



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MECATRÓNICO
COSECHADOR DE YUCA PARA PEQUEÑOS AGRICULTORES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: ERICK MANUEL OLMOS ÁLVAREZ

TUTOR: FABIO EDUARDO OBANDO HERRERA

Quito-Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Erick Manuel Olmos Álvarez con documento de identificación N° 1724190879 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Erick Manuel Olmos Álvarez

1724190879

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Erick Manuel Olmos Álvarez con documento de identificación No. 1724190879, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Dispositivo Tecnológico: “Diseño y Construcción de un Prototipo Mecatrónico Cosechador de Yuca para Pequeños Agricultores”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Erick Manuel Olmos Álvarez

1724190879

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabio Eduardo Obando Herrera con documento de identificación N° 1707982169, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MECATRÓNICO COSECHADOR DE YUCA PARA PEQUEÑOS AGRICULTORES, realizado por Erick Manuel Olmos Álvarez con documento de identificación N° 1724190879, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Dispositivo Tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera, MSc

1707982169

AGRADECIMIENTO

Al concluir esta etapa maravillosa de mi vida quiero expresar el más profundo agradecimiento, a todas aquellas personas que hicieron posible este sueño, aquellos que junto a mí caminaron en todo momento y fueron fuente de inspiración, apoyo y fortaleza. Esta mención tan especial se la dedico primero a Dios, por guiarme y bendecirme estos años con salud y sabiduría, a mis amados padres Manuel Leonardo Olmos y María Inés Álvarez, por ser mi ejemplo de constancia y esfuerzo, por sus palabras de aliento y su apoyo incondicional en este arduo camino. A mis hermanos Marco y Darwin que me han brindado su apoyo en los momentos más difíciles de mi formación.

Mi gratitud también a la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana por haberme acogido en sus instalaciones y ser parte de su proceso de enseñanza profesional y humana.

A mis docentes que formaron parte fundamental de este proceso de formación, en especial a mi tutor de proyecto de titulación, Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera MSc. PhD, por su ayuda, paciencia y ser una guía valiosa para culminar con éxitos este proyecto.

A mis compañeros de clase que eventualmente se convirtieron en mis amigos y fuente de apoyo en mi vida cotidiana y dentro de la carrera.

Gracias infinitas a todas las personas que me apoyaron y siempre estarán presentes en mí corazón.

GLOSARIO

Desarraigar: Arrancar de raíz una planta.

Subsolador: Implemento empleado para la roturación (escarificación) profunda (desfonde) de los terrenos agrícolas, por debajo de la capa arable, sin voltear el suelo, especialmente para lograr su des compactación

Tubérculo: Es una raíz o un tallo que contiene almidón y puede ser utilizado para consumo de animales como de seres humanos.

Peridermis: El tejido peridérmico es el revestimiento del cuerpo vegetativo secundario de la planta.

Esclerenquima: Es un tejido de sostén de algunas plantas, formado por células muertas a la madurez, cuyas paredes secundarias están engrosadas y endurecidas.

Escarda: Es la técnica que se emplea en la agricultura para arrancar los cardos y malas hierbas que nacen junto al cultivo.

Monoica: Se denomina así a las especies de plantas que poseen ambos sexos.

Inflorescencia: Es un grupo o racimo de flores dispuestas sobre un tallo que se compone de una rama principal o de una complicada disposición de ramas.

Esqueje: Es un fragmento de tallo con yemas de consistencia leñosa.

Tróclea: Extremo de un hueso en forma de polea que se articula con el hueso adyacente, pudiendo girar en el mismo plano.

Enhebrar: Pasar un hilo, alambre, cuerda, cadena.

Descopado: Sistema de poda en el que se retira las hojas de la parte superior de un árbol.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	III
<i>Problema de Estudio</i>	III
JUSTIFICACIÓN	V
GRUPO OBJETIVO	VI
OBJETIVOS	VI
<i>Objetivo General</i>	VI
<i>Objetivos Específicos</i>	VI
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	1
<i>1.1 Antecedentes de la mandioca</i>	1
<i>1.2 Variedad de yuca en el Ecuador</i>	2
<i>1.2.1 Las negras</i>	2
<i>1.2.2 Las blancas</i>	3
<i>1.2.3 Las amarillas</i>	3
<i>1.3 Importancia nutricional de la yuca</i>	4
<i>1.3.1 Propiedades nutritivas del procesado de yuca</i>	5
<i>1.4 Morfología de la planta de yuca</i>	5
<i>1.5 Proceso de cultivo y cosecha</i>	6
<i>1.5.1 Adecuación del terreno</i>	6

<i>1.5.2 Siembra</i>	6
<i>1.5.3 Cosecha</i>	7
<i>1.6 Métodos de desarraigado tradicionales</i>	8
<i>1.6.1 Nudo de puerco o vuelta firme</i>	9
<i>1.6.2 La cadena o eslabones de hierro</i>	10
<i>1.6.3 El lazo</i>	10
<i>1.6.4 Ocho (Todos hechos de sogas o cabos)</i>	11
<i>1.6.5 Manual</i>	12
<i>1.7 Métodos de desarraigado industrial</i>	12
<i>1.7.1 Máquinas comerciales de tipo rígido</i>	13
<i>1.7.2 Máquinas comerciales de tipo flexible</i>	14
<i>1.8 Riesgo ergonómico en la cosecha de yuca</i>	14
<i>1.8.1 Ruido y vibraciones</i>	14
<i>1.8.2 Riesgos relacionados con la geografía del terreno</i>	15
<i>1.8.3 Riesgo mecánico</i>	15
<i>1.8.4 Demanda laboral procedente de la acción física</i>	15
<i>1.9 Prototipos y proyectos realizados</i>	15
<i>1.10 Teoría de la palanca</i>	16
<i>1.10.1 Elementos de la palanca</i>	16
<i>1.10.2 Tipos de palanca</i>	17
<i>1.11 Antropometría</i>	18

1.11.1 dimensionamiento antropométrico utilizado en el diseño	18
1.11.2 Datos estadísticos sobre la antropometría de la población	19
1.12 Ergonomía del codo	20
1.13 Fuerza de desarraigado	21
1.14 Normas y guías	21
1.14.1 Norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 7250-1	21
1.14.2 Norma NTP- guía de prácticas correctas	21
1.14.3 Norma ecuatoriana INEN 1 900.....	22
1.14.4 Norma NTE INEN 2415-2	22
CAPÍTULO 2.....	23
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	23
2.1 Análisis general.....	23
2.1.1 Máquina cosechadora de yuca con extracción total de la planta (D1)	23
2.1.2 Máquina cosechadora de yuca manual (D2)	24
2.1.3 Máquina cosechadora de yuca semiautomática (D3)	25
2.2 Análisis cualitativo	27
2.3 Análisis cuantitativo	27
2.3.1 Jerarquización de las necesidades	27
2.3.2 Relación cualitativa y cuantitativa	28
CAPÍTULO 3.....	29
ANÁLISIS DE CARGAS.....	29

3.1 Parámetros geométricos.....	29
3.1.1 Parámetros geométricos de distancias horizontales	29
3.1.2 Parámetros geométricos de distancias verticales	30
3.2 Parámetros de fuerzas aplicadas	30
3.3 Análisis estático.....	31
3.3.1 Obtención de la longitud del segmento DE (d_3)	32
3.3.2 Obtención de la longitud del segmento AC	33
3.3.3 Cálculo de reacciones en el punto A	34
3.3.4 Cálculo de reacciones en el segmento AC.....	35
3.3.5 Cálculo de la fuerza F_m para realizar el movimiento de palanca principal.....	36
3.3.6 Cálculo de reacciones en el segmento AB	38
3.3.7 Cálculo del peso W	40
3.3.8 Cálculo de las reacciones del pedal de apoyo	41
3.4 Cálculo de soldadura	42
3.5 Análisis del mecanismo	47
3.6. Selección de materiales, tubos, pasadores, pernos y rodamientos	48
3.6.1 Selección de material para el segmento CD.....	49
3.6.2 Selección de material para los segmentos AC y AB.....	52
3.6.3 Selección de pasadores.....	54
3.6.4 Selección de pernos	56
3.6.5 Selección del material para el segmento SRP.....	57

