.12

Las Ec.8, Ec.9 y Ec.10 representan la posición del pie con respecto al nuevo sistema de referencia en el centro del cuerpo del robot.

$$p_x = d_x + \cos(q'_1)[l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

Ec.13

$$p_y = d_y + \sin(q'_1)[l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

Ec.14

$$p_z = d_z - l_t \sin(q'_2 + q'_3) - l_f \sin(q'_2)$$

Ec.15

3.3.4 Cinemática inversa del método analítico

La cinemática inversa permite hallar las coordenadas articulares del robot necesarias para localizar el pie del robot en una posición y orientación deseada.

Operando la Ec.12 y Ec.13, se obtiene la ecuación que define el movimiento articular del hombro, como parte de la solución de la cinemática inversa.

$$q_1 = \arctan\left(\frac{p_y - d_y}{p_x - d_x}\right) - \frac{\pi}{2}$$

Ec.16

En base a la Ec.2 y la Ec.4 se obtiene la siguiente expresión:

$$\left({}^{0'} A_0\right)^{-1} \left({}^{0} A_1\right)^{-1} \times T' = {}^1 A_2 \times {}^2 A_3$$

Ec.17

Del desarrollo de la parte izquierda de la Ec.17, se tiene la matriz:

$$\left({}^{0'} A_0\right)^{-1} \left({}^{0} A_1\right)^{-1} \times T' = \begin{bmatrix} \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_2 + q'_3) & 0 & p'_x \\ \sin(q'_2 + q'_3) & \cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p'_y \\ 0 & 0 & 1 & p'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.19

Los términos corresponden a la cuarta columna de la matriz quedan definidos como:

$$p'_x = \frac{p_x \cos(q'_1) - p_y \sin(q'_1) - (l_c + d_x)[2\cos^2(q'_1) - 1]}{2\cos^2(q'_1) - 1}$$

Ec.20

$$p'_y = -p_z - d_y$$

Ec.21

$$p'_x = \frac{p_x \sin(q'_1) - p_y \cos(q'_1) - d_z[2\cos^2(q'_1) - 1]}{2\cos^2(q'_1) - 1}$$

Ec.22

Del desarrollo de la parte derecha de la Ec.22, se tiene la matriz:

$${}^1 A_2 * {}^2 A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_2 + q'_3) & 0 & p''_x \\ \sin(q'_2 + q'_3) & \cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p''_y \\ 0 & 0 & 1 & p''_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ec.23

Los términos correspondientes a la cuarta columna de la matriz quedan definidos como:

$$p''_x = l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)$$

Ec.24

$$p''_y = l_t \sin(q'_2 + q'_3) + l_f \sin(q'_2)$$

Ec.25

$$p''_z = 0$$

Ec.26

Igualando las ecuaciones Ec.18, Ec.19, Ec.20 a sus correspondientes, las ecuaciones Ec.22, Ec.23 y se obtiene las dos ecuaciones faltantes que definen el movimiento del fémur y la tibia respectivamente. Para la Ec.24 y Ec.25 se establece que $a=p'_x$ y $b = p'_y$ en las Ec.27.

$$q_2 = 2 \arctan \left\{ \frac{2bl_f \pm \sqrt{2(a^2 + b^2)(l_f^2 + l_t^2)(a^2 + b^2)^2 - (l_f^2 + l_t^2)^2}}{b^2 - l_t^2 + (a + l_f)^2} \right\} + 0.22$$

Ec.27

$$q_3 = \pm 2 \arctan \left\{ \frac{\sqrt{[(l_f + l_t) - (a^2 + b^2)]}}{\sqrt{(a^2 + b^2) - (l_f + l_t)^2}} \right\} + 0.59$$

Ec.28

3.3.5 Cinemática inversa (Método Geométrico)

Con el fin de encontrar los ángulos articulares del hombro, fémur y la tibia, dividimos el análisis de la extremidad en dos diagramas de dos dimensiones, como se muestra en la Figura 32.

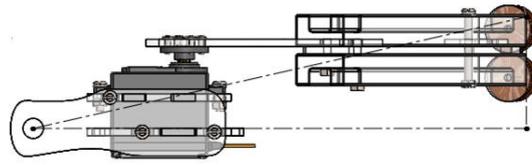


Figura 32. Vista superior de extremidades del robot.

En el plano (x,y), vista superior de la extremidad, se puede determinar la variable angular correspondiente a la articulación del hombro.

$$\tan(\gamma) = \frac{x}{y}$$

Ec.29

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)$$

Ec.30

La distancia L_1 corresponde a la hipotenusa del triángulo rectángulo formado por los vectores de x e y que forman el punto P (x, y) mostrando en la Figura 33. Por tanto, el valor de L_1 queda definido por:

$$L_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ec.31

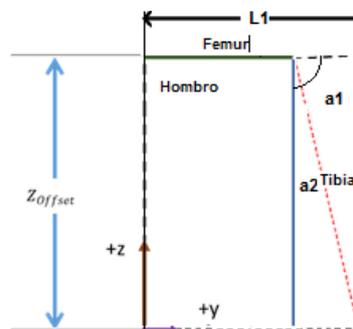


Figura 33. Diagrama Triangulo rectángulo.

Para determinar alfa y beta se utiliza el diagrama del plano (Y, Z), vista lateral, de la extremidad. De manera que se facilite su análisis se utilizará una metodología de resolución por triángulos. El ángulo alfa queda dividido en dos, teniendo como alfa 1:

$$L = \sqrt{z^2 + (L_1 - L_{HOMBRO})^2}$$

Ec.32

$$\tan(\alpha_1) = \frac{L_1 - L_{HOMBRO}}{Z}$$

Ec.33

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{L_1 - L_{HOMBRO}}{Z}\right)$$

Ec.34

Para alfa 2 se emplea el seno y del coseno, por lo cual tenemos:

$$L_{Tibia}^2 = L_{Femur}^2 + L^2 - 2 * L_{Femur} * L * \cos(\alpha_2)$$

Ec.35

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{L_{Femur}^2 + L^2 - L_{Tibia}^2}{2 * L_{Femur} * L}\right)$$

Ec.36

Sumando las ecuaciones 19 Y 20 se obtiene α .

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

Ec.37

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_1 + L \cos \alpha}{Z}\right) + \arccos\left(\frac{L_{Femur}^2 + L^2 - L_{Tibia}^2}{2 * L_{Femur} * L}\right)$$

Ec.38

El ángulo beta se expresa como:

$$L^2 = L_{Tibia}^2 + L_{Femur}^2 - 2 * L_{Tibia} * L_{Femur} * \cos^{-1}(\beta)$$

Ec.39

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_{Femur}^2 + L_{Tibia}^2 - L^2}{2 * L_{Femur} * L_{Tibia}}\right)$$

Ec.40

En base a los movimientos articulares y los desfases de cada variable articular indicados en la tabla 6, el desplazamiento angular de cada articulación se expresa como:

$$\text{Ángulo Del Hombro} = \gamma$$

Ec.41

$$\text{Ángulo Brazo} = \pi - 0.6 - \alpha$$

Ec.42

3.3.6 Análisis dinámico de la extremidad

El objetivo principal del análisis es hallar el torque necesario para el correcto movimiento de cada articulación, teniendo en cuenta la energía requerida para cada punto. Para aquello, se deberá determinar las relaciones existentes entre el movimiento de las patas del robot y las fuerzas aplicadas en las mismas.

Se realizará el modelo dinámico inverso mediante las ecuaciones de Lagrange-Euler. De acuerdo a Barrientos, las ecuaciones se basan en consideraciones energéticas y las fuerzas y partes requeridas de acuerdo a la evolución de sus coordenadas articulares y sus correspondientes derivadas.

La formulación Lagrangiana establece la siguiente ecuación:

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - U(\theta)$$

Ec.45

Los términos $K(\theta, \dot{\theta})$ y $U(\theta)$ corresponden a la energía cinética y a la energía potencial respectivamente. Mientras que θ y $\dot{\theta}$ definen la variable articular y su velocidad angular en cada articulación. Basado en la Ec.46 y para modelar el movimiento de un robot rígido den credos de libertad se formula:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \theta_i}$$

Ec.46

El modelado dinámico por energías de Euler-Lagrange, dependen de los parámetros físicos de IOS eslabones y articulaciones en la extremidad. Para el modelo dinámico de la extremidad usará la notación $S = \sin$ y $C = \cos$. Con 10 cual se procede al estudio de energías en cada eslabón de la pata del robot de acuerdo a las ecuaciones de Euler-Lagrange.

3.3.7 Análisis del primer eslabón- hombro

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec.47.

$$K_1 = \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2$$

Ec.47.

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec.38.

$$U_1 = m_1 * g * h_{CG1}$$

Ec.48.

3.3.8 Análisis del Segundo eslabón - Fémur

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec.49.

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2)$$

Ec.49.

Donde v_2 se encuentra en función de las velocidades lineales con respecto al centro de gravedad en cada eje cartesiano. Por lo tanto, la velocidad lineal al cuadrado se obtendrá de:

$$v_2^2 = \dot{x}_{CG2}^2 + \dot{y}_{CG2}^2 + \dot{z}_{CG2}^2$$

Ec.50.

Las coordenadas cartesianas del centro de gravedad del eslabón 2, correspondiente al fémur, con respecto al eje de referencia se definen Como:

$$x_{CG2} = I_1 C(\theta_1) + \frac{1}{2} I_2 C(\theta_1) C(\theta_2)$$

Ec,51

$$y_{CG2} = I_1 S(\theta_1) + \frac{1}{2} I_2 S(\theta_1) C(\theta_2)$$

EC. 52.

Por lo tanto, la velocidad lineal correspondiente a cada eje coordenado será:

$$\dot{X}_{CG2} = \dot{-}l_1 S(\theta_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} l_2 [-C(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_2]$$

Ec.53

$$\dot{y}_{CG2} = \dot{-}l_1 C(\theta_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} l_2 [C(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_2]$$

Ec.54

$$\dot{Z}_{CG2} = \frac{1}{2} l_2 C(\theta_2) \dot{\theta}_2$$

Ec.55

La velocidad lineal al cuadrado correspondiente a la Ec.56, está expresada en función de las velocidades angulares como:

$$V_2^2 = \left(l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2$$

Ec.56

Entonces, la energía cinética queda definida de acuerdo a la Ec.57.

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \left[\left(l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] + \frac{1}{2} I_2 \left(\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_2^2 \right)$$

Ec.58.

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec.59.

$$U_2 = m_2 g \left(h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right)$$

Ec.59

3.3.9 Análisis del tercer eslabón - Tibia

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec.60

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 + \frac{1}{2} I_3 \left(\dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 \right)$$

Ec.60

Las coordenadas cartesianas del centro de gravedad del eslabón 3, correspondiente a la tibia, con respecto al eje de referencia se definen como:

$$x_{CG3} = l_1 C(\theta_1) + l_2 C(\theta_1) C(\theta_2) + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

Ec.61

$$y_{CG3} = l_1 S(\theta_1) + l_2 S(\theta_1) C(\theta_2) + \frac{1}{2} l_3 S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

Ec.62

$$z_{CG3} = h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2)$$

Ec.63

Las velocidades angulares resultantes:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{CG3} = & -l_1 S(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [-C(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + \frac{1}{2} l_3 [-S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - C(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

Ec.64

$$\begin{aligned} \dot{y}_{CG3} = & -l_1 C(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [C(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + \frac{1}{2} l_3 [C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - S(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

Ec.65

$$\dot{z}_{CG3} = l_2 C(\theta_2) \dot{\theta}_2 - \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)$$

Ec.66

La energía cinética queda definida de acuerdo a la Ec.67.

$$\begin{aligned} K_3 = & \frac{1}{2} m_3 \left\{ \left[l_1 + l_2 C\theta_2 + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \right]^2 \dot{\theta}_1^2 \right. \\ & + \left[l_2^2 + \frac{1}{4} l_3^2 - l_2 l_3 S\theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) + l_2 l_3 C\theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2^2 \\ & + \left[-\frac{1}{2} l_3^2 + l_3 l_2 S\theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) - l_2 l_3 C\theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & \left. + \left(\frac{1}{4} l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \right\} + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2) \end{aligned}$$

Ec.67.

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec.68.

$$U_3 = m_3 g \left(h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right)$$

Ec.68.

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec.69.

$$U_4 = m_4 g (h_2 + l_2 S(\theta_2) - l_3 S(\theta_3 - \theta_2))$$

Ec.69

3.3.10 Análisis de energía total

Para poder trabajar con el Lagrangiano se necesita la energía cinética y potencial total del sistema, por lo que se procede a sumar las energías resultantes de cada eslabón. La Ec.60 y Ec.61 representan la energía cinética total y energía potencial total respectivamente.

$$K_T = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[\left(l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \ddot{\theta}_1^2 + \left(\frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2)$$

Ec.70

$$U_T = m_1 g h_{CG1} + m_2 g \left(h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right)$$

Ec.71

3.3.11 Teorema Lagrangiano

Obtenemos la ecuación 64:

$$L = \frac{1}{2} l_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[\left(l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] + \frac{1}{2} l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \left\{ m_1 g h_{CG1} + m_2 g \left(h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right) \right\}$$

Ec.72

3.3.12 Modelo del torque del eslabón 1

Sustituyendo la Ec.71 en la Ec.72 y operando respecto a la variable articular y la velocidad angular de la articulación del hombro, se obtiene la ec 73:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \left[I_1 + I_2 + I_3 + l_1^2(m_2 + m_3 + m_4) + l_2^2 C^2 \theta_2 \left(\frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) \right. \\ & + l_3^2 C^2 (\theta_3 - \theta_2) \left(\frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) + l_1 l_2 C \theta_2 (m_2 + 2m_3 + 2m_4) \\ & \left. + l_3 C (\theta_3 - \theta_2) (l_1 + l_2 C \theta_2) (m_3 + 2m_4) \right] \ddot{\theta}_1 \end{aligned}$$

Ec.73

3.3.13 Modelo del torque del eslabón 2

Operando respecto a la variable articular y la velocidad angular de la articulación del fémur, se Obtiene la Ec.74:

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \left[I_2 + I_3 + l_2^2 \left(\frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) + l_3^2 \left(\frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) + l_2 l_3 C \theta_3 (m_3 + 2m_4) \right] \ddot{\theta}_2 \\ & + [l_2 l_3 S(\theta_3) (-m_3 - 2m_4)] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left[l_2^2 S \theta_2 C \theta_2 \left(\frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) + l_1 l_2 S \theta_2 \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_4 \right) \right. \\ & + l_3 (l_1 S(\theta_3 - \theta_2) + l_2 S(\theta_3 - 2\theta_2)) \left(-\frac{1}{2} m_3 - m_4 \right) \\ & \left. + l_3^2 S(\theta_3 - \theta_2) C(\theta_3 - \theta_2) \left(-\frac{1}{4} m_3 - m_4 \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + \left[g l_2 C \theta_2 \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_4 \right) + g l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \left(\frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) \right] \end{aligned}$$

Ec.74

Se calcula los ángulos de las extremidades, a través de un mecanismo de cuatro barras que dispone mayor ventaja mecánica, pero menor agilidad en los movimientos.

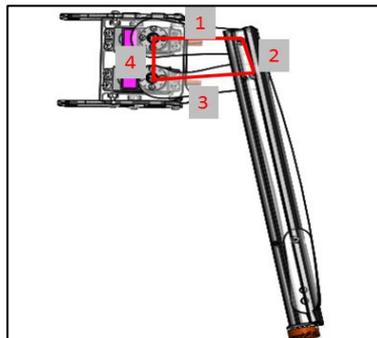


Figura 34. Numeración del sistema de cuatro barras.

De esta manera se tiene la necesidad de nuevos cálculos que permitan determinar los ángulos de desplazamiento del fémur y la tibia.