3.6.6 Selección de material para el segmento DQBS	60
3.6.7 Selección de la pinza de sujeción	61
3.7. Diseño eléctrico y electrónico	62
3.7.1 Conexión del actuador	63
3.7.2 Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento	64
3.7.3 Diagrama de flujo del sistema eléctrico.....	68
3.7.4 Diagrama de flujo del motor a pasos	70
CAPÍTULO 4.....	72
IMPLEMENTACIÓN.....	72
4.1 Manufactura y ensamble	72
4.2 Secuencia para la construcción del prototipo.....	72
4.3 Adquisición de materia prima	73
4.4 Proceso de serrado.....	73
4.5 Corte por haz de láser (LBC)	74
4.6 Proceso de soldadura SMAW.....	74
4.7 Proceso de recubrimiento	75
4.8 Ensamble mecánico	76
4.9 Ensamble eléctrico	76
4.10 Implementación del sistema de control	77
4.11 Implementación y funcionamiento.....	77
CAPÍTULO 5.....	79

PRUEBA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
<i>5.1 Prueba 1</i>	<i>79</i>
<i>5.2 Prueba 2</i>	<i>80</i>
<i>5.3 Prueba 3</i>	<i>80</i>
<i>5.4 Información económica</i>	<i>81</i>
<i>5.4.1 Inversión</i>	<i>81</i>
<i>5.4.2 Depreciación</i>	<i>82</i>
<i>5.4.3 Costos fijos</i>	<i>82</i>
<i>5.4.4 Costos variables</i>	<i>83</i>
<i>5.4.5 Análisis para determinar el TIR y el VAN</i>	<i>87</i>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
<i>Conclusiones</i>	<i>89</i>
<i>Recomendaciones</i>	<i>90</i>
REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Raíces con peridermis oscura y esclerénquima crema de la variedad INIAP Portoviejo-651 [1]	2
Figura 2. Raíces con peridermis de color blanco [1].....	3
Figura 3. Raíz con pulpa amarilla, peridermis marrón oscuro [1]	4
Figura 4. Plantación de yuca con maquinaria [16].....	7
Figura 5. Descopado de las plantas de yuca para la cosecha [16].....	8
Figura 6. Cosecha con polín y cadena [1]	9
Figura 7. Nudo de puerco [1]	10
Figura 8. Colocada de la cadena al cuello de la planta [1].....	10
Figura 9. Colocada del “lazo” al cuello de la planta [1]	11
Figura 10. Colocada del “ocho” al cuello de la planta [1]	11
Figura 11. Cosecha por desarraigado manual [1].....	12
Figura 12. Modelo de cosechadora de yuca industrial [20]	13
Figura 13. Cosechador rígido [19]	13
Figura 14. Cosechador Flexible [19].....	14
Figura 15. Descripción gráfica de palanca [25]	16
Figura 16. Palanca de primer grado [25].....	17
Figura 17. Palanca de segundo grado [25]	17
Figura 18. Palanca de Tercer grado [25]	18

Figura 19. Medida antropométrica del codo [26].....	19
Figura 20. Equipo extractor para trasplante de árboles	23
Figura 21. Prototipo de Máquina extractora mecanizada para mandioca [23].....	25
Figura 22. Diseño del prototipo de Máquina extractora de yuca.	26
Figura 23. Boceto propuesto para el prototipo	29
Figura 24. Parámetros establecidos para el prototipo. Medidas en milímetros.....	31
Figura 25. Ángulos de inclinación y distancias proyectadas del segmento <i>DE</i>	32
Figura 26. Ángulos de inclinación y distancias proyectadas del segmento <i>AC</i>	33
Figura 27. Diagrama de cuerpo libre de la placa de unión.....	34
Figura 28. Punto A, diagrama de cuerpo libre (DCL).....	35
Figura 29. Segmento <i>AC</i> , diagrama de cuerpo libre (DCL).....	36
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre del segmento <i>CE</i>	37
Figura 31. Segmento <i>AB</i> , diagrama de cuerpo libre (DCL).....	39
Figura 32. Diagrama de cuerpo libre del prototipo	40
Figura 33. Segmento <i>SP</i> , diagrama de cuerpo libre (DCL)	41
Figura 34. Cabeza de la palanca soldada.....	43
Figura 35. Diagrama de cuerpo libre de la palanca principal con un análisis de respuesta en la placa de apoyo.....	44
Figura 36. Apoyo inferior de la placa, diagrama de cuerpo libre (DCL).....	45
Figura 37. Perfil lateral de garganta de la soldadura.....	46
Figura 38. Palanca principal en posición horizontal	48

Figura 39. Movimiento de la palanca principal hasta la conclusión de la extracción.....	48
Figura 40. Diagrama de carga de segmento <i>CD</i> , simulación de una viga empotrada.....	49
Figura 41. Diagrama fuerzas cortantes del segmento <i>CD</i>	49
Figura 42. Diagrama de momentos del segmento <i>CD</i>	50
Figura 43. Catálogo de tubo redondo [31]	50
Figura 44. Simulación Factor de Seguridad segmento <i>CD</i>	52
Figura 45. Catálogo de tubo cuadrado [31].....	53
Figura 46. Sección transversal del tubo cuadrado.....	53
Figura 47. Catálogo de varilla redonda lisa [31].....	55
Figura 48. Catálogo pernos hexagonales grado 2 [32].....	57
Figura 49. Diagrama de carga de segmento <i>SRP</i> , simulación de una viga empotrada ...	57
Figura 50. Diagrama fuerzas cortantes del segmento <i>SRP</i>	58
Figura 51. Diagrama de momentos del segmento <i>SRP</i>	58
Figura 52. Catálogo de tubo rectangular [31]	59
Figura 53. Catálogo de tubo redondo [31]	60
Figura 54. Simulación Factor de Seguridad segmento <i>DQBS</i>	61
Figura 55. Pinza de agarre [23]	61
Figura 56. Diagrama de conexión para el teclé eléctrico	62
Figura 57. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 1)	64
Figura 58. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 2)	65
Figura 59. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 3)	66

Figura 60. Diagrama de flujo del diseño electrónico	68
Figura 61. Adquisición de materiales metálicos	73
Figura 62. Proceso de serrado del material adquirido	74
Figura 63. Proceso de corte por haz de laser de la placa de unión de la garra superior..	74
Figura 64. Proceso de suelda SMAW del perfil metálico	75
Figura 65. Proceso de recubrimiento anticorrosivo	75
Figura 66. Ensamble mecánico de las piezas metálicas y accesorios	76
Figura 67. Ensamble eléctrico y electrónico	77
Figura 68. Integración de todas las partes del prototipo	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos antropométricos de Ecuador [27].....	20
Tabla 2 Medición de la fuerza para desarraigar [23].	21
Tabla 3 Características mecánicas y clasificación de los tubos ASTM A500/A500M [30]	22
Tabla 4 Reconocimiento de las necesidades	27
Tabla 5 Ponderación de prioridades	28
Tabla 6 Necesidades de implementación e importancia ponderada.....	28
Tabla 7 Fuerzas máximas presentes en las uniones soldadas.....	43
Tabla 8 Tubo de grado A según las características mecánicas ASTM A500/A500M....	51
Tabla 9 Fuerzas presentes en los segmentos <i>AC</i> y <i>AB</i>	52
Tabla 10 Fuerzas presentes en pasadores.	54
Tabla 11 Propiedades mecánicas de pernos hexagonales ASTM A307 Grado A [32]...	56
Tabla 12 Reacciones presentes en el segmento <i>DQBS</i>	60
Tabla 13 parámetros técnicos de cables tipo AWG PVC.....	62
Tabla 14 Conexión y tipo de señal de lectura del actuador.....	63
Tabla 15 Secuencia de construcción del prototipo.....	72
Tabla 16 Resultados obtenidos prueba 1	79
Tabla 17 Resultados obtenidos prueba 2.....	80
Tabla 18 Resultados obtenidos prueba 3.....	81

Tabla 19 Costo de inversión del proyecto	82
Tabla 20 Depreciación de activos fijos con el paso del tiempo	82
Tabla 21 Costos fijos.....	82
Tabla 22 Costos de la materia prima para la construcción del prototipo	83
Tabla 23 Materiales mecánicos	83
Tabla 24 Materiales eléctricos y electrónicos	84
Tabla 25 Lista de componentes del kit de moto eléctrica	84
Tabla 26 Mano de obra directa para la construcción del prototipo	85
Tabla 27 Mano de Obra indirecta.....	85
Tabla 28 Resumen de costos variables totales	85
Tabla 29 Flujo de caja	87
Tabla 30 Valores de VAN y TIR	88

RESUMEN

En el presente documento se puede verificar el desarrollo del dispositivo tecnológico intitulado “Diseño y construcción de un prototipo mecatrónico cosechador de yuca para pequeños agricultores”, está destinado al campo técnico, social y de agricultura. Es un sistema conformado por una estructura metálica compuesta por un mecanismo de palanca asistido por un teclé eléctrico, además incorpora una rueda eléctrica para efectuar el desplazamiento del prototipo. El cual ayuda al operador a ubicar la máquina en la posición deseada y brinda la fuerza de desarraigado necesaria para reducir el esfuerzo físico.

Para el diseño de la máquina se tomó en cuenta la normativa del Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN-ISO 7250-1, como también la guía de buenas prácticas de Seguridad e higiene en el trabajo.

El prototipo fue elaborado con componentes y materiales tanto mecánicos como eléctricos que son de fácil acceso en el mercado ecuatoriano enfocado en las medidas antropométricas latinoamericanas, para el diseño mecánico se realizó análisis estáticos de los elementos mediante simulaciones de elementos finitos en el software Inventor 2022. Para el diseño del sistema eléctrico de control se implementó la programación que gobierna el comportamiento del motor eléctrico con apoyo del IDE de Arduino. Con los parámetros controlados el operario podrá determinar la posición y orientación de la garra de extracción que le permita realizar la actividad de cosecha de yuca en un entorno ergonómico respecto a su postura de agarre vertical, además que es un prototipo de fácil montaje que permita el movimiento libre del operario.

Palabras Clave: Antropometría, cosecha, desarraigar, eléctrico, ergonomía, palanca, yuca.

ABSTRACT

In this document we can verify the development of the technological device entitled "Design and construction of a mechatronic prototype cassava harvester for small farmers", it is intended for the technical, social and agricultural field. It is a system made up of a metallic structure composed of a lever mechanism assisted by an electric keypad, it also incorporates an electric wheel to move the prototype. This helps the operator to place the machine in the desired position and provides the necessary uprooting force to reduce physical effort.

For the design of the machine, the standards of the Ecuadorian Institute of Standardization NTE INEN-ISO 7250-1 were taken into account, as well as the guide of good practices of safety and hygiene at work.

The prototype was elaborated with mechanical and electrical components and materials that are easily accessible in the Ecuadorian market, focused on Latin American anthropometric measurements. For the mechanical design, static analysis of the elements was carried out through finite element simulations in Inventor 2022 software. For the design of the electrical control system, the programming that governs the behavior of the electric motor was implemented with the support of the Arduino IDE. With the controlled parameters the operator will be able to determine the position and orientation of the extraction claw that will allow him to perform the cassava harvesting activity in an ergonomic environment with respect to its vertical grip posture, in addition to being an easy to assemble prototype that allows free movement of the operator.

Keywords: Anthropometry, harvesting, uprooting, electric, ergonomics, leverage, cassava.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problema de Estudio

El cultivo de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) es muy importante para el ser humano por ser un tubérculo altamente nutritivo con las ventajas de mantener el peso corporal, aportar vitaminas B, C y K, y saciar a los consumidores.

La principal producción en el Ecuador se da entre pequeños agricultores de diferentes regiones del país, especialmente aquellas de clima húmedo; el cultivo y la recolección se realizan mediante métodos locales, tradicionales e incluso industriales. [1]

Existen métodos industriales que emplean máquinas recolectoras comerciales, las cuales implican máquinas subterráneas montadas como accesorios de tractores que extraen raíces enteras directamente del suelo [2]. Estos dispositivos pueden ser tanto rígidos como flexibles.

El uso de combustible para los equipos de recolección, tractores y maquinaria industrial quema una gran cantidad de combustible todos los días, liberando más CO₂ al medioambiente y causando la devastación global actual [3].

La quema de combustibles fósiles utilizados en la maquinaria agrícola puede reducir la fertilidad del suelo debido a la deposición de partículas finas de combustible durante los años de labranza y recolección.

Las herramientas tradicionales o manuales para la obtención de yuca consisten en enhebrar un trozo de madera (“Polín”) y amarrarlo al tallo de la planta con una cuerda (nudo de cerdo), luego levantar con fuerza el extremo del “Polín” hasta que la planta se libera de las raíces [4].

Las técnicas tradicionales crean una fuerza excesiva durante la cosecha, lo que permite que la energía resistiva de la planta viaje por la columna vertebral de la persona y se concentre entre cada disco, formado por una serie de anillos fibrosos que absorben estas tensiones. Multiplicados al núcleo central en todas las direcciones. Estas fuerzas concentradas pueden causar problemas en la parte inferior de la espalda, como dolor en la parte inferior de la espalda (Lumbago), ciática y posiblemente una hernia de disco [5].

Con una inversión de 1.581,05 USD, hay pocos agricultores en Ecuador que siembran y recolectan tubérculos de yuca. De esta inversión 255,96 USD se destinan a la recolección [6], sin mano de obra ni trabajadores adicionales en la cadena productiva.

JUSTIFICACIÓN

En Ecuador, la cosecha de yuca en algunas zonas debe hacerse de manera tradicional, práctica que requiere un gran esfuerzo físico por parte de los responsables de las operaciones. Debido a la dureza del suelo y al hecho de que las plantas se mantienen muy bien, las implementaciones tecnológicas pueden ayudar a los agricultores a prevenir daños en el cuerpo a largo plazo.

Utilizando un prototipo mecánico y eléctrico tipo carretilla, la fuerza aplicada por el agricultor para el desplazamiento o traslado será 3 veces menor que la carga total [7]. Las ventajas de utilizar montacargas son: mantenimiento económico, transporte y manejo de materiales pesados, seguridad y versatilidad [8].

Según un estudio de [9], la producción diaria para un adulto es de 500 kg/día, sin importar la recolección, selección y envasado. El empleo de la tecnología ayuda a acortar el tiempo de recolección y está muy relacionado con el desempeño diario de un adulto en una jornada laboral.

GRUPO OBJETIVO

A todas aquellas personas que forman parte de la cosecha, así como a cualquier empresa que esté dirigida al sector de la yuca.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo mecatrónico cosechador de yuca para pequeños agricultores.

Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte de los diferentes métodos de cosecha de la yuca para determinar parámetros de construcción del mecanismo.
- Calcular y simular los elementos del sistema mecatrónico del prototipo mediante la ayuda de software.
- Implementar el prototipo realizando las pruebas de campo para garantizar su funcionamiento.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Este capítulo examina el entorno en el que se cultiva y recolecta la mandioca, las normas para el uso de herramientas y el desarrollo de mecanismos de extracción actuales y rudimentarios para desarrollar el diseño y construcción de cosechadoras, además de brindar información muy útil acerca de la selección de materiales y elementos.

1.1 Antecedentes de la mandioca

La yuca es un tubérculo de procedencia americana propagada por una amplia zona de América tropical partiendo por gran parte de Colombia y su país vecino Venezuela hasta la zona nororiental de Brasil, donde la mandioca dulce domina en las regiones del norte y la yuca amarga en Brasil. En las afirmaciones de Rogers, se menciona que las especies silvestres del grupo *Manihot* tienen alrededor de dos orígenes: el primero de ellos se hace mención en México y gran parte de Centroamérica, mientras que el segundo origen se estaría encontrando en la región nororiental de Brasil [10].

Según [11] el mundo realiza una producción de alrededor de 203 millones de toneladas de yuca, con una productividad aproximada de 10,9 toneladas por hectárea. Además, la mitad del cultivo mundial de mandioca (50 %) es de procedencia africana, una producción del 30 % se da en regiones asiáticas y por último apenas el 20 % de la producción se da en pocos países de América Latina.

Santo Domingo es la provincia de Ecuador con mayor producción de yuca, según [12] el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Los agricultores utilizan en total unas 2.594 hectáreas en lugares como Colorados del Búa, San Jacinto, San Gabriel del Baba, Puerto Limón y Julio Moreno Espinosa.

1.2 Variedad de yuca en el Ecuador

Los diferentes tipos de yuca que existen en el Ecuador se clasifican en tres grupos debido al color de sus raíces.

1.2.1 Las negras

Como se muestra en la Figura 1, el tallo de esta variedad de yuca, el peridermis de color oscuro y la pulpa blanca con esclerénquima púrpura o blanco cremoso son sus rasgos más distintivos. Esto la convierte en un rasgo significativo para su aplicación en productos frescos o procesados. En este grupo se incluye una amplia gama de variedades, entre las que destacan la escancela, pata de paloma, patucha, morada, valencia, INIAP Portoviejo-650 e INIAP Portoviejo-651. [1]

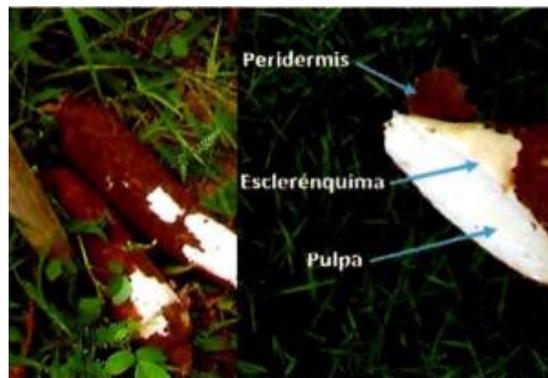


Figura 1. Raíces con peridermis oscura y esclerénquima crema de la variedad INIAP Portoviejo-651 [1]

Cabe mencionar que estas últimas 4 variedades son principalmente para el mercado de exportación y también para la venta a nivel nacional, mientras que las demás variedades mencionadas son producidas para el consumo local de poblaciones remotas y para el consumo de animales como los cerdos.

1.2.2 Las blancas

Este tipo de yuca tiene como característica principal es poseer un tallo, peridermis de color claro y su pulpa blanca que se muestra en la Figura 2, característica importante para su uso consumo en fresco. A este grupo pertenecen una variedad como la tureña, espada, blanca [1]:



Figura 2. Raíces con peridermis de color blanco [1]

1.2.3 Las amarillas

Las principales características de este tipo de yuca son tallos claros u oscuros, pericarpio y pulpa de color amarillo pálido, blanco o blanco lechoso, como se muestra en la Figura 3[1]:

Su variedad es: Yema de huevo, crema y amarilla



Figura 3. Raíz con pulpa amarilla, peridermis marrón oscuro [1]

Cabe mencionar que estas variedades de la mandioca amarilla son muy utilizadas en la provincia de Santo Domingo para la elaboración de chips como trozos de yuca y chifles.

1.3 Importancia nutricional de la yuca

La yuca es de gran importancia para los pueblos indígenas del Ecuador, según [13] las propiedades nutritivas que poseen son:

- Dado que es crucial para la creación y el mantenimiento de los dientes, así como para la generación de los pigmentos necesarios para el funcionamiento saludable de la retina, la vitamina A desempeña un papel importante en el desarrollo de una buena visión.
- Potente antioxidante antienvjecimiento, la vitamina C también contribuye a la absorción de otras vitaminas y minerales.
- Su alto contenido en fibra lo convierte en un alimento perfecto para ayudar al organismo a deshacerse de toxinas y residuos.

1.3.1 Propiedades nutritivas del procesado de yuca

La harina de tapioca, almidón derivado de la yuca tiene excelentes propiedades nutricionales, entre ellas [13]:

- Es rica en hidratos de carbono y otros nutrientes muy importantes en la dieta diaria. Es un tipo de alimento apto para todas las edades, especialmente indicado para deportistas.
- La yuca es portadora de magnesio, calcio, hierro y potasio.
- No contiene gluten.

1.4 Morfología de la planta de yuca

La yuca es un arbusto perenne (Puede vivir durante dos años o más) que varía en su tamaño según la especie de la que proviene, cuya altura puede alcanzar los 3,00 metros y se pueden dividir en: enana (hasta 1,50 metros), mediana (1,50-2,50 metros) y alta (más de 2,5 metros) [14].

Debido al almidón que producen, las raíces tienen un alto contenido de fibra y se denominan tubérculos. Las raíces tuberosas difieren de las raíces fibrosas en la dirección del crecimiento de la longitud radial. Las raíces también varían en tamaño, desde 20 cm hasta 50 cm de largo y aproximadamente 10 cm de diámetro [14].

Las hojas, de forma palmípeda, tienen 5-7 lóbulos que pueden ser ovoides o lineales. Miden unos 15 cm de largo, son simples, cambiantes y transitorias. Los tallos de las hojas son delgados, de 20 a 40 centímetros de largo, su color varía de rojo a verde. La epidermis es brillante y el estrato córneo es claro. Dependiendo de la caída de hojas en la estación seca, las variedades de yuca pueden conservar algunas o la mayoría de sus hojas (alrededor del 60 %) [14].

Como especie monoica, produce flores masculinas y femeninas en cada planta. Las flores masculinas se encuentran en la sección superior de la inflorescencia, mientras que las flores femeninas se encuentran en la mitad inferior de la planta. flores masculinas más pequeñas. [14]

El tallo cilíndrico de la mandioca está formado por nudos y entrenudos, y puede ser erguido, decumbente o reclinado. El tallo puede tener una, dos, tres o más ramas principales, tres de las cuales son las ramas principales de la yuca, según el tipo. Las variedades de alta ramificación, es decir, para los que miden más de 100 centímetros, se facilita el proceso de escarda. Su diámetro puede ser fino (menos de 20 milímetros de diámetro), medio (20-40 milímetros de diámetro) o grueso (más de 40 milímetros de diámetro) cuando se mide a una distancia de 20 centímetros del suelo. Los tallos suelen ser cortados en estacas de 70 a 300 milímetros de longitud para su proceso de cosecha [15]

1.5 Proceso de cultivo y cosecha

1.5.1 Adecuación del terreno

Según [16], Uno de los pasos más importantes en el cultivo de la mandioca es la adecuación del suelo, que debe ser suelto, profundo, bien drenado y libre de obstáculos para que las raíces crezcan sanas y la cosecha sea sencilla. La tracción puede ser mecánica (tractor) o animal. Se aconseja romper primero la capa de tierra con un arado de cincel o una máquina subterránea, rastrillar la zona (quizá dos veces) y luego labrar el suelo.