La Ley de Grashof es una fórmula utilizada para analizar el tipo de movimiento que hará el mecanismo de cuatro barras: para que exista un movimiento continuo entre las barras, la suma de la barra más corta y la barra más larga no puede ser mayor que la suma de las barras restantes. Ver figura 35.

$$S + L \leq P + Q$$

Ec.75

Dado:

S = longitud del eslabón más corto

L = longitud del eslabón más largo

P = longitud de un eslabón restante

Q = longitud de otro eslabón restante

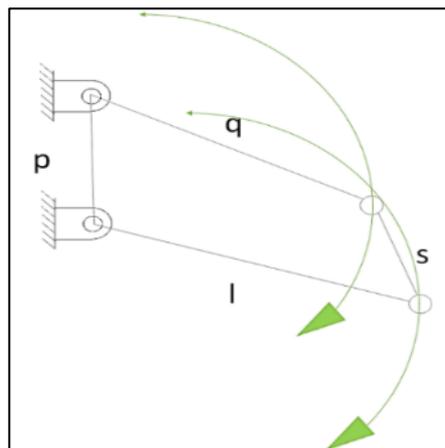


Figura 35. movimiento continuo entre cuatro barras.

3.3.14 Análisis de posición

Por mediciones físicas fácilmente se pueden tener las longitudes de las barras 1, 2, 3, 4. Ya que la barra 1 es estacionaria, su ángulo es fijo. Se dice que el ángulo de la barra 2 con respecto a la horizontal es una variable controladora. Por lo tanto, las incógnitas serán los ángulos de las barras 3 y 4. ver figura 36.

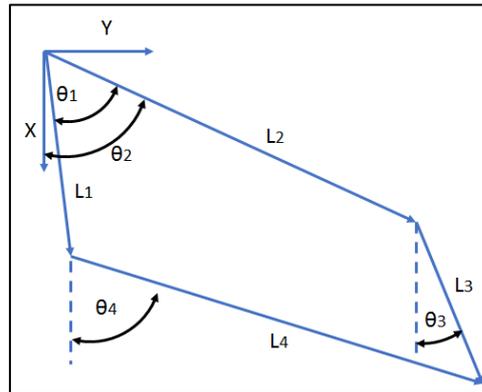


Figura 36. Determinación de ángulos reales en el robot por el metodo de cuatro barras.

$$L1=3.1\text{cm}$$

$$L2=7.4\text{cm}$$

$$L3=3.2\text{cm}$$

$$L4=7.5\text{cm}$$

Con base en el lazo de, la ecuación vectorial es

$$\vec{L}_2 + \vec{L}_3 = \vec{L}_1 + \vec{L}_4$$

Ec.76

Utilizando la notación de Euler, (1) se reescribe como

$$L_4 e^{i\theta_2} + L_3 e^{i\theta_3} = L_1 e^{i\theta_1} + L_4 e^{i\theta_4}$$

Ec.79

La expansión de componentes real e imaginaria permite establecer.

$$L_2 \cos\theta_2 + L_3 \cos\theta_3 = L_1 \cos\theta_1 + L_4 \cos\theta_4$$

Ec.80

$$L_2 \text{sen}\theta_2 + L_3 \text{sen}\theta_3 = L_1 \text{sen}\theta_1 + L_4 \text{sen}\theta_4$$

Ec.81

La solución de (80) y (81) mediante el uso de las identidades de la tangente del ángulo medio presentadas en (79), permite hallar las expresiones para los ángulos θ_3 y θ_4 , presentadas en (82) y (83), respectivamente, donde:

$$A = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos\theta_2$$

Ec.82

$$B = L_1 \text{sen}\theta_1 + L_2 \text{sen}\theta_2$$

Ec.83

$$C = \frac{A^2 + B^2 + L_3^2 - L_4^2}{2L_3}$$

Ec.84

$$D = \frac{L_3^2 - L_4^2 + A^2 - B^2}{2L_4}$$

Ec.85

$$\text{sen}(2\theta) = \frac{2\tan\theta}{1 + \tan^2\theta}$$

Ec.86

$$\text{cos}(2\theta) = \frac{1 - \tan^2\theta}{1 + \tan^2\theta}$$

Ec.87

$$\theta_3 = 2\tan^{-1}\left(\frac{2B \pm \sqrt{4B^2 - 4(C^2 - A^2)}}{2(C + A)}\right)$$

Ec.88

$$\theta_4 = 2\tan^{-1}\left(\frac{2B \pm \sqrt{4B^2 - 4(D^2 - A^2)}}{2(D + A)}\right)$$

Ec.89

Para comprobar las soluciones dadas por la aplicación, los resultados a problemas tipo de un curso de Teoría de Mecanismos obtenidos con la aplicación desarrollada se comparan con los resultados de libros de texto y otra herramienta disponible, tal como una interfaz gráfica de usuario-GUI desarrollada en GUIDE de Matlab [10].

A. Validación de análisis de posición

Se comparan los resultados de un ejercicio propuesto en la referencia de autor R. Norton [18] para análisis de posición de un mecanismo de 4 barras, con datos de entrada mostrados en la tabla 7. La tabla 8 presenta los resultados de la solución obtenida por el mismo autor; los resultados obtenidos utilizando la interfaz de la referencia [10] y los arrojados por la aplicación desarrollada. Se obtuvieron los mismos resultados en cada caso.

Tabla 7.

Análisis de datos de entrada de posición.

Fila	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3	Eslabón 4	θ_1	θ_2
g	3.1 cm	7.4 cm	3.2 cm	7.5 cm	90	91
Mathlab	3.112cm	7.451cm	3.233cm	7.496cm	90.2	91.01

Tabla 8.

Ángulos abiertos y cruzados que se forman en las cuatro barras.

Fuente	θ_1 abierto (°)	θ_2 abierto (°)	θ_1 cruzado (°)	θ_2 cruzado (°)
Norton	25.01	26.02	50.10	51.11
Mathlab	25.01	26.02	50.10	51.11

Fuente: (Norton, 2017)

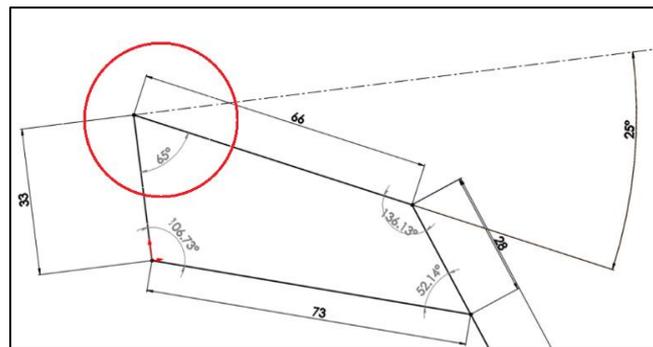


Figura 37. Ángulo de desplazamiento de 25 grados, generado por la estructura del brazo, sin intercepciones, gracias al cálculo de barras.

Entonces, considerando estos dos elementos, intensidad de la fuerza y distancia de aplicación desde su eje, el momento de una fuerza es, igual al producto de la intensidad de la fuerza (módulo) por la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el eje de giro.

Expresada como ecuación, la fórmula es:

$$M = F * d$$

Ec.90

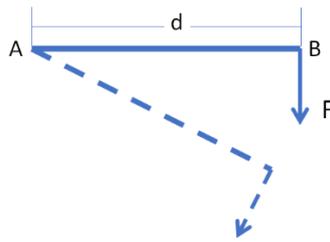


Figura 38. Diagrama momento de fuerza.

Donde:

M = es momento o torque en **Newton por**

F = fuerza aplicada en **Newton**

d = distancia al eje de giro en **Centímetro**

La distancia **d** recibe el nombre de “brazo de la fuerza”.

Donde la fuerza generada por uno de los servomotores es de 9 Newtons y por consiguiente para mover el hombro.

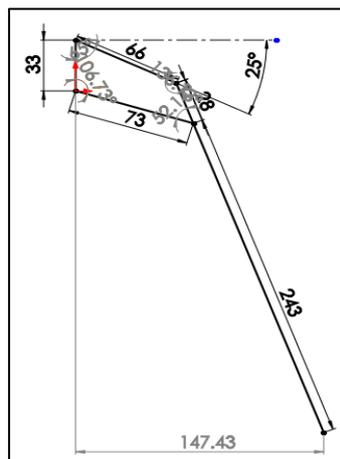


Figura 39. Distancia máxima del servo al punto más extremo de la pata es (D1)

$$D1 = 0.14743 \text{ m}$$

Y la fuerza aplicada por el servomotor es:

$$M1 = 10 \cdot 147.43 \text{ cm}$$

$$\text{Ec.91}$$

$$M1 = 13,27 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Donde la fuerza generada por dos de los servomotores es de 18 Newtons y por consiguiente para mover el brazo, como se observa en la Figura 40.

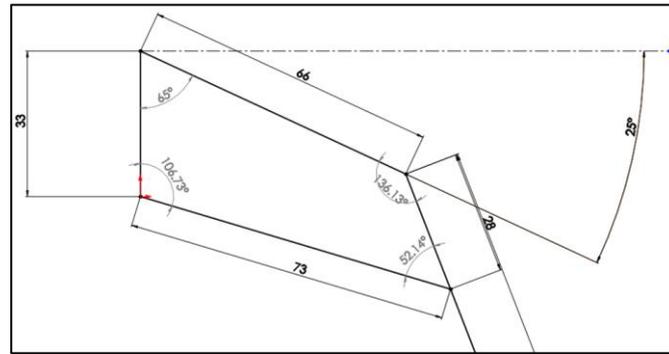


Figura 40. Distancia máxima del servo al punto más extremo del hombro

$$M2 = 18 \cdot 73$$

Ec.92

$$M2 = 1,314 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Se debe considerar un factor en porcentaje de 0.8% de la reacción del robot contra el suelo, debido a las tensiones producidas por sumergirse en arena. De donde el mínimo momento permisible para que se mueva el servomotor es:

$$M2 = 1,314 \text{ N} \cdot \text{cm} + 1,314 \cdot 0.8 \text{ N} \cdot \text{cm} = 2.365 \text{ N} \cdot \text{cm. para que se mueva en arena}$$

3.3.15 Elección de material de la estructura

Para la construcción del exoesqueleto, a semejanza del arácnido, se seleccionó materiales idóneos para que beneficie al desplazamiento del robot.

Tabla 9.

Alternativas de material para la estructura.

SOLUCIÓN	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES
A Polímero transparente D-790	Costo bajo Densidad 1190 kg/m^3 Resistencia a la tracción 230-570 MPa Conductividad térmica 80-230 W/m0K Termo estable, No reciclable.
B Polimetilmetacrilato (PMMA)	COSTO ALTO Densidad 1190 Kg/m^3 Resistencia la tracción 47-79 MPa

	Conductividad térmica W/m ⁰ K No reciclable
C Acrílico transparente	COSTO MEDIO Densidad 1040 Kg/mA ³ . Resistencia a la tracción 58-90 MPa Baja conductividad térmica W/m ⁰ K Termo flexible, Reciclable. No biodegradable

Se desarrolla una tabla 10 de ponderación de acuerdo a la importancia de los criterios a tomar en cuenta para la construcción de las extremidades del robot.

Tabla 10.

Ponderación de criterios para la selección del material de las extremidades.

CRITERIO	A	B	C	D	E	$\Sigma+1$	Ponderación	
Costos	-	2.5	2.5	2.5	5	13.5	0.2455	
(A)								
Propiedades mecánicas	2.5	-	5	0	2.5	11	0.2901	
(B)								
Resistencia intemperie	2.5	0	-	0	2.5	6	0.1091	
(C)								
Disponibilidad	2.5	5	5	-	5	18.5	0.2909	
(D)								
Fácil manufactura	0	2.5	2.5	0	-	6	0.0636	
(E)								
						Total	55	10.000

Tabla 11.*Evaluación de las alternativas según el costo.*

COSTO A	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	$\Sigma+$	PON-
	A	B	C	1	DERACIÓN
SOLUCIÓN	-	0	0	1	0.06
A					
SOLUCIÓN	5	-	2.5	8.5	0.47
B					
SOLUCIÓN	5	2.5	-	8.5	0.47
C					
			TOTAL	18	1

Tabla 12.*Evaluación de las alternativas respecto a las propiedades mecánicas.*

PROPIEDADES	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	$\Sigma+1$	PON-
MECÁNICAS B					DERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	5	5	11	0.61
SOLUCIÓN B	0	-	0	1	0.06
SOLUCIÓN C	5	5	-	6	0.33
			TOTAL	18	1

Tabla 13.*Evaluación de las alternativas respecto a la facilidad de reciclaje.*

TERMO-	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	Σ	PON-
SENSIBILIDAD				+	DERACIÓN
C					
SOLUCIÓN A	-	2.5	5	8.5	0.47
SOLUCIÓN B	2.5	-	5	8.5	0.47
SOLUCIÓN C	0	0	-	1	0.06
			TOTAL	18	1

Tabla 14.*Evaluación de las alternativas respecto a la disponibilidad en el mercado.*

DISPONIBILIDAD D	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	Σ	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	0	0	1	0.06
SOLUCIÓN B	5	-	2.5	8.5	0.47
SOLUCIÓN C	5	2.5	-	8.5	0.47
			TOTAL	18	1

Tabla 15.*Evaluación de las alternativas respecto a su facilidad de manufactura.*

FÁCILIDAD DE MANUFACTURA	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	Σ	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	0	0	1	0.06
SOLUCIÓN B	5	-	5	11	0.61
SOLUCIÓN C	5	0	-	6	0.33
			TOTAL	18	1

Tabla 16.*Resultados de la prioridad de materiales a ser usados en las extremidades.*

SOLUCIÓN	A	B	C	D	E	Σ	PRIORIDAD
	24.50%	29.10%	10.90%	29.10%	6.40%		
A	0.0136	0.1778	0.0515	0.0162	0.0035	0.26	26.26
B	0.1159	0.0162	0.0515	0.1374	0.1374	0.35	35.98
C	0.1159	0.097	0.0061	0.1374	0.1374	0.37	37.75
				TOTAL		1	100

La mejor alternativa de material para la construcción de las extremidades del robot es la Solución C correspondiente al acrilonitrilo butadieno estireno (Acrílico transparente). Debido a su facilidad de maquinado y bajo costo.

3.3.16 Selección de servomotores

Las dimensiones físicas de la extremidad del robot vienen definidas por lo estipulado en el apartado 32.1 y la masa de los elementos de acuerdo al material seleccionado para su fabricación en el apartado 32.1.3.

Tabla 17.
Alternativas de servomotores.

SOLUCIÓN		CARACTERÍSTICAS	DATOS
	A	COSTO:	\$ 49.99
		Peso:	55 g.
		Torque:	19.8 Kg cm (4.3 V)
		Tamaño:	66X30X57.6 mm
		Velocidad:	O. 19s/60°
	Facilidad en sujeción para el diseño.	Sujeción compleja para diseño.	
	B	COSTO:	\$ 94.90
		Peso:	152 g.
		Torque:	20 kg.cm (6.6 V)
		Tamaño:	40.7 x 20.5 x 39.5 mm
		Velocidad:	O. 103 s/ 60°
	Facilidad en sujeción para el diseño.	Sujeción compleja para diseño.	
	C	COSTO:	\$ 20.36
		Peso:	55 g.
		Torque:	9.8 Kg.cm (4.8 V)
		Tamaño:	40X20X43 mm
		Velocidad:	0.17 s/60°

Facilidad en sujeción Facilidad en sujeción
para el diseño.

Tabla 18.

Ponderación de criterios para la selección de los servomotores.

CRITERIO	A	B	C	D	E	F	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
COSTO A	-	2.5	2.5	5	2.5	2.5	16	0.1975
TORQUE B	2.5	-	2.5	2.5	5	5	18.5	0.2284
VELOCIDAD C	2.5	2.5	-	0	5	5	16	0.1975
PESO D	0	2.5	5	-	5	2.5	16	0.1975
FÁCIL SUJECIÓN E	2.5	0	0	0	-	5	8.5	0.1049
TAMAÑO F	2.5	0	0	2.5	0	-	6	0.0741

Para la valoración de los criterios se toman en cuenta factores intrínsecos respecto al costo: una difícil sujeción conlleva a la fabricación de otra pieza de acople y un mayor tamaño involucra piezas más grandes. Estos factores involucran un gasto adicional.