1.5.2 Siembra

Para el proceso de siembra, Se utilizan diferentes métodos: camellones, planos, surcos, camas y mecanizada, como se muestra en la Figura 4. El tipo de suelo, la pluviosidad, la

disponibilidad de personal y equipos agrícolas y el mercado influirán en la técnica de plantación utilizada.



Figura 4. Plantación de yuca con maquinaria [16]

1.5.3 Cosecha

Según [16], El área óptima de recolección depende del uso final del producto. Dependiendo de la variedad, se recomienda cosechar cuando las raíces están en su edad óptima, que se estima en 8 a 10 meses. Cosechar después de estos tiempos da como resultado raíces más duras, lo que afecta la calidad de la cocción y requiere tiempos de cocción más prolongados.

Se recomienda retirar la yuca cultivada (cortar las hojas) al menos ocho días antes de la cosecha. Esto implica quitar las hojas de la planta que se muestra en la Figura 5, dejando solo los tallos, para facilitar el retiro de la yuca (engrosamiento de la piel exterior) y evitar que se agriete durante la cosecha. Debe ser arrancado de raíz y protegido con pieles de sapo; si es positivo, el tallo debe descartarse como semilla y deben seguirse las recomendaciones de la enfermedad [16].



Figura 5. Descopado de las plantas de yuca para la cosecha [16]

La cosecha se realiza tirando manualmente del mango. Para no romper la yuca, primero se separa la raíz del tallo con unas tijeras muy afiladas o un cuchillo diminuto. A continuación, se elige la raíz según los criterios del mercado de destino. Se envían a una planta de envasado para su procesamiento tras almacenarlas en una caja de plástico y protegerlas de la luz solar para evitar que se dañen o se quemen.

La mayor parte de la yuca cosechada en el campo se envía a fábricas cuyo mercado de destino es la yuca congelada. Se recomienda llevar el producto a la fábrica de exportación para su procesamiento inmediato el día de la cosecha.

La planificación de la cosecha de yuca cerosa fresca para la exportación o incluso el consumo en el mercado local debe coordinarse con el comprador para que la cosecha se realice en el momento adecuado [16].

1.6 Métodos de desarraigado tradicionales

Las cosechas de yuca son recomendadas realizar en los meses de época seca del año, pudiendo realizarse esta actividad a partir de los 7 hasta los 16 meses según la variedad de yuca y el proceso posterior que se desee realizar como sacar almidones o harinas.

El método de arrancado tradicional consiste en el método manual; sin embargo, existen otros métodos como el lazo, el ocho, nudo de puerco, cadenas. Son métodos utilizados según la zona y dureza del suelo, además de la posición en la que la planta de yuca se encuentra [17].

Estos cuatro métodos usan: “Polín” (palo - 1,80 m de largo), ver Figura 6.



Figura 6. Cosecha con polín y cadena [1]

Además, El método de recolección depende de la variedad de esquejes de plantación y de la firmeza y pendiente del suelo.

1.6.1 Nudo de puerco o vuelta firme

Es el método más empleado por los agricultores. Permite una cosecha con gran facilidad, pero es laborioso y se dificulta con gran facilidad si el suelo este húmedo o en época de lluvias. El método consiste en hacer un nudo continuado con el amarre de la palanca (Trozo de madera o metal) que se emplea y se aplica con gran fuerza [17], como se ve en la Figura 7.



Figura 7. Nudo de puerco [1]

1.6.2 La cadena o eslabones de hierro

Es un método poco conocido originario de la provincia de Manabí. El método consiste en entrecruzar el cuello de la planta con una cadena, se anexa al tractor y se efectúa la cosecha [17], se muestra una parte del proceso en la Figura 8.



Figura 8. Colocada de la cadena al cuello de la planta [1]

1.6.3 El lazo

Es un método de fácil aplicación y muy rápido. Consiste en realizar un lazo en el cuello de la planta, entre cruzan sus extremos y se ajusta, se introduce el polín a través del hueco

que se dejó en el lazo y se aplica la fuerza[17], el proceso del “Lazo” se ilustra en la Figura 9.



Figura 9. Colocada del “lazo” al cuello de la planta [1]

1.6.4 Ocho (Todos hechos de sogas o cabo)

Es un método sencillo, barato y efectivo. Consiste en arrancar el tallo hasta los 20 centímetros aproximadamente del nivel del suelo, seguidamente se coloca una palanca en el cuello de la planta, se ajusta y se realiza el desarraigado [17], parte del proceso se puede visualizar en la Figura 10.



Figura 10. Colocada del “ocho” al cuello de la planta [1]

1.6.5 Manual

La cosecha se realiza de manera manual cuando el suelo es blando, en tierras arenosas y ligeras, en donde las raíces se extraen sin mucha complicación, verifique la Figura 11 para conocer el proceso. Existen otros usos de las herramientas como: picos, palas, palos, machetes, palos puntiagudos o tola, etc. Esta actividad representa el 30 % de los costos de producción total [18].



Figura 11. Cosecha por desarraigado manual [1]

1.7 Métodos de desarraigado industrial

Al reducir la mano de obra, los costes de producción, los tiempos de recolección por unidad de superficie y, en última instancia, los costes del producto hacen que la recolección mecanizada de la mandioca ofrezca una ventaja competitiva. Así, es posible aumentar la superficie y justificar la primera inversión en maquinaria agrícola [19].

De la Figura 12 se conoce que la maquinaria requiere una operación manual para extraer el tubérculo. El trabajo de estas herramientas es romper el suelo y aflojar las raíces. Su profundidad de trabajo media es de 40-50 centímetros y requieren mucha potencia [19].

Los equipos de recolección se presentan en dos variedades: de tipo rígido y de tipo flexible.



Figura 12. Modelo de cosechadora de yuca industrial [20]

1.7.1 Máquinas comerciales de tipo rígido

Como se muestra en la Figura 13 estas máquinas consisten en una cuchilla en forma de V, que consiste en bajar las uñas al suelo y aplicar fuerza hasta que se unan para formar una V y arrancar completamente la planta, su desventaja es que provoca la compactación del suelo [20].



Figura 13. Cosechador rígido [19]

1.7.2 Máquinas comerciales de tipo flexible

Como se muestra en la Figura 14, el subsolador (equipo utilizado para romper las capas compactadas del suelo para el laboreo vertical) de estas máquinas está diseñado como una horquilla. Parecidas a los equipos de extracción de minerales [20]



Figura 14. Cosechador Flexible [19]

1.8 Riesgo ergonómico en la cosecha de yuca

Los principales riesgos ergonómicos en la recolección de la mandioca son los riesgos mecánicos relacionados con el uso de herramientas manuales, maquinaria agrícola y equipos, que aumentan el esfuerzo debido a factores de riesgo adicionales; en particular, el esfuerzo físico dinámico, el terreno irregular y la presencia de elevaciones; las condiciones climáticas adversas, los riesgos biológicos y la carga mental, sin tener en cuenta los riesgos relacionados con la falta de saneamiento y el medio ambiente. [21]

1.8.1 Ruido y vibraciones

Producidos por el tractor y sus aperos (timón, arado y grada). Los mayores problemas de salud incluyen pérdida de audición, sordera, problemas musculoesqueléticos, impactos psicológicos, problemas de sueño y concentración, y repercusiones psicológicas. [21]

1.8.2 Riesgos relacionados con la geografía del terreno

En zonas de topografía errática, los peligros son mayores. Además, la presencia de vegetación, drenajes o crestas puede provocar resbalones, golpes, caídas y agotamiento.

[21]

1.8.3 Riesgo mecánico

Cuando se utilizan equipos agrícolas (tractores y accesorios), además de herramientas manuales (machetes, palas) para el desbroce manual y el laboreo mecanizado, existe el riesgo de lesiones, vuelcos, golpes, atropellos, amputaciones y muerte. [21]

1.8.4 Demanda laboral procedente de la acción física

Al recoger los tubérculos, los trabajadores permanecen de pie, se arrodillan, se agachan y se desplazan tanto horizontal como verticalmente. Para despejar y bajar la espalda, los trabajadores adoptan posturas forzadas o incómodas (agacharse, ponerse en cuclillas, permanecer de pie con los brazos estirados hacia delante) y realizan movimientos repetitivos con los brazos, las piernas y la cintura. Las lesiones musculoesqueléticas, el agotamiento físico y las lesiones por esfuerzo repetitivo son algunos de los problemas de salud que pueden afectar a los empleados. [21]

1.9 Prototipos y proyectos realizados

Los implementos y prototipos de cosecha de yuca se rigen en gran medida a los dos tipos de máquina industrial, el rígido y el flexible. Creando así:

- Apero para la cosecha semimecanizada de raíces reservantes, tubérculos y rizomas [22].
- Prototipo mecánico para desarraigar una planta de yuca [23].

- Cosechadora de Yuca tipo zanjadora [24].

1.10 Teoría de la palanca

Una palanca no es más que una máquina simple que consta de un fulcro o pivote sobre el que descansa una barra. De la Figura 15 se observa que al aplicar fuerza o potencia a un extremo de una varilla para vencer la resistencia en el otro extremo. La colocación correcta del fulcro permite una mayor potencia efectiva con menos esfuerzo.

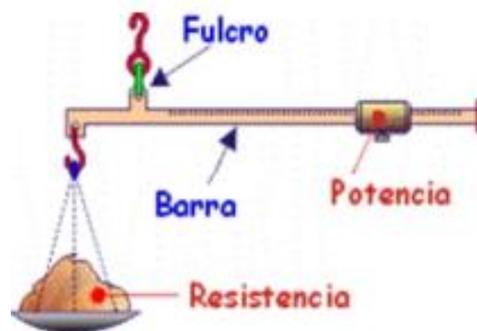


Figura 15. Descripción gráfica de palanca [25]

1.10.1 Elementos de la palanca

Desde un punto de vista técnico, al utilizar el apalancamiento para superar fuerzas, se consideran cuatro partes esenciales: [25]

- Fuerza que debe ejercerse; potencia (P).
- Resistencia (R), fuerza que hay que vencer; es la fuerza creada por la palanca como consecuencia de la potencia aplicada.
- Brazo de fuerza (BP), distancia entre el fulcro y el punto de aplicación de la fuerza.
- Brazo de resistencia (BR), separación entre el fulcro y el punto en el que se ejerce resistencia.

1.10.2 Tipos de palanca

De la Figura 16 en consecuencia, se considera que el primer grado es el eje o punto de pivote que se encuentra entre la carga y las fuerzas aplicadas. Se espera que se utilice menos fuerza cuanto más cerca esté la carga del punto de apoyo o fulcro. [25]

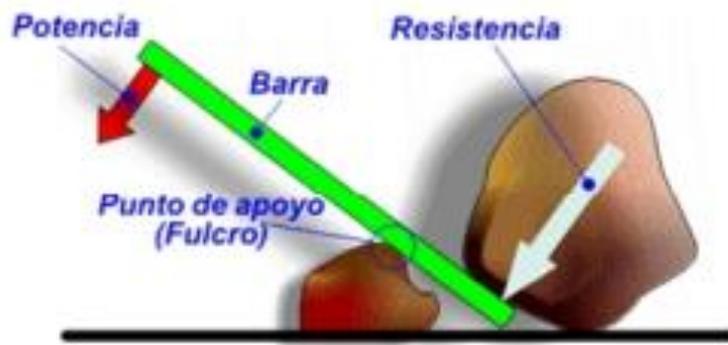


Figura 16. Palanca de primer grado [25]

En la segunda forma que se muestra en la Figura 17, entre la fuente y el fulcro es donde está la carga. Esto garantiza que la fuerza aplicada sea siempre menor que la carga ($P < R$) y que el brazo de fuerza sea siempre mayor que el brazo de resistencia ($BP > BR$). Las palancas de este tipo siempre son mecánicamente ventajosas.

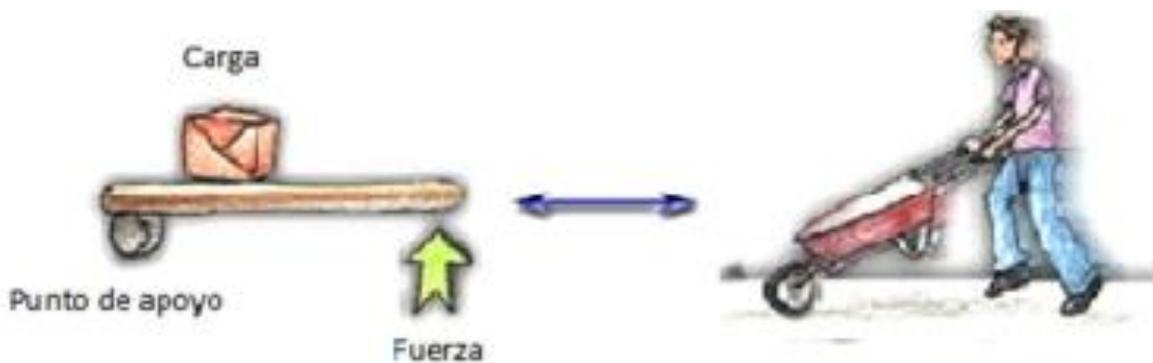


Figura 17. Palanca de segundo grado [25]

De la Figura 18 se establece que, debido a la gran carga, las palancas terciarias son necesarias cuando la fuerza (potencia) se sitúa entre el punto de apoyo y el punto de resistencia. La fuerza aplicada lejos del fulcro debe ser mayor. En cambio, la carga tiene mucho movimiento.



Figura 18. Palanca de Tercer grado [25]

1.11 Antropometría

Es crucial adquirir datos antropométricos de acuerdo con los requisitos del diseño ergonómico y las normas de la población a la que se aplicará el prototipo.

La antropometría es una norma para representar medidas cuantitativas del cuerpo humano y analizar sus dimensiones teniendo en cuenta las disposiciones anatómicas. Ayuda a determinar las características físicas de un individuo o grupo y se utiliza como herramienta en ergonomía para ayudar a las personas a adaptarse a su entorno. [26]

1.11.1 dimensionamiento antropométrico utilizado en el diseño

- a. Distancia vertical del codo

Como se muestra en la Figura 19 la altura del codo se mide verticalmente desde la horizontal (superficie de apoyo) hasta la depresión del codo, donde se unen los huesos del brazo y del antebrazo. [26]

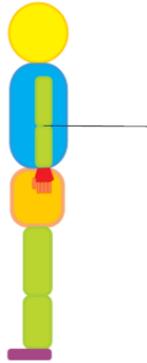


Figura 19. Medida antropométrica del codo [26]

b. Longitud normal

Separación vertical entre el vértice, la porción superior y más pronunciada del cráneo, y la horizontal (superficie de apoyo) [26]

c. Distancia vertical al tercer dedo (medio)

La medida es una distancia vertical entre la punta del tercer dedo (medio) y la horizontal (superficie de apoyo). [26]

1.11.2 Datos estadísticos sobre la antropometría de la población

Dado que el prototipo es una máquina que el usuario debe levantar y que debe cumplir el requisito de altura, al diseñarlo deben tenerse en cuenta las características antropométricas de la población.