Tabla 19.

Evaluación de las alternativas respecto al costo.

COSTO A	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	0	0	1	0.056
SOLUCIÓN B	5	-	5	11	0.611
SOLUCIÓN C	5	0	-	6	0.333
			TOTAL	18	1

Tabla 20.*Evaluación de las alternativas respecto torque.*

COSTO B	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	Σ	PONDERA
	A	B	C		-CIÓN
SOLUCIÓN	-	0	2.5	3.5	0.194
A					
SOLUCIÓN	5	-	5	11	0.611
B					
SOLUCIÓN	2.5	0	-	3.5	0.194
C					
TOTAL				18	1

Tabla 21.*Evaluación de las alternativas respecto a la velocidad.*

COSTO B	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	Σ	PON-
	A	B	C		DERACIÓN
SOLUCIÓN	-	2.5	0	3.5	0.184
A					
SOLUCIÓN	2.5	-	0	3.5	0.18
B					
SOLUCIÓN	5	5	-	11	0.611
C					
TOTAL				18	1

Tabla 22.*Evaluación de las alternativas respecto al peso.*

PESO D	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	Σ	PON-
	A	B	C		DERACIÓN
SOLUCIÓN	-	5	0	6	0.333
A					
SOLUCIÓN	0	-	0	1	0.059
B					

SOLUCIÓN C	5	5	-	11	0.611
TOTAL				18	1

Tabla 23.

Evaluación de las alternativas respecto a la fácil sujeción.

FÁCIL SUJECIÓN E	SOLUCIÓN N A	SOLUCIÓN N B	SOLUCIÓN N C	\sum	PON- DERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	2.5	0	3.5	0.203
SOLUCIÓN B	2.5	-	0	3.5	0.201
SOLUCIÓN C	5	5	-	11	0.61
TOTAL				18	1

Tabla 24.

Evaluación de las alternativas respecto al tamaño.

TAMAÑO F	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	\sum	PON- DERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	5	2.5	8.5	0.502
SOLUCIÓN B	0	-	0	1	0.041
SOLUCIÓN C	2.5	5	-	8.5	0.514
TOTAL				18	1

Por lo que se procede a seleccionar la opción C servomotor 996r, por costo, bajo peso. A un voltaje de 4.8 y con facilidad de montaje. Además, tiene la particularidad de que es abundante en el mercado local y presenta la facilidad de ser remplazado en caso de daño.

3.3.17 Selección de batería.

De acuerdo a la selección de servomotores del apartado 3.2.1.4 es necesario disponer de un suministro de energía que satisfaga su voltaje y amperaje de alimentación.

Tabla 25.

Alternativas de baterías.

SOLUCIÓN		CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	
Batería polímero de Litio MINIMAX 	A	COSTO:	ALTO
		DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO:	ALTA
		Auto- descarga:	0.3% DIARIO
		VIDA ÚTIL:	10000 CICLOS
		CONTAMINANTE:	Si
Batería Niquel - Cadmio 	B	COSTO:	BAJO
		DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO:	BAJA
		Auto- descarga:	1% DIARIO
		VIDA ÚTIL:	1000 CICLOS
		CONTAMINANTE:	Si
Batería Niquel-Hidruro metálico	C	COSTO:	BAJO
		DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO:	MEDIO

	Auto- descarga:	1.5 DIARIO
	VIDA ÚTIL:	1000 CICLOS
	CONTAMINANTE:	Sí

Tabla 26.

Ponderación de criterios para la selección de la batería.

CRITERIO	A	B	C	D	Σ	PONDERACIÓN
COSTO A	-	0	2.5	6	6	0.1905
DENSIDAD						
ALMACENAMIENTO B	5	-	2.5	13.5	13.5	0.4286
AUTO DESCARGA C	2.5	0	-	6	6	0.1905
VIDA ÚTIL D	2.5	0	2.5	6	6	0.1905
TOTAL					31.5	1

Tabla 27.

Evaluación de las alternativas respecto al costo.

COSTO A	A	B	C	Σ	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	0	0	1	0.056
SOLUCIÓN B	5	-	2.5	8.5	0.472
SOLUCIÓN C	5	0	-	8.5	0.472
TOTAL				18	1

Tabla 28.

Evaluación de las alternativas respecto a la densidad de almacenamiento.

DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO B	SOLUCIÓN A	SOLUCIÓN B	SOLUCIÓN C	Σ	PONDERACIÓN
SOLUCIÓN A	-	5	5	1	0.611
SOLUCIÓN B	0	-	0	1	0.056
SOLUCIÓN C	0	5	-	6	0.333
TOTAL				8	1

Tabla 29.

Evaluación de las alternativas respecto a la descarga por funcionamiento.

AUTO DESCARGA	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	Σ+1	PONDERACIÓN
C	A	B	C		
SOLUCIÓN	-	5	5	11	0.611
A					
SOLUCIÓN	0	-	5	6	0.333
B					
SOLUCIÓN	0	0	-	1	0.056
C					
			TOTAL	18	1

Tabla 30.

Evaluación de las alternativas respecto a la Vida útil.

VIDA ÚTIL	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	SOLUCIÓN	Σ+1	PONDERACIÓN
D	A	B	C		
SOLUCIÓN A	-	0	0	1	0.056
SOLUCIÓN B	5	-	2.5	8.5	0.472
SOLUCIÓN C	5	2.5	-	8.5	0.472
			TOTAL	18	1

Tabla 31.

Resultados de prioridad para la selección de la batería.

	19.05%	42.85%	19.05%	19.05%	Σ	PRIORIDAD
	A	B	C			
SOLUCIÓN A	0.011	0.262	0.116	0.011	0.399	39.95
SOLUCIÓN B	0.09	0.024	0.063	0.09	0.267	26.72
SOLUCIÓN C	0.09	0.143	0.011	0.09	0.333	33.33
			TOTAL		1.000	100

Determinamos que la mejor solución es la batería A, que corresponde a la batería de Polímero de Litio, minimax. Siendo necesario determinar una capacidad de batería adecuada se debe calcular el amperaje utilizado por el sistema.

Tabla 32.

Voltajes y amperajes necesarios para los elementos del robot.

ELEMENTOS	N° DE ELEMENTOS	VOLTAJE	AMPERAJE	AMPERAJE TOTAL
ROBOT TETRÁPODO	#	V	mA	mA
ARDUINO	1	5	200	200
SERVOS	15	5	100	1500
ULTRASÓNICO	5	3.3	60	66
BLUETOOTH	1	3.3	50	10
INFRARROJO	1	1.1	20	20
ACELERÓMETRO	1	3.3	50	20
AMPERAJE TOTAL NECESARIO mA				1816 mA

Considerando que todos los elementos del robot están trabajando de forma simultánea se tendrá una capacidad de 1.8 amperios por hora y 21,1 V de salida. de acuerdo a las especificaciones descritas en la Tabla 32, se tiene una duración mínima determinada en la Ec.82.

$$t_{DBat} = \frac{C_{bateria}[mAh]}{A_{total}[mA]}$$

Ec.82.

$$t_{DBat} = \frac{1.8 A * horas}{2.1 A}$$

$$t_{DBat} = 0.85 horas = 51 minutos$$

3.3.18 Cálculo de potencia necesaria para impulsar el tornillo sin fin.

Tabla 33.

Velocidad de giro recomendada.

Diámetro del tornillo (mm)	Velocidad máxima (rpm) según la clase de material (^)				
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
100	180	120	90	70	30
200	160	110	80	65	30
300	140	100	70	60	25
400	120	90	60	55	25
500	100	80	50	50	25
600	90	75	45	45	25

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

Donde:

$$n := 50 rpm$$

Materiales de Clase I

Los materiales de Clase I son principalmente materiales pulverulentos, no abrasivos, que tienen un peso específico que se sitúa entre 0,4 -0,7 t/m³ aproximadamente, y que fluyen fácilmente. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Tabla 34.

Materiales de Clase I.

Material de Clase I

Cebada, trigo, malta, arroz y similares

Harina de trigo y similares

Carbón en polvo

Cal hidratada y pulverizada

Trigo y similares

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

3.3.19 Materiales de Clase II

Los materiales de Clase II son materiales que se presentan en granos o pequeños tamaños, mezclados en polvo, son de naturaleza no abrasiva, que fluyen fácilmente. Su

peso específico se sitúa entre 0,6 – 0,8 t/m³. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Tabla 35.

Materiales de Clase II.

<i>Materiales de Clase II</i>
Cebada, trigo, malta, arroz y similares.
Harina de trigo y similares.
Carbón en polvo.
Cal hidratada y pulverizada

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

Materiales de Clase III

Los materiales de Clase III son materiales semi-abrasivos de pequeño tamaño, mezclados con polvos, con peso específico que se sitúa entre 0,6 -1,2 t/m³. Entre los materiales pertenecientes a esta clase están:

Tabla 36.

Materiales de Clase III.

<i>Materiales de Clase III</i>
Alumbre en terrones.
Bórax.
Carbón vegetal.
Corcho troceado.
Pulpa de papel.
leche en polvo.
Sal.
Almidón.
Azúcar refinada.
Jabón pulverizado.

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

Área de relleno del canal

S es el área de relleno del transportador, en m²

D es el diámetro del canalón del transportador, en m

λ es el coeficiente de relleno de la sección

Tabla 37.

Valores del coeficiente de relleno.

Tipo de carga	Coeficiente de relleno, λ
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada y poco abrasiva	0.25
Ligera y poco abrasiva	0.32
Ligera y no abrasiva	0.4

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

$$\lambda := 0.4$$

$$D := 0.4$$

$$S := \frac{\pi \cdot D}{4}$$

$$\text{Ec.83}$$

$$S = 0.126$$

Donde v es la velocidad de desplazamiento del transportador, en m/s p es el paso del tornillo o paso de hélice, en m n es la velocidad de giro del eje del tornillo, en rpm
Determinación del flujo de material.

Q es el flujo de material transportado, en t/h

S es el área de relleno del transportador, en m^2 , visto en el apartado anterior

V es la velocidad de desplazamiento del transportador, en m/s, visto en el apartado anterior

P es la densidad del material transportado, en t / m^3

$$p := 0.12$$

$$v := \frac{p \cdot n}{60}$$

$$\text{Ec.84}$$

$$v := 0.01 \frac{rev}{min}$$

$$\text{Ec.85}$$

Tabla 38.

Capacidad de transporte debido a la inclinación.

inclinación del canalón	0°	5°	10°	15°	20°
I	1	0.9	0.8	0.7	0.6

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

Donde “*i*” es el coeficiente de disminución del flujo de material debido a la inclinación del transportador

$$v = 0.01 \frac{1}{s}$$

Ec.86

$$P := 0.73$$

$$i := 0.8$$

$$Q := 3600 \cdot S \cdot \rho$$

$$Q1 := 3600 \lambda * \frac{\pi \cdot D^2}{4} * \frac{p * n}{60} * \rho * i$$

Ec.87

$$Q1 = 1.107 \frac{1}{s}$$

Ec.88

Tabla 39.

Capacidad de transporte del tornillo sin fin:

∅ del tornillo (mm)	160	200	250	315	400	500	630	800
Paso de hélice (mm)	160	200	250	300	355	400	450	500
Velocidad normal (rpm)	70	65	60	55	50	45	40	35
Capacidad en horizontal al 100% (m ³ /h)	14	26	45	78	130	217	342	525

Fuente: (Hermenegildo, 2017)

Potencia total para el desplazamiento horizontal del material P_H

Q es el flujo de material transportado. En t/h

L es la longitud del transportador, en m

Co es el coeficiente de resistencia del material transportado.

Para conocer el valor de este

Tabla 40.

Coficiente de relleno.

Tipo de carga	Coficiente de relleno, λ
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada y poco abrasiva	0.25
Ligera y poco abrasiva	0.32
Ligera y no abrasiva	0.4

Fuente: (Hermenegildo , 2017)

$$C O := 0.4$$

$$L := 0.84$$

$$P H := C O \cdot \frac{Q \cdot L}{367} \text{ en kW}$$

Ec.89

Potencia de accionamiento del tornillo en vacío P_N

$$P N := \frac{D \cdot L}{20}$$

Ec.90

Potencia para el caso de un tornillo sin fin inclinado P_i

$$H := 3$$

$$P i := \frac{Q \cdot H}{367}$$

Ec.91

$$P H = 0.302$$

$$P N = 0.017$$

$$P i = 2.7$$

3.3.20 POTENCIA DE ACCIONAMIENTO

P es la potencia total de funcionamiento

$$P := P H + P N + P i$$

Ec.

$$Q1 := 1.107$$

$$Q L := 0.8$$

$$P := C_o \cdot \frac{Q L}{367} + \frac{D \cdot L}{20} + \frac{Q \cdot L}{367}$$

Ec.92

$$P := Q1 \left(\frac{C O \cdot L + H}{367} \right) + \frac{D \cdot L}{20}$$

Ec.93

$$P := 0.027 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$P := 2.7 \text{ N}\cdot\text{cm}$$

Por lo tanto, podemos asumir que el motor anteriormente seleccionado para el movimiento del robot, que tiene un torque de 9 N.cm, puede impulsar el tornillo sin fin.

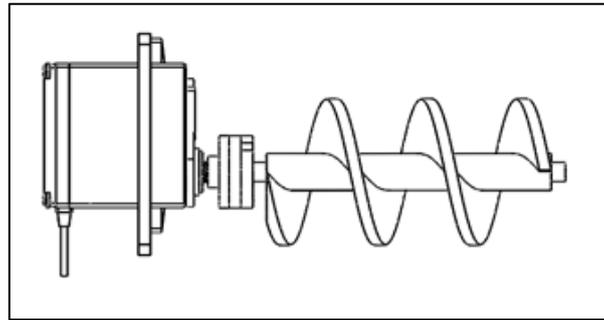


Figura 41. Conjunto Motor - Tornillo sin fin, usado en el robot para suministrar el maíz a ser contabilizado

3.3.21 Torque necesario para mover el mecanismo de perforación

Es indispensable la realización del cálculo de la fuerza necesaria para mover la manivela y la reacción que tiene el suelo, dependiendo su tipo y características, al ser perforando. Conociendo que el peso de la herramienta es despreciable y la reacción del suelo es la tensión superficial que ejerce la tierra de cultivo.

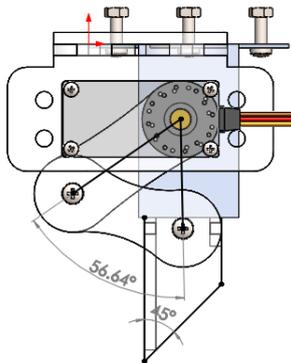


Figura 42. Ángulos del Tubo.

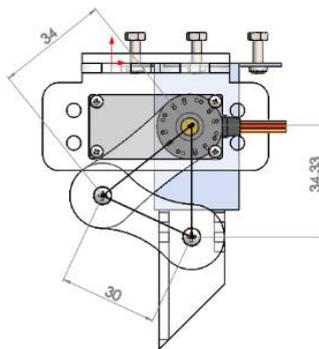


Figura 43. Diámetros mecanismo Tubo.

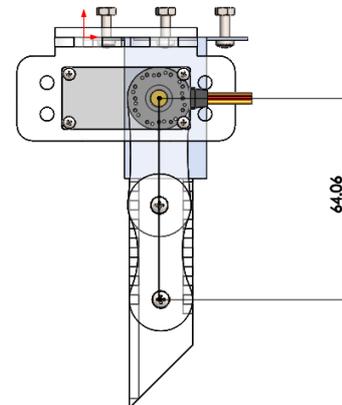


Figura 44. Longitud máxima Tubo.

Tabla 41.
Resistencia del terreno.

Denominación del terreno	Carga en Kg que soportan por cm ²
Cieno	2
Tierra vegetal mediana (después de consolidada)	0
Tierra con arena, escombros, cascajo (después de consolidada)	2
Esquisto silíceo, calizo, etc. (no susceptible de forma barro)	4

Tierra arcillosa, que pueda formar barro, en seco (en estado de pasta no puede soportar carga alguna)	4
Arena semihúmeda o gravilla no diluible e incompresible consolidadas	6
Marga	0
Arcilla saturada de agua	0
Arcilla seca	6
Fango húmedo	0
Tierra fuerte	0
Tierra vegetal	1
Tierra húmeda	0

Fuente: (Hidalgo Bahamontes, 2011)

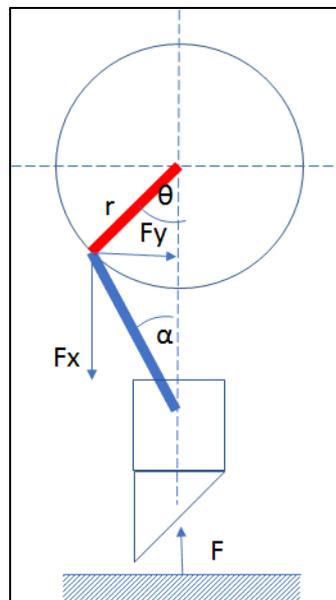


Figura 45. Sumatorias de fuerzas en la manivela

Done:

$$1 \text{ [kg / cm}^2\text{]} = 9.807 \text{ [N / cm}^2\text{]}$$

T es el torque necesario para perforar la tierra superficial

F es la fuerza aplicada sobre la tierra

B es el radio de la manivela = 34 [cm]

$$\alpha = 45.31$$

$$\theta = 56.64$$

$$T = F * \text{sen}\alpha * b * \text{cos}\theta - F * \text{cos}\alpha * b * \text{sen}\theta$$

$$\text{Ec.94}$$

$$T = F * b(\text{sen}\alpha * \text{cos}\theta - \text{cosa} * \text{sen}\theta)$$

Ec.95

$$\frac{1}{F} = \frac{b * (\text{sen}\alpha * \text{cos}\theta - \text{cosa} * \text{sen}\theta)}{T}$$

Ec.96

$$F = \frac{T}{b * (\text{sen}\alpha * \text{cos}\theta - \text{cosa} * \text{sen}\theta)}$$

Ec.97

$$F = 1.45 \text{ N*cm}$$

3.3.22 FACTOR DE SEGURIDAD

Se emplea un emplean el factor de seguridad para asegurarse contra-condiciones inciertas o desconocidas. El factor de seguridad es la relación entre los esfuerzos normal permisible y el esfuerzo normal de diseño. (Calle W. , 2012)

$$n_s = \frac{\sigma_{per}}{\sigma_d}$$

Ec.98

Si $n_s > 1$ el diseño es adecuado. Entre mayor sea n_s más seguro será el diseño.

Donde:

n_{xx}: Factor de seguridad que involucran características A, B y C

n_{yy}: Factor de seguridad que involucran características D y E

A: Calidad de los materiales.

B: Control sobre la carga aplicada.

C: Exactitud del análisis del esfuerzo.

D: Peligro para el personal.

E: Impacto económico.

Tabla 42.

Factor de seguridad

Característica		B				
		mb	b	r	p	
A=mb	C=	mb	1.1	1.3	1.5	1.7

A=b	C=	B	1.2	1.45	1.7	1.95
		R	1.3	1.6	1.9	2.2
		P	1.4	1.75	2.1	2.45
		mb	1.3	1.55	1.8	2.05
		B	1.45	1.75	2.05	2.35
		R	1.6	1.95	2.3	2.65
A=r	C=	P	1.75	2.15	2.55	2.95
		mb	1.5	1.8	2.1	2.4
		B	1.7	2.15	2.55	2.95
		R	1.9	2.3	2.7	3.1
A=p	C=	P	2.1	2.55	3	3.45
		mb	1.7	2.05	2.4	2.75
		B	1.95	2.35	2.75	3.15
		R	2.2	2.65	3.1	3.55
		P	2.45	2.95	3.45	3.95

mb=muy bien

b=bien

r=regular

p=pobre

Fuente: (Calle W. , 2012)

A= mb, porque amenaza vidas

B= r ó p, puesto que son posibles sobrecargas.

C= mb, debido a que está altamente regulado.

D= ms, porque puede morir gente si el elevador se cae,

E= s, demandas posibles.

De la tabla 42 del documento obtenemos los valores de n_{xx} y n_{yy}

$$n_s = n_{xx} * n_{yy}$$

Ec.99

$$n_s = (1.6) * (1.5)$$

El factor de diseño es de:

$$n_s = 2.4$$

Por análisis del diseño CAD, observamos la masa total que tiene el robot con todas sus partes. y su centro de masa. Ver figura 46.

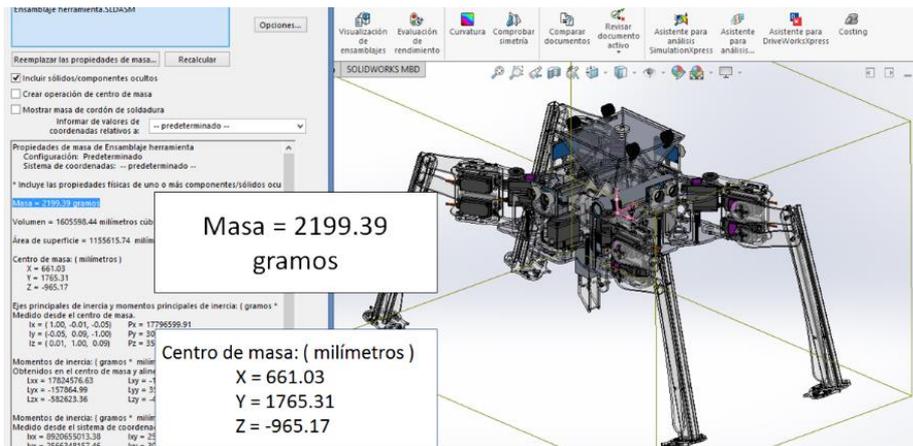


Figura 46. Captura de pantalla SolidWorks, Ensamble total robot.

Se realizó un análisis de cargas normales sobre la tibia, asumiendo que la tercera parte la masa del robot ejerció una fuerza equivalente a 14.1 Newtons, con un factor el 2.4. Ver figura 47.

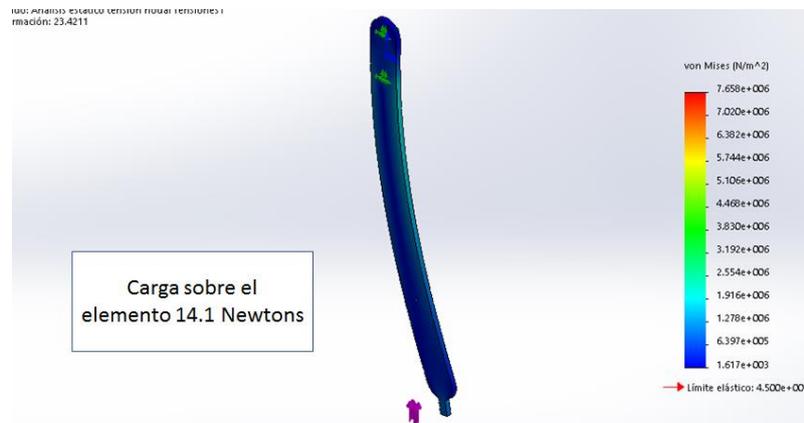


Figura 47. Captura de pantalla SolidWorks, tibia robot.

Se realizó un análisis de cargas axiales sobre la tibia, dado que, al realizar una secuencia de movimiento, un paso significa que el máximo peso posible que se puede ejercer sobre una extremidad, es la tercera parte la masa del robot.

Una fuerza equivalente a 11.025 Newtons, con un factor de 2.4. Ver figura 48. Donde se evidenció una flexión excesiva, para lo cual se realizó un análisis sobre los refuerzos de la tibia.

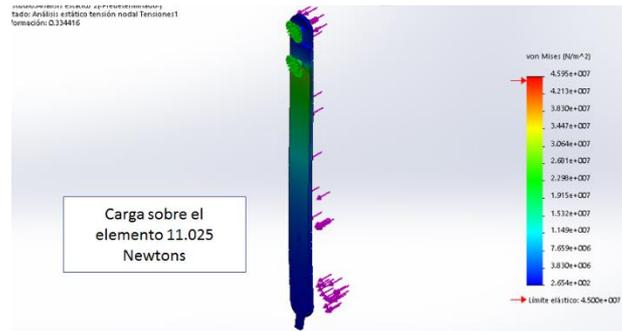


Figura 48. Captura de pantalla SolidWorks, tibia robot.

Se realizó un análisis de cargas normales sobre el refuerzo de la tibia, asumiendo que la octava parte la masa del robot ejerció una fuerza equivalente a 5.25 Newtons, con un factor de 2.4. Ver figura 49.

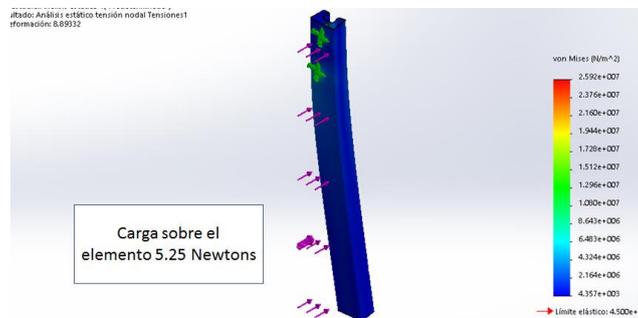


Figura 49. Captura de pantalla SolidWorks, refuerzo de tibia robot.

Se realizó un análisis de cargas normales sobre el fémur, asumiendo que la octava parte la masa del robot ejerció una fuerza equivalente a 5.5125 Newtons, con un factor de 2.4. Ver figura 50.

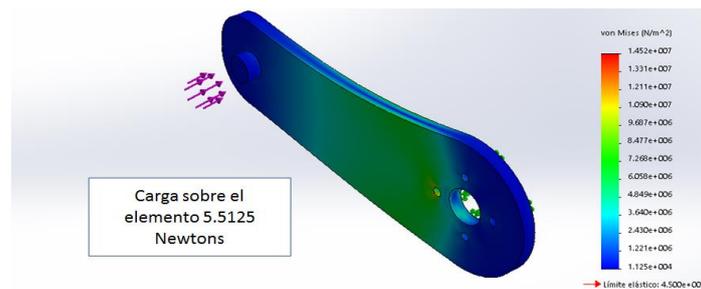


Figura 50. Captura de pantalla SolidWorks, fémur robot.

Se realizó un análisis de cargas axiales sobre el fémur, asumiendo que la octava parte la masa del robot ejerció una fuerza equivalente a 5.5125 Newtons, con un factor de 2.4. Ver figura 51.

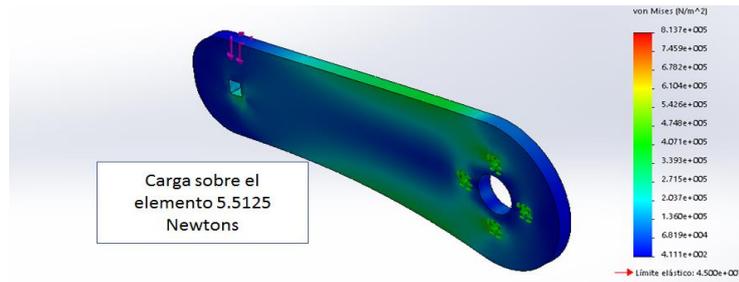


Figura 51. Captura de pantalla SolidWorks, fémur robot.

3.3.23 Módulo de balasto

Este parámetro asocia la tensión transmitida al terreno por una placa rígida, (base de la pata del robot), con la deformación o penetración de la misma en el suelo.

El cociente de la carga entre el asiento nos proporciona el coeficiente de balasto asociado a las dimensiones de la placa. Existen varios tipos de placas, las cuadradas de 30×30 cm o las circulares de hasta 2cm a 3cm de diámetro. Por tanto, el coeficiente viene generalmente representado por una K y el correspondiente subíndice que identifica a la placa con la que se realizó el ensayo.

Tabla 43.

Valores del módulo de balasto.

Valores de K30 en Kg/cm³ por Rodríguez Ortiz

Tipos Suelo	K30 min.	K30 máx.
Arena fina de playa	1	1.5
Arena floja, seca o húmeda	1	3
Arena media, seca o húmeda	3	9
Arena compacta, seca o húmeda	9	20

Fuente: (Agudelo Zapata, 2015)

En arenas seca compacto o húmeda es.

$$K = 20 \frac{kg}{cm^3}$$

L el largo de la base de lata = 3cm

B el ancho de la base de la pata = 3cm

ω es el porcentaje en peso de forma que viene dado por:

$$\omega = \frac{100}{4.03 * \frac{L}{B} + 109.05}$$

$$\omega = \frac{100}{4.03 * \frac{3}{3} + 109.05}$$

$$\omega = 0.88\%$$

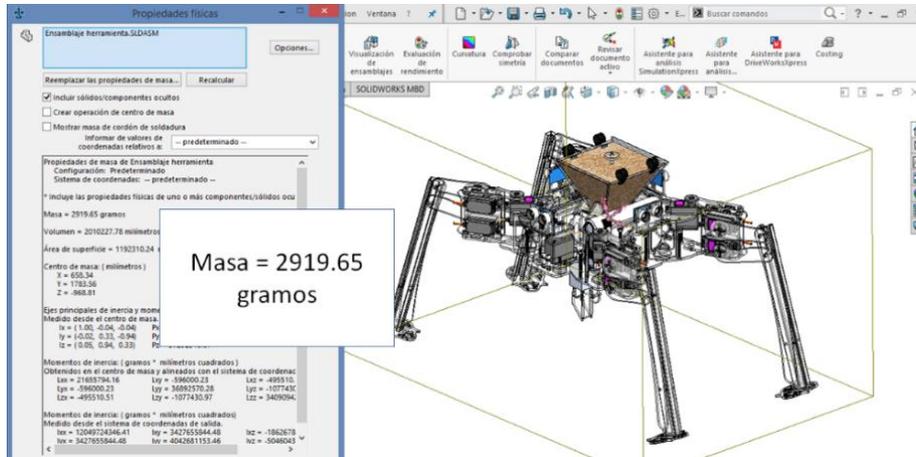


Figura 52. Donde la masa del robot más la masa de la carga total es igual $M1=2.92\text{kg}$

M_t es la masa total a considerar

$$M_t = \frac{0.88 * k}{L * B} + M_1$$

$$M_t = \frac{0.88 * 20\text{kg}}{3 * 3} + 2.92\text{kg}$$

$$M_t = 4.87\text{kg}$$

Donde M_t representa la carga total que tendría que levantar si el robot se estuviese desplazando sobre arena durante un tiempo máximo de treinta minutos.

En la figura 53. se representa la carga que debe repartirse al avanzar un paso, sabiendo que al menos una de las piernas debe estar en el aire. La carga total en cada pata debe ser igual a la tercera parte.

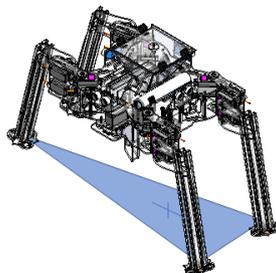


Figura 53. Distribución del peso en un paso.

Análisis de esfuerzos, simulación de estrés en piezas por Von-Mises en el programa CAD Solid works versión 2017, con un factor de carga producido al caminar en arena. Sabiendo que la carga máxima expresada en Newtons es 47.76N y se reparte en 3 patas.