Para realizar el diseño se hace uso de medidas promediadas estándares, sin embargo, en Ecuador no cuenta con datos antropométricos oficiales, por lo que se toma en cuenta

investigaciones científicas realizadas por varias universidades del país como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1
Datos antropométricos de Ecuador [27].

Nº	Medidas	5º	50º	95º
1	Altura Normal	1,6225	1,7239	1,825
2	Altura posición sentado normal	0,8472	0,8991	0,9490
3	Altura posición sentado relajado	0,8312	0,8809	0,9307
4	Altura de la rodilla	0,4743	0,5239	0,5735
5	Altura de la poplítea	0,3645	0,4145	0,4645
6	Altura del codo en posición sentado	0,1836	0,2322	0,2809
7	Grosor del muslo	0,0995	0,01320	0,01644
8	Longitud Glúteo-rodilla	0,5119	0,5711	0,6302
9	Longitud glúteo-poplítea	0,4001	0,4636	0,5271
10	Longitud codo-codo posición sentado	0,3802	0,4470	0,5138
11	Ancho de caderas posición sentado	0,3150	0,3562	0,3975
12	Longitud Hombro-Codo	0,3353	0,3632	0,3912
13	Longitud Codo-mano	0,4215	0,4608	0,5000

El boceto se crea utilizando los valores del percentil P95, que muestran la proporción de personas de una muestra que tienen un tamaño corporal igual o inferior a una cifra determinada.

1.12 Ergonomía del codo

El movimiento se realiza a través de un eje que discurre entre la parte media de la tróclea y el capitellum sirve para mover el codo tanto en flexión como en extensión. El codo presenta un valgo innegable cercano a los 15 grados, que se rectifica con la flexión. [28]

- Flexión: 145° de amplitud. Al ejecutar la flexión, se representa un ángulo de 35° entre la parte superior del brazo y el antebrazo. [29]
- Extensión: Para conseguir una extensión completa, el ángulo de extensión se cambia a 145°. En este caso, se crea un ángulo de 180° entre la parte superior del brazo y el antebrazo. [27]

1.13 Fuerza de desarraigado

Para determinar la fuerza de desarraigado de la planta de yuca se muestra en la Tabla 2 un estudio realizado y se toma como referencia la prueba con mayor cantidad de aplicación de fuerza.

Tabla 2

Medición de la fuerza para desarraigar [23].

Tipo de yuca	Venezolana				Mona-Blanca				Chirosa			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pruebas Fuerza para desarraigar [kN]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,3	1,1	1,3	1,2	1,1	1,3	1,4
	5	4	1	7	0	3	8	7	8	7	2	3

1.14 Normas y guías

Tanto para la morfología del prototipo como para su adecuado uso y seguridad, las normas y guías sirven como referentes que posibilitan el diseño de acuerdo con los lineamientos sugeridos.

1.14.1 Norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 7250-1

Norma Técnica Ecuatoriana (2014). NTE INEN-ISO 7250-1. Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias (ISO 7250-1:2008, IDT).

1.14.2 Norma NTP- guía de prácticas correctas

Norma NTP - Guía de buenas prácticas, Centro Nacional de condiciones de Trabajo (NTP 391: Herramientas manuales (I): condiciones generales de seguridad).

Lista de comprobación ergonómica para herramientas manuales.

1.14.3 Norma ecuatoriana INEN 1 900

Norma ecuatoriana obligatoria para la construcción de herramientas manuales, carretillas.
(INEN 1 900) 1992-06.

1.14.4 Norma NTE INEN 2415-2

Las especificaciones generales para tuberías de acero al carbono con fines estructurales y de uso general están establecidas en la Norma Ecuatoriana 2415, como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3

Características mecánicas y clasificación de los tubos ASTM A500/A500M [30]

Grado	Descripción	Límite de fluencia mínima (MPa)	Resistencia a la tracción mínima (MPa)	Elongación mínima en 50 mm ^ %
AC	Tubo para usos generales	--	290	≥ 35
A	Tubos estructurales sección circular	230	310	25 ^B
B		290	400	25 ^C
C		315	425	25 ^D
D		250	400	25 ^C
A	Tubos estructurales sección cuadrada, rectangular o especial	270	310	25 ^B
B		315	400	25 ^C
C		345	425	25 ^D
D		250	400	25 ^C

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Este capítulo ofrece un estudio de selección de varias posibilidades de modelo de proyecto, donde se encuentran algunas soluciones a los problemas generales del proyecto.

2.1 Análisis general

2.1.1 Máquina cosechadora de yuca con extracción total de la planta (D1)

Diseño y construcción de un prototipo mecatrónico extractor de yuca que incorpora una garra en forma de cuchilla en “V”, para remover completamente la planta del suelo como se muestra en la Figura 20. Su funcionamiento consiste en un sistema hidráulico que le permite a la cuchilla ingresar en el suelo y extraer la planta completamente desde la raíz.



Figura 20. Equipo extractor para trasplante de árboles

Ventajas:

- Fácil extracción de la planta.
- Nulo desgaste físico del operario.
- Eficiencia en la extracción de la planta.

Desventajas:

- Complejo diseño de la máquina.
- Ocupa mayor cantidad de espacio y recursos.
- Mayor cantidad de energía requerida.
- Excesivo costo de fabricación.

2.1.2 Máquina cosechadora de yuca manual (D2)

Diseño y desarrollo de un prototipo mecatrónico de extractor de mandioca que utiliza un mecanismo de palanca accionado manualmente. Su funcionamiento consiste en colocar la máquina en el lugar adecuado, atar la máquina a la planta con una brida y, a continuación, utilizar toda la fuerza necesaria para continuar con la extracción de la planta, como se indica en la Figura 21.



Figura 21. Prototipo de Máquina extractora mecanizada para mandioca [23]

Ventajas:

- Ocupa menor cantidad de espacio y recursos.
- Fácil manipulación de la máquina.
- No se requiere una fuente de energía.

Desventajas:

- Desgaste físico de articular del operario.
- Eficiencia baja de extracción de la planta.
- Mínima seguridad para el usuario.

2.1.3 Máquina cosechadora de yuca semiautomática (D3)

La Figura 22 muestra el diseño y desarrollo de un prototipo mecatrónico de extractor de mandioca. Incluye un sistema de pulsadores accionados por un operario, junto con un sistema de palancas apoyado por un teclado electrónico.

La funcionalidad del prototipo se basa en dos componentes clave. En primer lugar, se utiliza un sistema eléctrico móvil para colocar la máquina en el lugar adecuado. A continuación, se extrae la yuca con el sistema Tecle-polea.

El sistema eléctrico del prototipo se alimenta mediante baterías, las cuales están ubicadas en la parte inferior de la estructura metálica. Por otro lado, los accionamientos se encuentran en el mango posterior. Se utiliza un variador de potencia para controlar la velocidad de movimiento del prototipo, y se han incorporado botones para controlar el accionar del tecla eléctrica.