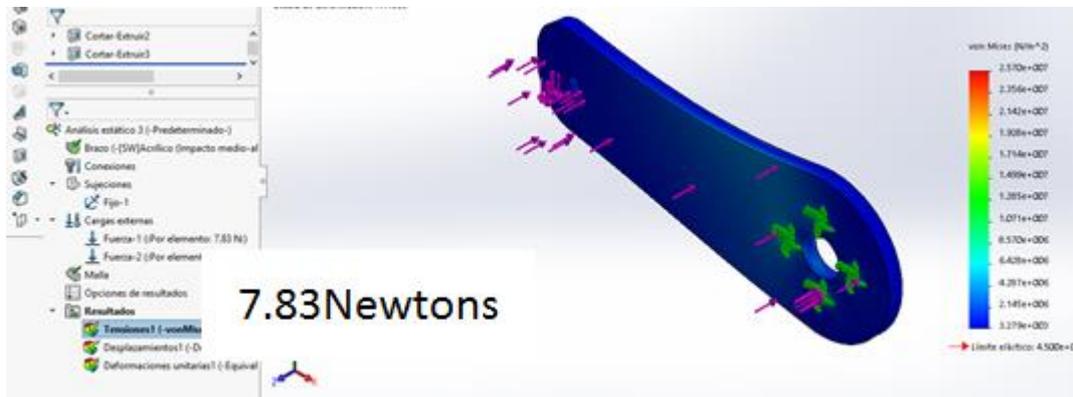


Figura 54. Análisis carga normal y axial carga máxima femur1.

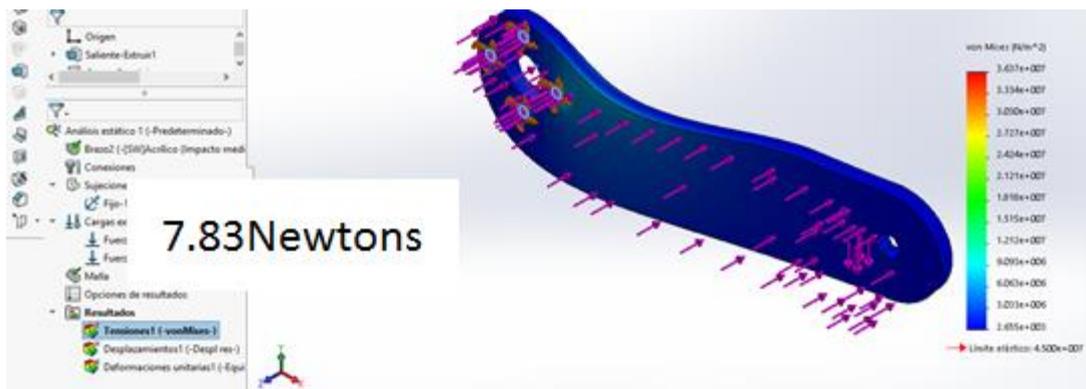


Figura 55. Análisis carga normal y axial carga máxima femur2.

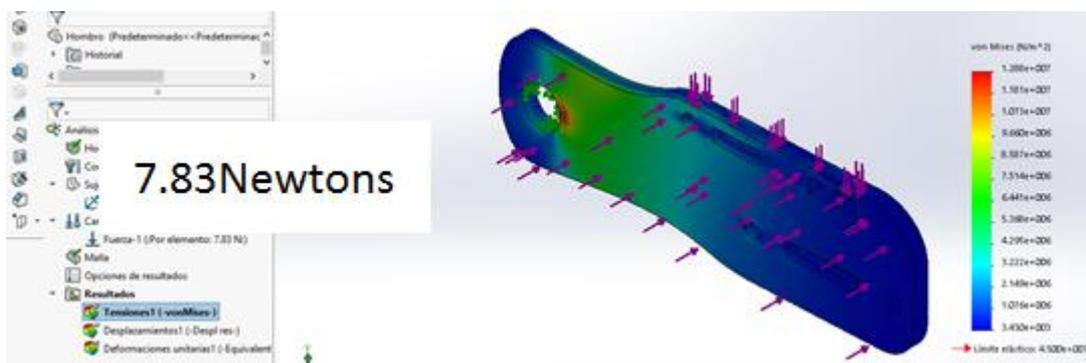


Figura 56. Análisis carga normal y axial carga máxima hombro.

Observa una ligera fractura bajo la acción de las fuerzas normales. Cuando el robot se ve comprometido a caminar en arena.

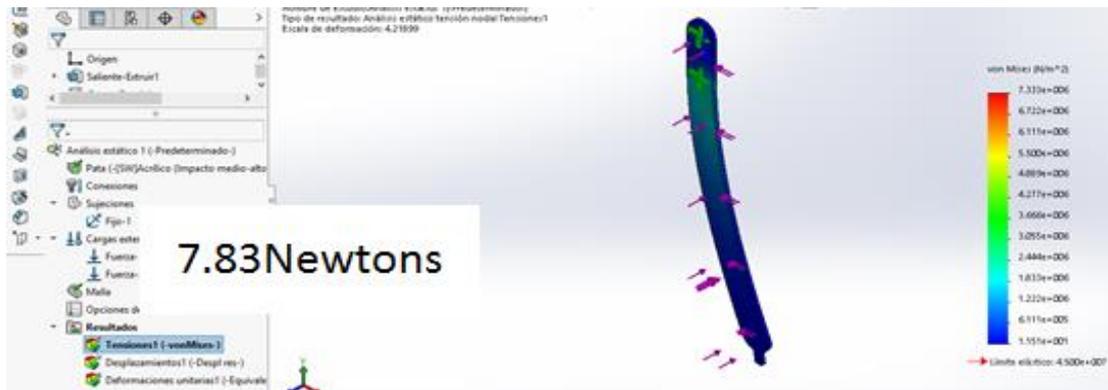


Figura 57. Análisis carga normal y axial carga máxima tibia.

Por las gráficas anteriores podemos deducir que el factor de carga se ajusta a las necesidades de diseño, produciendo una deformación permisible, en cada uno de los elementos móviles. Las cargas axiales son las que produjeron mayor deformación.

3.3.24 MÓDULO 2. LOCOMOCIÓN

Arquitectura del sistema

El sistema mostrado en la Figura 58. En el primer nivel al usuario da las órdenes, que son ingresadas al teléfono o tableta, posteriormente en el segundo nivel se enlaza con la tarjeta Arduino y el tercer nivel la plataforma robótica se enlaza con la tarjeta de control.

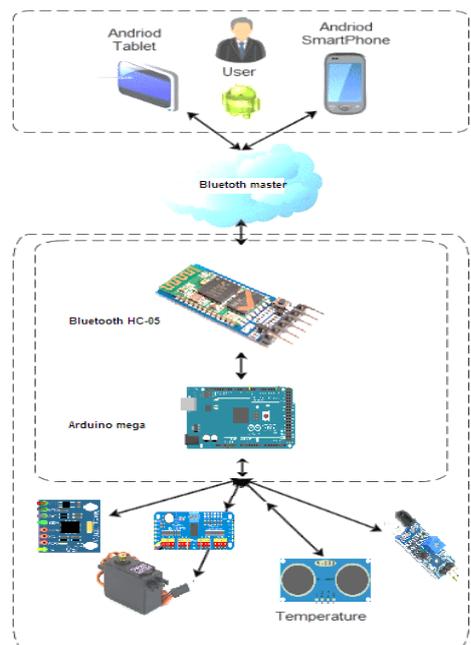


Figura 58. Arquitectura del sistema del robot tetrápodo.

Para el entendimiento de la secuencia de programación se realizó un diagrama de flujo, para interpretar las decisiones y los retos que presenta controlar las acciones del robot y la adquisición de datos, para la interpretación de los mismos. ver figura 59.

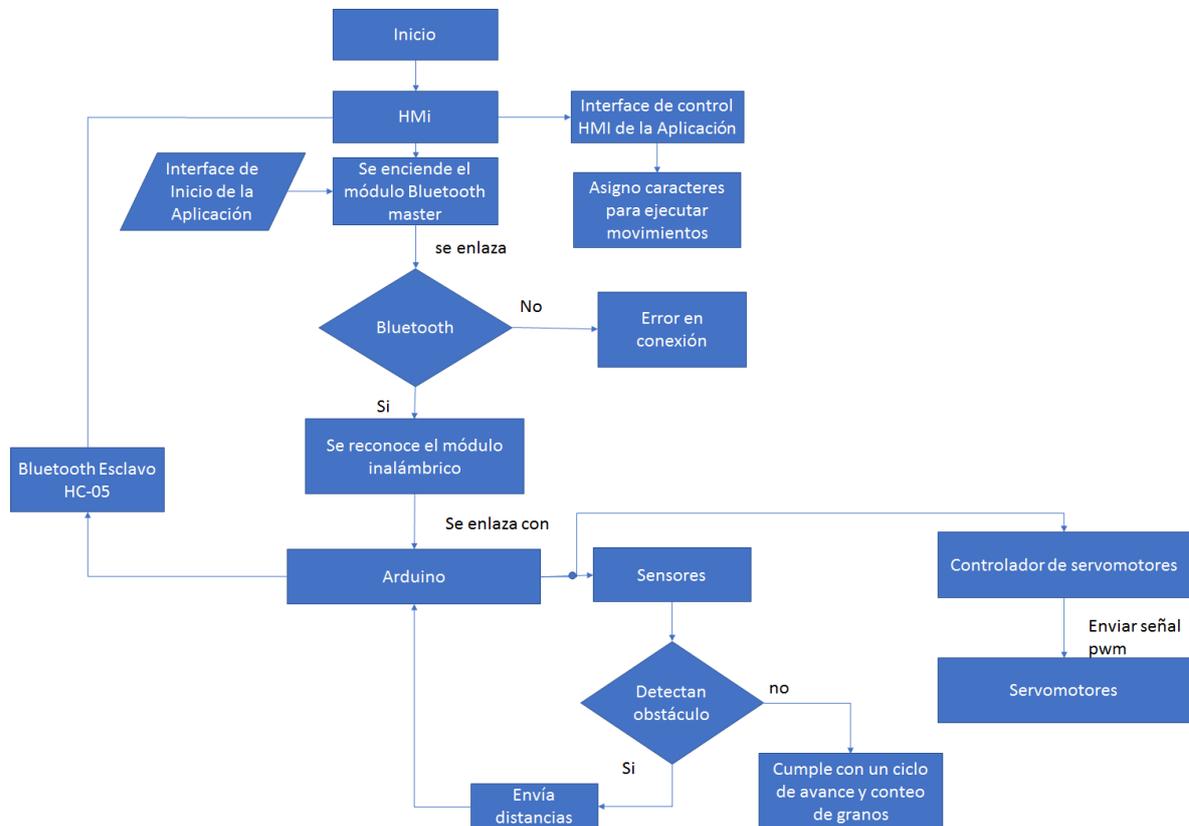


Figura 59. Diagrama de flujo del programa.

El robot será operado por comandos ingresados en una aplicación de celular o Tablet Android y tendrá la posibilidad de ingresar comandos para que el robot se ubique de manera manual y automática.

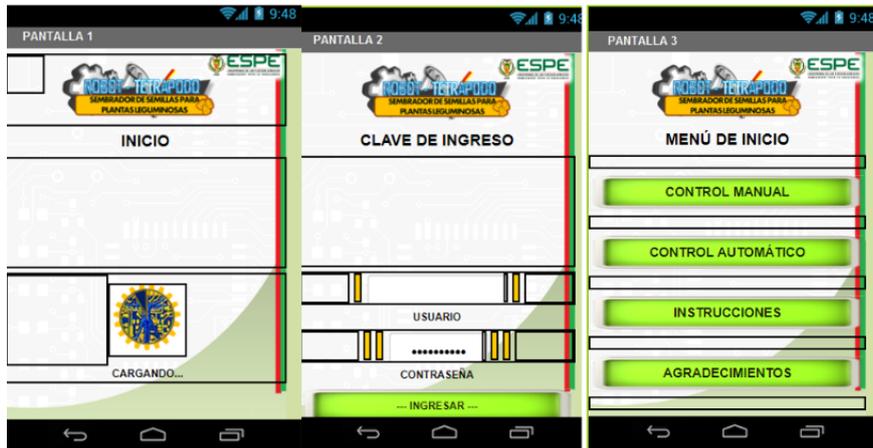


Figura 60. Pantallas de inicio de la aplicación



Figura 61. Pantallas de control.



Figura 62. Pantalla de instrucciones.



Figura 63. Pantallas de aviso de advertencia.

Cuando se observó un defecto en la aplicación de al utilizar App inventor 2, que al cambiar de screen o pantalla generaba un error en el enlace, se tomó la decisión de unir dos de las pantallas y evitar el error, como se observa en la figura 64, que desconectaba la señal de bluetooth.



Figura 64. Unión de dos pantallas para evitar error de desconexión.

3.3.25 Información Tarjeta de control

En el desarrollo del trabajo se seccionó una tarjeta Arduino, debido a su bajo costo y la cantidad de entradas y salidas lógicas, que se requieren para manipular a los cinco sensores ultrasónicos, quince servos, un sensor infrarrojo, un acelerómetro y un sistema de comunicación bluetooth. Ver figura 65.

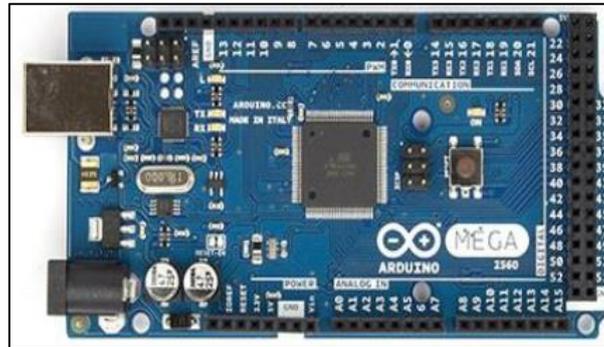


Figura 65. Tarjeta de control Arduino Mega.
Fuente: (LionChip Electrónica, 2016)

3.3.26 Módulo de control para servos.

Módulo de control con interfaz para Arduino PCA 9685 de dieciséis canales. Integrado I2 C PWM, con una entrada de alimentación de en cinco y siete voltios, con una tasa de actualización de 60Hz, Como se observa en la figura 66.

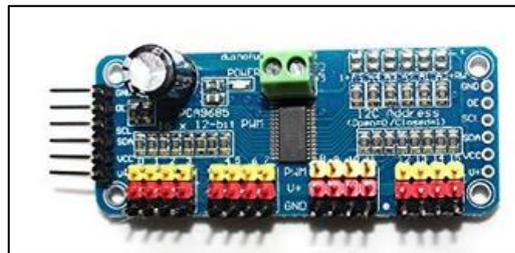


Figura 66. Módulo de control servomotores.
Fuente: (LionChip Electrónica, 2016)

Se selecciona este módulo de control en específico, ya que es el único modulo comercial, en el mercado local, que tiene la posibilidad de manejar hasta servomotores. El sensor HC-SR04 es una excelente opción como sensor de distancia ultrasónico. Su relación de costo/beneficio lo hace óptimo para esta aplicación. Existen librerías para este módulo que hacen que la parte del software quede resuelta de mejor manera. Ver figura 67.



Figura 67. Sensor Ultrasónico HC SR04.
Fuente: (LionChip Electrónica, 2016)

Modulo sensor con emisor y receptor infrarrojo, posee un rango de distancia entre 2cm-30cm con un ángulo de detección de 35°. La señal captada por estos sensores es acondicionada mediante un circuito comparador, esto se ve reflejado mediante un LED indicador de color verde, en donde dependiendo de la configuración del usuario, podrá establecer niveles altos (1 lógico) y bajos (0 lógico) de tensión. Ver figura 68.

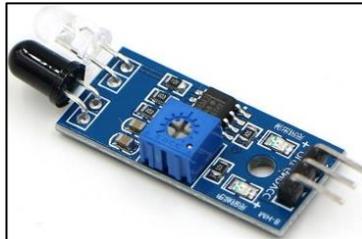


Figura 68. Sensor Ultrasónico HC SR04.
Fuente: (LionChip Electrónica, 2016)

El HC-05 es un módulo comunicación Bluetooth muy usado debido a lo versátil y económico que resulta. El módulo Bluetooth HC-05 puede alimentarse con una tensión de entre 3.3 y 6V (normalmente 5V), pero los pines TX y RX utilizan niveles de 3,3V por lo que no se puede conectar directamente a placas de 5V. Ver figura 69.



Figura 69. Módulo de comunicación Bluetooth.
Fuente: (LionChip Electrónica, 2016)

3.3.4. Secuencias de movimientos

El robot consta de cinco secuencias de locomoción programadas, como se observa en la figura 70.

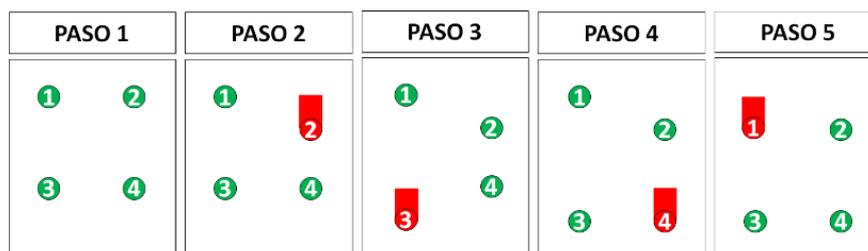


Figura 70. Secuencia de movimiento robot.

Tabla 44.
Patrones de locomoción utilizados.

Nº	Tetra-pode	OLA	ONDA
1			
2			
3			
4			
5			

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación, se usaron planos de taller para facilitar la ubicación de las piezas y su funcionalidad dentro de cada sección de armado.

En la secuencia de armado se contempló primero la necesidad de armar en un conjunto de sistemas más pequeños, que no interfieran en el armado de un sistema más grande. Para conjunto de piezas que conforman la parte superior de silo que es soportado por la placa superior, que a su vez sujeta los sensores, ver figuras 71, 72 y 73.



Figura 71. Silo de ingreso del grano.

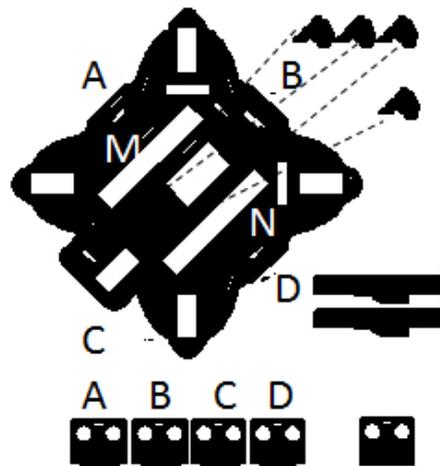


Figura 72. Placa superior que sujeta los sensores y el silo de ingreso del grano.



Figura 73. Túnel de ingreso y conteo sujeto a la palca inferior.

Para los sistemas intermedios se consideró el armado de todas las piezas que conforman el sistema de conteo y apertura de la garra, ver figura 74 y 75.

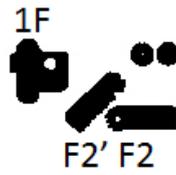


Figura 74. Garra dispensadora sujeta a la palca inferior.

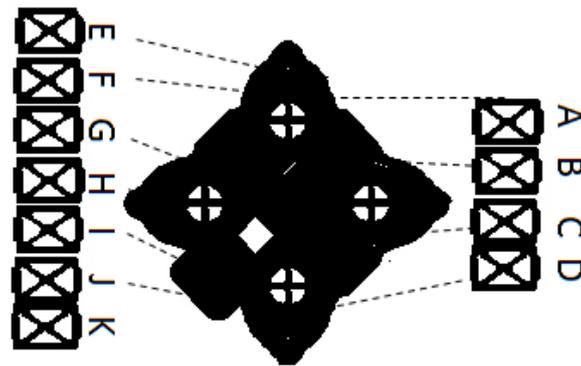


Figura 75. Placa inferior que sostiene todos los componentes intermedios.

Para los sistemas más extremos se consideró el armado de los servomotores con las piezas de los hombros, ver figura 76,77 y finalmente las patas son las piezas con mayor capacidad de ser intercambiables, por lo que se puede afirmar que se deben armar al final.



Figura 76. Armazón del hombro que enlaza con los eslabones finales del robot.

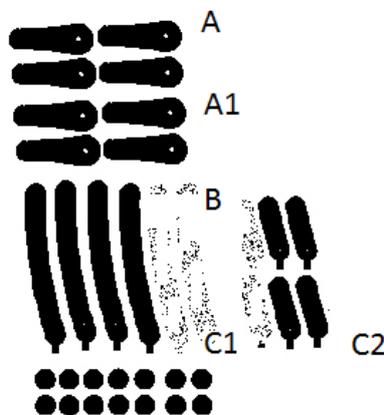


Figura 77. Extremidades finales que conforman las patas del robot.

El sistema de perforación se colocará después de los ensayos iniciales de movimiento y estabilidad, como se observa en la figura 78 y 79.

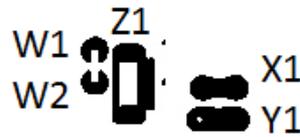


Figura 78. Brazo que conecta con el tubo para perforar.



Figura 79. Tubo que perfora el hueco de deposición de la semilla.

Se puede observar el proceso de ajuste de las piezas que tuvieron que ser perfiladas, para que puedan embonar con facilidad. Ver la figura 80.



Figura 80. Ensamblaje del armazón.

En la figura 81, se observa la instalación de los actuadores y el cableado de los circuitos de que dieron movimiento al robot.



Figura 81. Ensamblaje de los servomotores.

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Concluido el proceso de ensamblaje y construcción eléctrica, mecánica y de programación, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento. De acuerdo a cada parte que conforma al robot y su interface gráfica.

En primer lugar, el funcionamiento y la estabilidad que brindan las partes móviles, destacando a las extremidades y el sistema de conteo de semillas. Aquellas secuencias de funcionamiento consecuentemente producen referentes para el desempeño del prototipo robótico.

4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SIN CARGA

En la presente etapa, se comprueba la programación de la tarjeta Arduino, por consiguiente, se verifican las secuencias de movimientos en las patas del robot, para su desplazamiento. En donde se realiza pruebas de movimiento, sin carga en el silo, ver Figura 82.

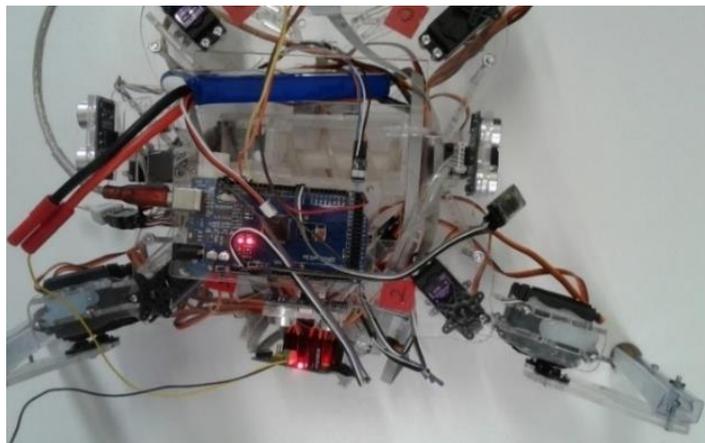


Figura 82. Comprobación del funcionamiento de la máquina.

Objetivo

Demostrar que existe un correcto funcionamiento en todos los sistemas electromecánicos y digitales, al realizar los diferentes movimientos de avance y detección de obstáculos, sin carga en el silo.

Alcance

Tiene como finalidad, comprobar la programación de la secuencia de movimientos, que permiten el desplazamiento realizado, por las patas del robot, y como los elementos estructurales y electrónicos funcionan bajo las diferentes circunstancias establecidas.

Pruebas

Se realizar el chequeo del funcionamiento, se realiza pruebas, que aseguran el adecuado desempeño del conjunto de partes que desempeña una actividad específica, las pruebas se realizan luego de armado el prototipo. Las pruebas de chequeo estudian los siguientes rasgos del robot.

1. A través de simulaciones simultaneas en el software ‘‘Proteus’’ para los circuitos digitales y el entorno de programación de ‘‘Arduino’’ y la interface HMI en el software libre ‘‘App inventor dos’’, se logra identificar, corregir y modificar los errores en la programación para llegar hasta un estado óptimo de funcionamiento.
2. Comprobar el funcionamiento del programa, cargado en el Arduino, se verificará que cumpla con las expectativas de funcionamiento.
3. Comprobar el funcionamiento del enlace con el HMI, cargado la aplicación en la tableta o celular, verificará que cumpla con las expectativas de funcionamiento.
4. Comprobar el funcionamiento de los sensores en el sistema para evitar colisiones y en el sistema de conteo.
5. Comprobar la distancia máxima de configuración por bluetooth mediante la interface el HMI.

4.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA

En la presente etapa, se realiza la colocación de carga de semillas en el silo, por consiguiente, se tiene el siguiente protocolo.

Objetivo

Demostrar que continua con un correcto funcionamiento en todos los sistemas electromecánicos y digitales, al realizar los diferentes movimientos de avance y detección de obstáculos, con carga en el silo.

Alcance

Comprobar que, colocando la carga en el silo, el robot y su interface funcionan correctamente y se considere la fiable por un periodo continuo de trabajo, de esta manera comprobar que el robot funciona bajo las diferentes circunstancias establecidas.

Pruebas

Se realizar el chequeo del funcionamiento, se realiza pruebas de capacidad, que aseguran, el adecuado desempeño del conjunto de partes, que componen una actividad específica, las pruebas se realizan luego de armado el prototipo. Las pruebas de chequeo estudian los siguientes rasgos del robot.

1. Verificar la capacidad de carga
2. Verificar la capacidad de ajuste de la posición cero
3. Verificar la capacidad de detectar obstáculos
4. Determinar la velocidad de desplazamiento ideal
5. Determinar la velocidad de dispersión de las semillas
6. Realizar el chequeo de desgaste de las partes móviles
7. Verificar la tasa de descarga de la batería

4.5 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO EN CAMPO

Posteriormente, al haber pasado las pruebas de funcionamiento con carga, se realiza las pruebas en campo, en donde se coloca al robot en un terreno menos lizo y con mayores obstáculos.

Objetivo

Comprobar la capacidad de resistencia del robot ante un terreno menos lizo y más hostil.

Alcance

Se comprueba que el robot puede adaptarse a un terreno más hostil, logrando caminar en un terreno menos lizo.

Pruebas

Se realizan pruebas de desempeño, para su movilidad

1. Verificar la resistencia de sus extremidades
2. Verificar la velocidad de desplazamiento
3. Verificar desempeño en diferentes terrenos

4.6 CORRECCIÓN DE ERRORES

Las primeras pruebas de funcionamiento, rebelan que existe una falta de estabilidad, debido a la agilidad del movimiento. Se reconoce que, aunque los motores responden al movimiento, pero se aletargan con el peso del robot y el movimiento constante, asiendo de éste un movimiento ineficaz y que compromete su funcionalidad.

En las pruebas siguientes, sin carga, aún se denota la falta de estabilidad al caminar, y que la taza de descarga de la batería, mayor a lo que requiere, para su funcionamiento.

Debido a su falta de estabilidad, se intercambian extremidades para bajar el centro de gravedad y disminuir el momento flector en cada paso del robot. Se corrige la programación del movimiento de las extremidades,

Los pasos son el número de secuencias que se ejecutan para controlar el movimiento de cada motor y el tipo de movimiento, es el que da la estabilidad, donde se da cabida a corrige la distancia de desplazamiento de cada motor en forma angular, como se indica en la tabla 45 y como se ha estado mencionando, la estabilidad estará sujeta a la cantidad de pasos que se ejecutan, pero existe un límite en la memoria para la cantidad de pasos que se puedan tener o ejecutar, como se indica en la tabla 46.

Los números de secuencias que debe tener el movimiento indicarán el número de movimientos para que lleguen a las diferentes distancias, a las que se quiere llegar con el mando automático, y disminuir las diferencias entre la distancia programada y la distancia ejecutada.

Tabla 45.

Estabilidad en función de la cantidad de pasos que se ejecutan en la programación.

Prueba	Pasos dados	Caídas
1	60	0
2	80	1
3	160	2
4	320	3
5	640	6
6	1280	10
7	2560	18
8	5120	22
9	10240	31
10	20480	40

Tabla 46.

Cantidad de pasos que se pueda ejecutar y porcentaje de memoria disponible.

Prueba	Movimientos programados	Memoria disponible %
1	80	48
2	92	40
3	120	32
4	180	18
5	248	2

Tabla 47.*Distancia programada y la distancia ejecutada realmente*

Prueba	Distancia programada en (m)	Distancia ejecutada realmente (m)	Diferencia
1	1	0.8	0.2
2	2	1.6	0.4
3	3	2.9	0.1
4	4	3.8	0.2
5	5	4.7	0.3
6	6	5.2	0.8
8	7	5.9	1.1
9	8	6.6	1.4
10	9	7.4	1.6

En la figura 83.y 84, se ha tomado la programación que ha aprovecha del número de repeticiones máxima de movimiento para que el robot tenga estabilidad en su caminar.

**Figura 83.** Pruebas Programación de los movimientos del robot con 160 pasos.**Figura 84.** Programación del movimiento con él programa con menor número de caídas y menor consumo de memoria.

Comprobado la mejor programación para el óptimo funcionamiento del robot, se procede a realizar cargas en el silo, obteniendo resultados inesperados, que causan una mayor incertidumbre para lograr la estabilidad en el movimiento. Ver figura 85.



Figura 85. Caída provocada por inestabilidad.

Cambio de extremidades debido a inestabilidad en el movimiento, se procede a rediseñar las patas, para que el robot tenga un centro de gravedad más bajo y un movimiento más fluido, obteniendo rotura de varios de los prototipos, debiendo realizar refuerzos en la estructura de las patas. ver figura 86.



Figura 86. Línea de Tiempo para la selección de las extremidades para mejorar la estabilidad del movimiento.

4.7 PRUEBAS DE DESPLAZAMIENTO EN DIFERENTES TERRENOS

Se realizó pruebas de posicionamiento programando en diferentes tipos superficie, en las que se obtuvo la orientación y sentido similar, alcanzando fluctuaciones en la distancia. Se realizo pruebas que de desempeño inicial en un piso lizo de baldosa, en donde no existen obstáculos, y el movimiento es más fluido. Ver figura 87.



Figura 87. Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie liza.

Se realizo pruebas de desempeño, en un entorno neutral, en un suelo con césped corto, en donde existen obstáculos pequeños respecto a la geometría de las patas del robot, y el movimiento no tiene limitantes de estabilidad. Ver figura 88.



Figura 88. Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie con césped cortado.

Finalmente se realizó pruebas de desempeño en un entorno agrícola, en un suelo con arena y tierra cultivable, en donde existen obstáculos demandantes para la tracción y la geometría de las patas del robot. Donde se puso a prueba las limitantes del robot. Ver figura 89.



Figura 89. Pruebas de posicionamiento y orientación en una superficie arenosa.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se obtuvo un prototipo robótico, que actúa como una herramienta interactiva, que permite dispersar semillas de maíz, y las coloca de tal manera, que forma un patrón al caminar.
- Se obtuvo una interface amigable con el usuario, con elementos claramente definidos para el control de los movimientos del robot, que funciona en el rango de conectividad con el bluetooth.
- Se concluyó que el uso de granos de maíz seco, tengan una dimensión promedio, de ocho a once milímetros, en su parte más ancha. Considerada desde la base del endospermo hasta la punta del pedicelo. Comercialmente se consigue en esta variedad de semilla leguminosa en Ecuador como maíz para canguil.
- Se obtuvo un diseño para un robot ergonómico y ligero, a comparación con las máquinas investigadas, que cumplen una función similar. Redondeado en la mayoría de sus partes, que facilitan su ensamblaje y recubrió de manera eficiente los elementos que entran en contacto con el maíz, por razones de salubridad, y evitando la manipulación de sus elementos eléctricos.
- Se concluyó que el material para el diseño de su estructura es adecuado para un movimiento simple, bajo condiciones controladas. Sin embargo, el desempeño del movimiento del robot estará comprometido dependiendo de los obstáculos y el terreno a los que esté sometido.
- Se concluyó que el diseño de la forma de los pies del robot proporciona estabilidad en diferentes terrenos, acoplando una pieza intercambiable llamada “casco”, podrá desplazarse adaptarse, en terrenos en los que pueda hundirse, o desplazarse en terrenos más lisos sin ella.
- Se obtuvo un mejor funcionamiento del robot en un terreno plano, debido a que para mejorar su estabilidad se redujo la dimensión de sus extremidades para bajar su centro de gravedad y disminuir la flexión de extremidades.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda para la operatividad del prototipo robótico, usar bajo condiciones nominales de trabajo, entre catorce a veinte y cinco grados centígrados de temperatura y poca humedad, para evitar riesgos por electricidad estática o deformación del material, ya que el material que lo compone en su mayoría, es un termoplástico.
- Se recomienda una distancia máxima para la configuración de los movimientos de nueve metros, para evitar fallos en la conexión, y la actualización de la información del sensor de distancia al suelo.
- Se recomienda usar un material más rígido para el tubo que perfora la tierra y deja el hueco, en donde se deposita la semilla, para que no tenga deformación por impacto y se reduzca su desgaste.
- Se sugiere un módulo de comunicación Wireless, que remplace el módulo de comunicación bluetooth, para que el robot tenga mayor alcance en su etapa de configuración.
- Se sugiere una capa de recubrimiento, de silicón, para el circuito de control Arduino. Que actúe como aislante de golpes y vibraciones perjudiciales para su funcionamiento.
- Para conseguir un mejor desempeño del robot, se sugiere implementar un servo motor diferente, que tenga un mayor torque que el utilizado, el MG996R y reemplazando por dos de los servomotores de cada brazo y así tener una mayor autonomía conservando el mismo torque.
- Siendo éste un prototipo robótico, está sujeto a variaciones que le permitirán evolucionar, para mejorar su desempeño, especialmente enfocadas a sus partes móviles, para que éstas sufran menos estrés y un coeficiente de rozamiento menor, por lo que se sugiere contemplar e investigar nuevas formas para las extremidades.
- Se recomienda que, al usar la aplicación gratuita App inventor dos, la programación de la interface, no se deben trabajarse en varias pantallas, ya que produce errores en la conectividad.

REFERENCIAS

Olejnuk, N. (2007). Eco registros. Obtenido de ecoregistros.org: <http://www.ecoregistros.org/ficha/Argiope-argentata>

A, S. L. (05 de Agosto de 2008). ocvus.us.es. Obtenido de Riego por superficie: http://ocvus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%208.Riego%20por%20superficie/page_17.htm

abrox.net. (4 de 12 de 2001). Obtenido de http://abrox.net/robotic_iso.htm

Agudelo Zapata, J. (26 de 10 de 2015). estructurando.net. Obtenido de <http://estructurando.net/2015/10/26/breve-resumen-del-coeficiente-de-balasto/>

Armadas, U. d. (12 de Septiembre de 2016). Unidad de Gestión de la Investigación. Obtenido de <http://ugi.espe.edu.ec/ugi/lineas-de-investigacion/>

Asimov, I., & Frenkel, K. A. (1995). Isaac Asimov y Karen A Frenkel (1995), “Robots: Máquinas a imagen y semejanza del hombre”. Obtenido de www.eupmt.es/cra/galeria.html

Barreiro Elorza, P., & Diezma Iglesias, B. (2006). La robotizacion de las labores agricolas como apuesta de futuro. Grupo Investigación UPM, 1.

Barreiro Elorza, P., & Diezma Iglesias, B. (2006). La robotizacion de las labores agricolas como apuesta de futuro. Grupo Investigación UPM.

Bosch, M. (2013). Reflexiones acerca de las Tecnologías Emergentes en la Agricultura. Academia.

Calle, W. (10 de 8 de 2012). es.scribd.com. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/105524711/2-Diseno-Factor-De-Seguridad>

Calle, W. (10 de 8 de 2012). <https://es.scribd.com>. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/105524711/2-Diseno-Factor-De-Seguridad>

Carlos. (10 de 6 de 2017). Diario de un Agricultor. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Fundación Centauri: <http://blog.fundacioncentauri.org/otras-experiencias-agricolas-internacionales-disenar-robot-hortelano/>

Club El Comercio. (17 de 8 de 2012). Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Tecnología: <http://archivo.elcomercio.pe/tecnologia/actualidad/desarrollaron-robot-forma-calamar-capacidad-camuflarse-noticia-1456926>

Domínguez, A. (15 de 06 de 2017). Bluemix. Obtenido de Natureduca: <https://natureduca.com/agricultura-historia-la-revolucion-cientifica-01.php>

Dosificadores para siembra a chorrillo. (s.f.). Obtenido de aulavirtual.agro.unlp.edu.ar: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/33817/mod_folder/content/0/Dosificadores.pdf?forcedownload=1

EPPINGER, K. T.-S. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos*. Mexico: McGRAW-Hill/Interamericana Editores,S.A. De C.V.

ESPE. (16 de Agosto de 2016). *Biología*. Obtenido de <http://biotecnologia.espe.edu.ec/laboratorios-investigacion/>

Esperbent, C. (2016). Robots: la proxima revolución del campo. RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*.

Esperbent, C. (2016). Robots: La proxima revolución del campo. RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*.

F, R. (1997). *Fundamentos de Física Estadística y Térmica*. Ediciones del Castillo.

Fossum, T. (2008). *Cirugía En Pequeños Animales*. España: Elsevier.

Friedrich, T. (2007). *El Papel De La Ingeniería Agrícola En El Desarrollo De La Agricultura*. IV Seminario Internacional De Ingeniería Agrícola De La Universidad Técnica De Manabí. Manabí: FAO.

García Arce , Y. E. (14 De 11 De 2005). *Monografias.Com S.A*. Obtenido De *Propuesta De Un Plan Para La Rehabilitación De Las Áreas Degradadas Por La Extracción De Arena*: <Http://Www.Monografias.Com/Trabajos88/Propuesta-Plan-Rehabilitacion-Areas-Degradadas/Propuesta-Plan-Rehabilitacion-Areas-Degradadas2.Shtml>

García Villaseñor, C. I. (2007). *Desarrollo Del Robot Móvil Tetrápodo Epheastus-R1*. 6to. Congreso Nacional de Mecatrónica. Potosí: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

Gil, E. (s.f.). *SEembradoras Y Plantadoras*. Catalunya, España: Escuela Superior de Agricultura de Barcelona.

Gill, E. (2000). <https://es.slideshare.net>. Obtenido de *Las Características y Eficiencias De Los Tractores*: <https://es.slideshare.net/jaimemoraga2/traccion-y-accion-de-aperos-5>

Heilter, W. (Enero de 2007). University of St Andrews. Recuperado el 19 de Septiembre de 2017, de *How Grasshoppers Jump*: <https://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/jumping/legwrk.htm>

Hermenegildo , R. (2017). Obtenido de ingemecanica.com: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>

Hidalgo Bahamontes, A. (18 de 2 de 2011). [elconstructorcivil.com](http://www.elconstructorcivil.com). Obtenido de <http://www.elconstructorcivil.com/2011/02/tabla-de-la-resistencia-de-terrenos.html>

Howel, J. R. (2008). *Principios de termodinámica para ingeniería*. McGraw-Hill.

Jlópotov, A. (17 de 4 de 2016). RT. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de *Rusia TV*: <https://actualidad.rt.com/actualidad/204990-apariencia-lince-combate-robot-ruso-antitanque>

John Deere. (14 de 01 de 2013). [masquemaquina.com](http://www.masquemaquina.com). Obtenido de <http://www.masquemaquina.com/2013/01/>

- John Deere. (Octubre de 2016). Obtenido de Copyright © 2017 Deere & Company: https://www.deere.com.mx/es_MX/our_company/news_and_media/press_releases/2016/Oct/robots-en-tareas-agricolas.page
- Leonard, D. (s.f.). es.iisc.ernet.in. Obtenido de Los Fines de una Siembra Exitosa: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/pc/m0035s/m0035s0f.htm>
- Leonard, D., Smith, J. G., Chakroff, P., Dubus, N., Kaufaman, M., & Ware, C. (s.f.). Doctype Html Public. Obtenido de La preparación de la tierra para cultivo: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/pc/m0035s/m0035s0d.htm>
- LionChip Electrónicos. (2016). Obtenido de Monterrey, Nuevo León: <https://www.lionchipmexico.com/product-page/sensor-ultras%C3%B3nico-hc-sr04>
- mapama.gob.es. (4 de 10 de 2004). Obtenido de https://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/maquinaria-agricola/seguridad_directiva.aspx
- Maroni, J., & Asenjo, C. F. (2006). Agro mensajes DE LA FACULTAD. Obtenido de Facultad de Ciencias Agrarias: <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/18/4AM18.htm>
- mercado libre. (27 de mayo de 2017). Recuperado el 3 de Junio de 2017, de http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-450050005-bateria-li-ion-polimero-6800mah-5v-cable-jack-cargador-_JM
- Mohan, N. (2009). Electrónica de potencia. México: Mcgraw-Hill.
- Morales García, I. (2013). Aplicaciones de la robótica en la agricultura, desarrolladas en Holanda. Universidad de Almería.
- Moreno Alban, R. L. (2012). Mecanización Agraria En El Ecuador. Proyecto de grado para la obtención del título de magister en negocios internacionales, Universidad Internacional Del Ecuador, Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas, Quito.
- Moya, P. (21 de 11 de 2015). omicrono. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de <http://omicrono.elespanol.com/2015/11/el-robot-agricola-que-analiza-cuida-y-limpia-los-cultivos/>
- Parke, P. (15 de 2 de 2015). CNN en español. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Breaking News: <https://cnnespanol.cnn.com/search/Boston+Dynamics/>
- Pedrosa Lojo, I., & Horrillo Tello, J. (2008). Proyecto MIHRO (Mobile Inteligent Hexapod Robot) Volumen 1. Mataró: Escola Universitaria Politecnica de Mataró.
- Quiñónez, J. (15 de 11 de 2010). VARITEK. Obtenido de www.varitek.com.ec: <http://www.varitek.ec/index.php/temas/geologia/el-suelo-agricola>
- Ramírez, I., Ruilova, B., & Garzón, J. (2015). Innovación Tecnológica En El Sector Agropecuario. Machala: Universidad Técnica De Machala.

- Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia*. México: Pearson Prentice Hall.
- Reicosky, D. C., & Saxton, K. E. (2004). *Reducción de las emisiones ambientales y secuestro del carbono*. Acriba.
- Sembradoras. (s.f.). ISEA – Equipos y Maquinaria Agrícola. Argentina: Sociedad Rural Argentina.
- Una Introducción a los Robots Móviles. (2008). Il Bambino.
- Vanguardia. (25 de 6 de 2016). Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Colprensa, Medellín: <http://www.vanguardia.com/mundo/tecnologia/video-363480-conozca-a-spotmini-el-perro-robot-del-futuro>
- Villaverde, R. (s.f.). camne.com. Recuperado el 19 de 5 de 2017, de <http://www.camne.com.ar/taller/calculoautonomiabaterias/calculoautonomiabaterias.htm>
- Zemansky, D. (1988). *Calor y Termodinámica*. McGraw-Hill .
- Barreiro Elorza, P., & Diezma Iglesias, B. (2006). *La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro*. Grupo Investigación UPM , 1.
- Barreiro Elorza, P., & Diezma Iglesias, B. (2006). *La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro*. Grupo Investigación UPM .
- Bosch, M. (2013). *Reflexiones acerca de las Tecnologías Emergentes en la Agricultura*. Academia.
- Carlos. (10 de 6 de 2017). *Diario de un Agricultor*. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Fundación Centauri: <http://blog.fundacioncentauri.org/otras-experiencias-agricolas-internacionales-disenar-robot-hortelano/>
- Club El Comercio. (17 de 8 de 2012). Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Tecnología: <http://archivo.elcomercio.pe/tecnologia/actualidad/desarrollaron-robot-forma-calamar-capacidad-camuflarse-noticia-1456926>
- Domínguez, A. (15 de 06 de 2017). Bluemix. Obtenido de Natureduca: <https://natureduca.com/agricultura-historia-la-revolucion-cientifica-01.php>
- Dosificadores para siembra a chorrillo. (s.f.). Obtenido de aulavirtual.agro.unlp.edu.ar: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/33817/mod_folder/content/0/Dosificadores.pdf?forcedownload=1
- Esperbent, C. (2016). *Robots: La próxima revolución del campo*. RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* .

- Esperbent, C. (2016). Robots: la próxima revolución del campo. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias.
- Friedrich, T. (2007). El Papel de la Ingeniería Agrícola en el desarrollo de la Agricultura. IV Seminario Internacional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Técnica de Manabí. Manabí: FAO.
- García Villaseñor, C. I. (2007). Desarrollo del Robot Móvil Tetrápodo Epeastus-r1. 6to. Congreso Nacional de Mecatrónica. Potosí: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
- Gil, E. (s.f.). Sembradoras Y Plantadoras. Catalunya, España: Escuela Superior de Agricultura de Barcelona.
- Jlópotov, A. (17 de 4 de 2016). RT. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Rusia TV: <https://actualidad.rt.com/actualidad/204990-apariencia-lince-combate-robot-ruso-antitanque>
- John Deere. (octubre de 2016). Obtenido de Copyright © 2017 Deere & Company: https://www.deere.com.mx/es_MX/our_company/news_and_media/press_releases/2016/Oct/robots-en-tareas-agricolas.page
- Maroni, J., & Asenjo, C. F. (2006). Agro mensajes de la facultad. Obtenido de Facultad de Ciencias Agrarias: <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/18/4AM18.htm>
- mercado libre. (27 de mayo de 2017). Recuperado el 3 de junio de 2017, de http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-450050005-bateria-li-ion-polimero-6800mah-5v-cable-jack-cargador-_JM
- Morales García, I. (2013). Aplicaciones de la robótica en la agricultura, desarrolladas en Holanda. Universidad de Almería.
- Moreno Alban, R. L. (2012). Mecanización Agraria En El Ecuador. Proyecto de grado para la obtención del título de magister en negocios internacionales, Universidad Internacional Del Ecuador, Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas, Quito.
- Moya, P. (21 de 11 de 2015). omicrono. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de <http://omicrono.elespanol.com/2015/11/el-robot-agricola-que-analiza-cuida-y-limpia-los-cultivos/>
- Parke, P. (15 de 2 de 2015). CNN en español. Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Breaking News: <https://cnnespanol.cnn.com/search/Boston+Dynamics/>
- Pedrosa Lojo, I., & Horrillo Tello, J. (2008). Proyecto Mihro (Mobile Intelligent Hexapod Robot) Volumen I. Mataró: Escola Universitaria Politècnica de Mataró.

- Ramírez, I., Ruilova, B., & Garzón, J. (2015). Innovación Tecnológica En El Sector Agropecuario. Machala: Universidad Técnica De Machala.
- Recesky, D. C., & Saxton, K. E. (2004). Reducción de las emisiones ambientales y secuestro del carbono. Acriba.
- Sembradoras. (s.f.). ISEA – Equipos y Maquinaria Agrícola. Argentina: Sociedad Rural Argentina.
- Una Introducción a los Robots Móviles. (2008). Il Bambino .
- Vanguardia. (25 de 6 de 2016). Recuperado el 6 de 7 de 2017, de Colprensa, Medellín: <http://www.vanguardia.com/mundo/tecnologia/video-363480-conozca-a-spotmini-el-perro-robot-del-futuro>
- Villaverde, R. (s.f.). camne.com. Recuperado el 19 de 5 de 2017, de <http://www.camne.com.ar/taller/calculoautonomiabaterias/calculoautonomiabaterias.htm>
- Cálculos Tornillo Helicoidal: <https://es.scribd.com/doc/225215174/Diseno-Del-Tornillo-Helicoidal-Para-El-Transporte-de-Azucar> <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>
- Tabla 44 Ángulo De Presión: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html> <https://es.scribd.com/doc/225215174/Diseno-Del-Tornillo-Helicoidal-Para-El-Transporte-de-Azucar>

ANEXOS

ANEXO A

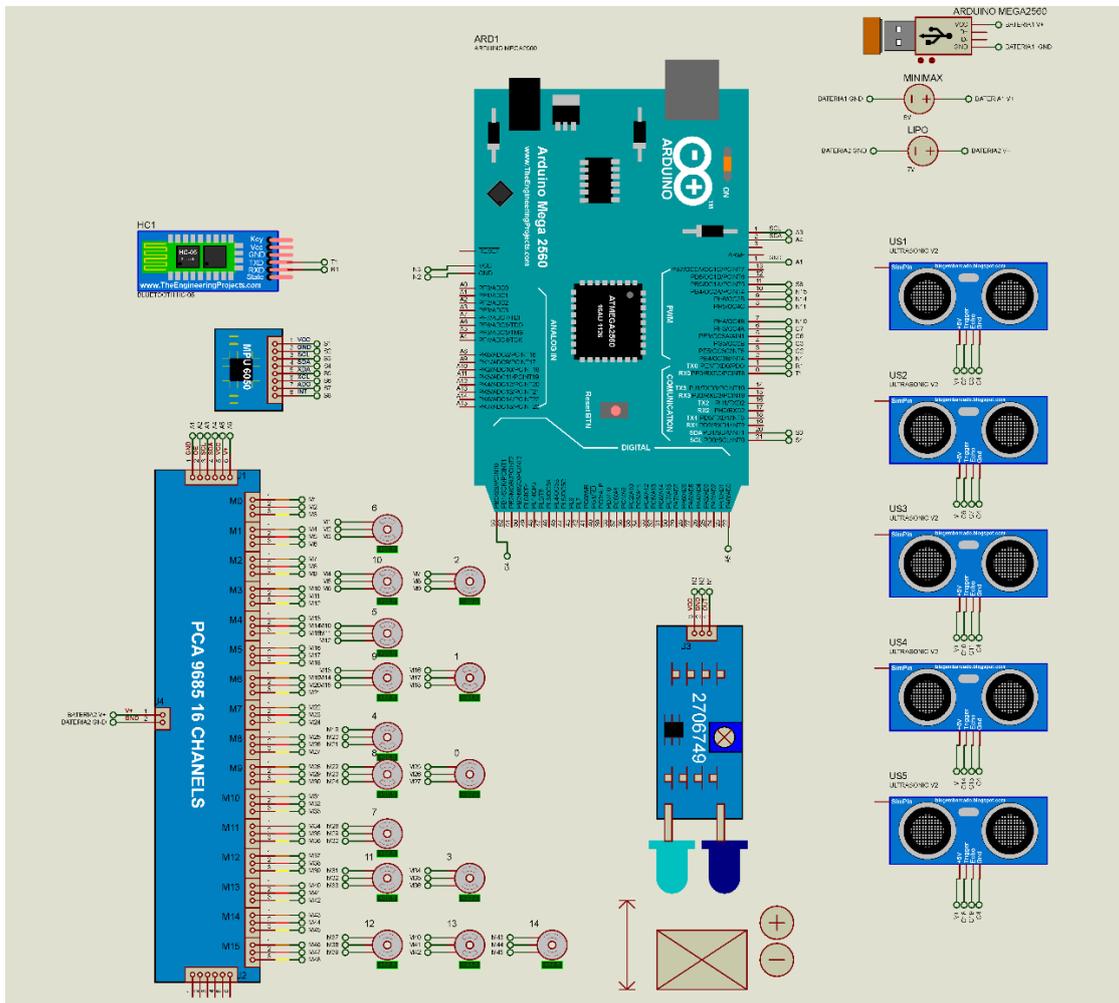


Figura 90. Diagrama de circuitos del robot.

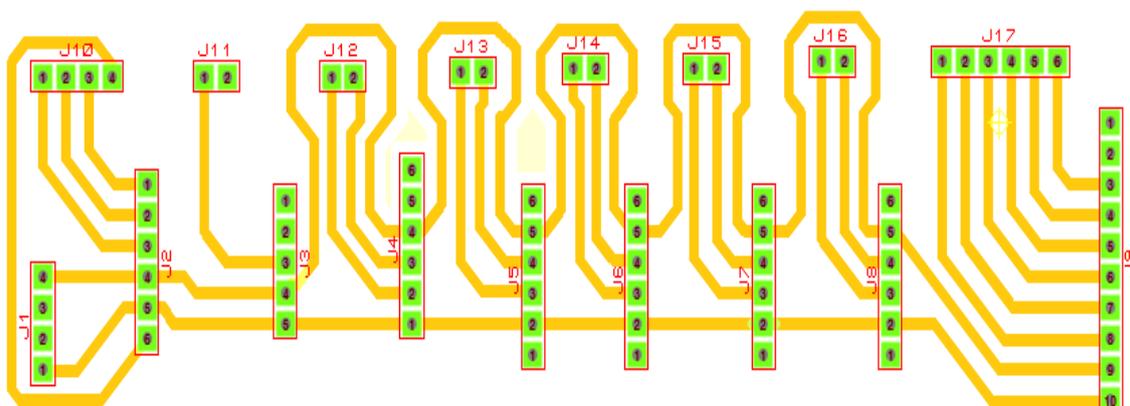


Figura 91. Diagrama placa impresa, circuito de conexión de los sensores con el Arduino Mega.

ANEXO B

Tabla 48.

Muestreo del tamaño de grano.

MUESTREO DEL TAMAÑO DE GRANO

número	Ancho	Unidades	Largo	Unidades
1	12	mm	14	mm
2	11	mm	14	mm
3	12	mm	15	mm
4	10	mm	14	mm
5	10	mm	17	mm
6	8	mm	14	mm
7	10	mm	19	mm
8	10	mm	20	mm
9	11	mm	15	mm
10	11	mm	15	mm
11	9	mm	14	mm
12	9	mm	14	mm
13	12	mm	16	mm
14	12	mm	13	mm
15	12	mm	15	mm
16	9	mm	15	mm
17	11	mm	13	mm
18	11	mm	15	mm
19	11	mm	14	mm
20	9	mm	12	mm
21	11	mm	16	mm
22	11	mm	18	mm
23	12	mm	14	mm
24	10	mm	14	mm
25	10	mm	12	mm
26	10	mm	14	mm
27	14	mm	15	mm

28	13	mm	15	mm
29	9	mm	12	mm
30	9	mm	14	mm
31	12	mm	13	mm
32	8	mm	11	mm
33	11	mm	15	mm
34	12	mm	16	mm
35	11	mm	16	mm
36	12	mm	12	mm
37	10	mm	15	mm
38	12	mm	16	mm
39	10	mm	17	mm
40	12	mm	13	mm
41	13	mm	15	mm
42	10	mm	13	mm
43	10	mm	16	mm
44	10	mm	14	mm
45	12	mm	19	mm
46	11	mm	13	mm
47	11	mm	15	mm
48	12	mm	11	mm
49	12	mm	14	mm
50	12	mm	10	mm
51	9	mm	13	mm
52	13	mm	17	mm
53	12	mm	13	mm
54	11	mm	16	mm
55	10	mm	15	mm
56	10	mm	15	mm
57	11	mm	12	mm
58	10	mm	15	mm
59	8	mm	14	mm
60	11	mm	15	mm

61	11	mm	14	mm
62	10	mm	15	mm
63	12	mm	13	mm
64	10	mm	16	mm
65	11	mm	13	mm
66	12	mm	13	mm
67	12	mm	15	mm
68	11	mm	13	mm
69	10	mm	15	mm
70	9	mm	14	mm
71	10	mm	13	mm
72	11	mm	13	mm
73	11	mm	14	mm
74	12	mm	14	mm
75	12	mm	13	mm
76	11	mm	14	mm
77	11	mm	14	mm
78	10	mm	13	mm
79	13	mm	14	mm
80	13	mm	12	mm
81	10	mm	13	mm
82	11	mm	12	mm
83	12	mm	15	mm
84	11	mm	14	mm
85	10	mm	16	mm
86	10	mm	14	mm
87	11	mm	15	mm
88	11	mm	17	mm
89	11	mm	13	mm
90	12	mm	13	mm
91	9	mm	14	mm
92	10	mm	15	mm
93	13	mm	10	mm

94	12	mm	12	mm
95	10	mm	12	mm
96	8	mm	9	mm
97	11	mm	10	mm
98	10	mm	12	mm
99	11	mm	13	mm
100	11	mm	14	mm
sumatoria	1083		1409	
promedio	10.83	mm	14.09	mm
#	REPETICIONES			
1	8	4	9	1
2	9	9	10	3
3	10	26	11	2
4	11	30	12	10
5	12	24	13	20
6	13	6	14	25
7	14	1	15	22
8			16	9
9			17	4
10			18	1
11			19	2
12			20	1
Tamaño de grano promedio				
8	mm			Pequeño
11	mm			Mediano
14	mm			Grande

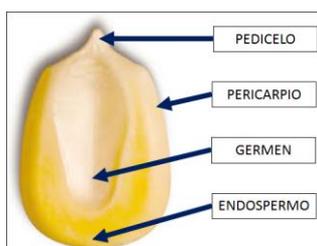


Figura 92. Diámetro de las partes del maíz considerando el tamaño de grano desde el pedicelo hasta el endospermo.

ANEXO C

Tabla 49.*Descripción de conexión pines Arduino.***ARDUINO**

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
MEGA2560	N3	Salida J17	VCC
MEGA2561	N2	Salida J17	GND
MEGA2562	C4	Salida J12	PBO 53
MEGA2563	A5	Salida J11	PAO 22
MEGA2564	S3	Salida J9	SDA 20
MEGA2565	S4	Salida J9	SDA 21
MEGA2566	R1	COMUNICACIÓN J10	TX0 1
MEGA2567	T1	COMUNICACIÓN J10	RX0 0
MEGA2568	A3	Salida J18	SCL
MEGA2569	A4	Salida J18	SDA
MEGA2570	A1	Salida J18	GND
MEGA2571	S8	Salida J9	PB5 11
MEGA2572	N15	Salida J17	PB5 10
MEGA2573	N14	Salida J17	PB4 9
MEGA2574	N11	Salida J17	PH6 8
MEGA2575	N10	Salida J17	PH4 7
MEGA2576	C7	Salida J15	PH3 6
MEGA2577	C6	Salida J14	PE3 5
MEGA2578	C3	Salida J13	PEG 4
MEGA2579	C2	Salida J12	PE5 3
MEGA2580	N1	Salida J11	PE4 2

Tabla 50.*Descripción de conexión pines módulo controlador de servos.***MÓDULO CONTROLADOR DE SERVOS**

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
PCA 9677	A1	Entradas	GND
PCA 9678	A2	Entradas	OE
PCA 9679	A3	Entradas	SCL
PCA 9680	A4	Entradas	SDA
PCA 9681	A5	Entradas	VCC
PCA 9682	A6	Entradas	V+
PCA 9685	M1	Salida	VOLTAGE +
PCA 9686	M2	Salida	VOLTAGE -
PCA 9687	M3	Salida	SEÑAL C.
PCA 9688	M4	Salida	VOLTAGE +
PCA 9689	M5	Salida	VOLTAGE -
PCA 9690	M6	Salida	SEÑAL C.
PCA 9691	M7	Salida	VOLTAGE +
PCA 9692	M8	Salida	VOLTAGE -
PCA 9693	M9	Salida	SEÑAL C.
PCA 9694	M10	Salida	VOLTAGE +
PCA 9695	M11	Salida	VOLTAGE -
PCA 9696	M12	Salida	SEÑAL C.
PCA 9697	M13	Salida	VOLTAGE +
PCA 9698	M14	Salida	VOLTAGE -
PCA 9699	M15	Salida	SEÑAL C.
PCA 9700	M16	Salida	VOLTAGE +
PCA 9701	M17	Salida	VOLTAGE -
PCA 9702	M18	Salida	SEÑAL C.
PCA 9703	M19	Salida	VOLTAGE +
PCA 9704	M20	Salida	VOLTAGE -
PCA 9705	M21	Salida	SEÑAL C.
PCA 9706	M22	Salida	VOLTAGE +
PCA 9707	M23	Salida	VOLTAGE -

PCA 9708	M24	Salida	SEÑAL C.
PCA 9709	M25	Salida	VOLTAGE +
PCA 9710	M26	Salida	VOLTAGE -
PCA 9711	M27	Salida	SEÑAL C.
PCA 9712	M28	Salida	VOLTAGE +
PCA 9713	M29	Salida	VOLTAGE -
PCA 9714	M30	Salida	SEÑAL C.
PCA 9715	M31	Salida	VOLTAGE +
PCA 9716	M32	Salida	VOLTAGE -
PCA 9717	M33	Salida	SEÑAL C.
PCA 9718	M34	Salida	VOLTAGE +
PCA 9719	M35	Salida	VOLTAGE -
PCA 9720	M36	Salida	SEÑAL C.
PCA 9721	M37	Salida	VOLTAGE +
PCA 9722	M38	Salida	VOLTAGE -
PCA 9723	M39	Salida	SEÑAL C.
PCA 9724	M40	Salida	VOLTAGE +
PCA 9725	M41	Salida	VOLTAGE -
PCA 9726	M42	Salida	SEÑAL C.
PCA 9727	M43	Salida	VOLTAGE +
PCA 9728	M44	Salida	VOLTAGE -
PCA 9729	M45	Salida	SEÑAL C.

Tabla 51.

Descripción de conexión pines acelerómetro.

J9 ACELERÓMETRO

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
MPU 6050	S1	Entradas	VCC
MPU 6051	S2	Entradas	GND
MPU 6052	S3	Salida	SDA
MPU 6053	S4	Salida	SDA
MPU 6054	S5	-	XDA
MPU 6055	S6	-	XCL
MPU 6056	S7	-	ADO
MPU 6057	S8	Salida	INT

Tabla 52.*Descripción de conexión pines módulo bluetooth.***J2 MÓDULO BLUETOOTH**

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-05	-	Entradas	KEY
HC-05	-	Entradas	VCC
HC-05	-	Entradas	GND
HC-05	T1	COMUNICACIÓN	TXD
HC-05	R1	COMUNICACIÓN	RXD
HC-05	-	Entradas	State

Tabla 53.*Descripción de conexión pines sensores ultrasónicos.***J4 ULTRASÓNICO1**

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-SR04	N3	Entradas	5V
HC-SR04	C2	Salida	TRIGGER
HC-SR04	C3	Salida	ECHO
HC-SR04	C4	Entradas	GND

J5 ULTRASÓNICO2

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-SR04	N3	Entradas	5V
HC-SR04	C6	Salida	TRIGGER
HC-SR04	C7	Salida	ECHO
HC-SR04	C4	Entradas	GND

J6 ULTRASÓNICO3

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-SR04	N3	Entradas	5V
HC-SR04	C10	Salida	TRIGGER
HC-SR04	C11	Salida	ECHO
HC-SR04	C4	Entradas	GND

J7 ULTRASÓNICO4

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-SR04	N3	Entradas	5V
HC-SR04	C14	Salida	TRIGGER
HC-SR04	C15	Salida	ECHO
HC-SR04	C4	Entradas	GND

J8 ULTRASÓNICO5

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
HC-SR04	N3	Entradas	5V
HC-SR04	C18	Salida	TRIGGER
HC-SR04	C19	Salida	ECHO
HC-SR04	C4	Entradas	GND

Tabla 54.

Descripción de conexión pines sensor infrarrojo.

J3 INFRARROJO

Componente	Nombre pin	Entrada/ Salida	Descripción
2706749	N3	Entradas	VCC
2706749	N2	Entradas	GND
2706749	N1	Salida	OUT