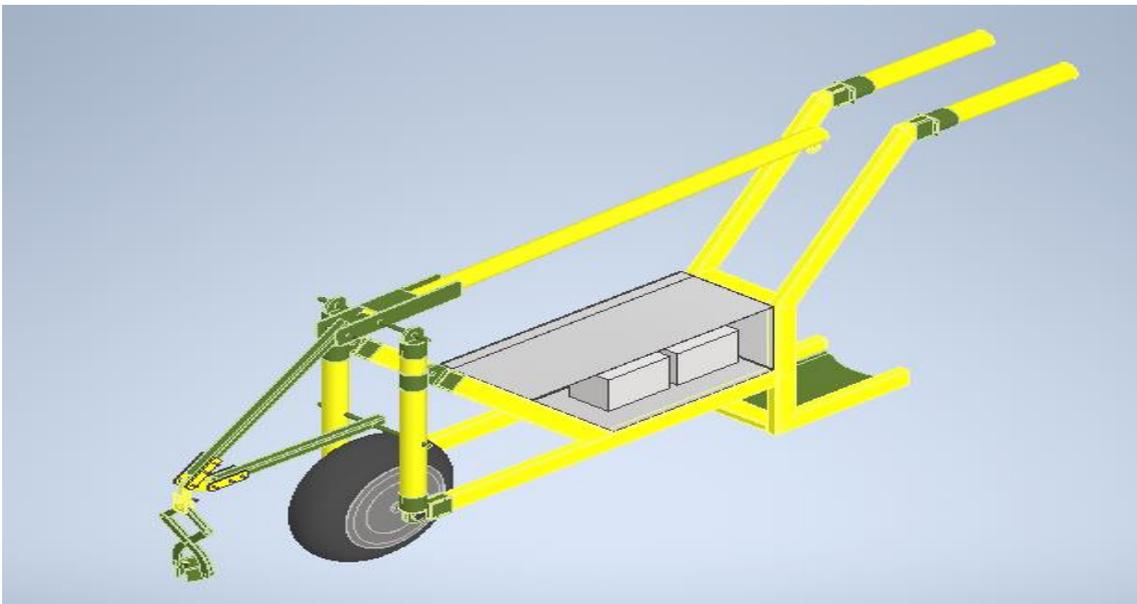


Figura 22. Diseño del prototipo de Máquina extractora de yuca.

Ventajas:

- Fácil extracción de la planta.
- Bajo desgaste físico y articular del operario.
- Eficiencia en la extracción de la planta.

Desventajas:

- Costo de fabricación accesible.
- Tiempo de funcionamiento restringido.

2.2 Análisis cualitativo

Para analizar cualitativamente el diseño del proyecto con el mejor resultado, se realizan interpretaciones a partir de las exigencias del operario, como los requerimientos propuestos por el diseñador, como se puede verificar en la Tabla 4.

Tabla 4

Reconocimiento de las necesidades

Necesidades	Interpretación
Liviano	Materiales y elementos (motor y baterías)
Esfuerzo mínimo	Diseño del prototipo eficiente que permita al operario realizar el menor esfuerzo posible en la palanca principal del mecanismo.
Bajo costo	Motor y sistema de transmisión de potencia de bajo costo de compra e implementación.
Ergonómico	Permitir al operario realizar la cosecha sin comprometer su postura.
Mejora de cosecha	Realizar el agarre y desarraigado del tubérculo de yuca en el menor tiempo posible.
Seguridad	Evitar lesiones por exceso de fuerza o mala postura.
Fácil ejecución	Cualquier operario puede ocupar la máquina sin el mayor esfuerzo posible.

2.3 Análisis cuantitativo

Para analizar cuantitativamente el diseño del proyecto con el mejor resultado se realizan valoraciones a partir de las necesidades cualitativas propuestas.

2.3.1 Jerarquización de las necesidades

Para realizar la jerarquización de las necesidades se realiza una ponderación, se indica en la Tabla 5.

Tabla 5

Ponderación de prioridades

Ponderación de 7 a 10	Ponderación de 4 a 6	Ponderación de 1 a 3
Prioritario	Leve	Bajo
Barato	Accesible	Complicado
Fácil	Normal	Caro
Muy accesible	Accesible	No existe

2.3.2 Relación cualitativa y cuantitativa

Tabla 6

Necesidades de implementación e importancia ponderada.

Parámetros	D1	D2	D3
Costo	2	8	5
Fuente de energía	5	9	8
Fabricación	3	8	7
Seguridad	10	4	9
Eficiencia	10	1	8
Tiempo de construcción	5	8	7
Disponibilidad de materiales	6	9	8
Total	41	47	52

Según el análisis de relación que se muestra en la Tabla 6, se concluye que el diseño D3 es el óptimo para realizar.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE CARGAS

3.1 Parámetros geométricos

Para permitir que el operador mantenga una posición de trabajo erguida durante el proceso de extracción, se consideraron los promedios antropométricos de una mujer de estatura promedio. En la Figura 23 se muestran dichas dimensiones medidas en milímetros.

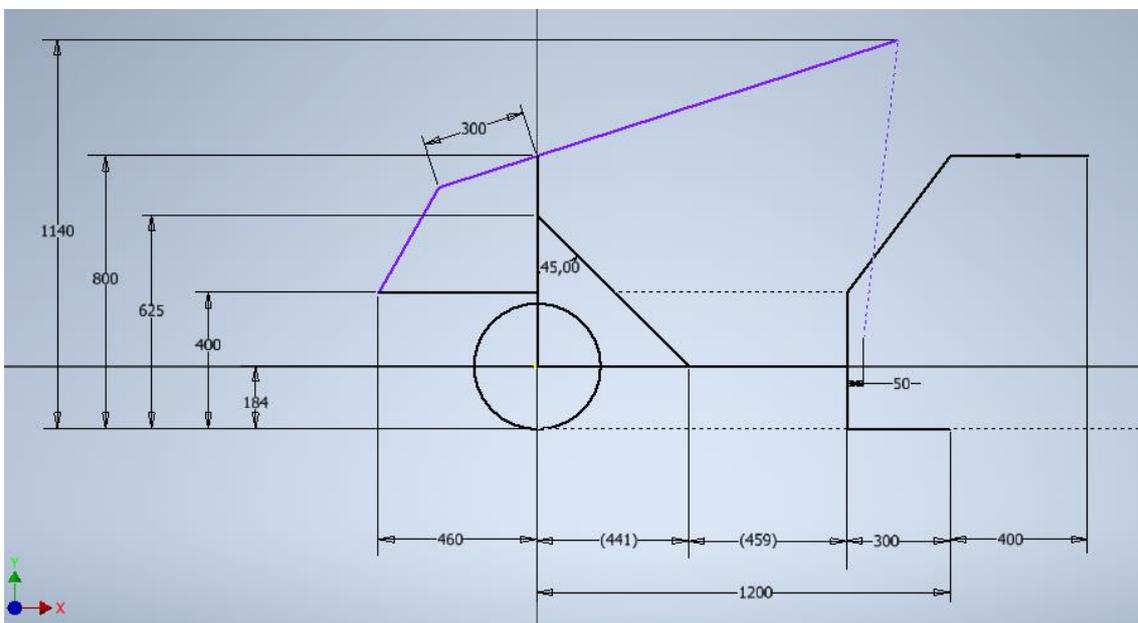


Figura 23. Boceto propuesto para el prototipo

Para tener referencia de medias en los cálculos realizados, se da una variable a cada parámetro para distinguirlo. Siendo así:

3.1.1 Parámetros geométricos de distancias horizontales

La distancia de separación desde el parante base hasta el punto de agarre del tallo se definió $d_1 = 0,46m$ para evitar que el motor de engranaje de carretilla eléctrica se ubique por encima de las raíces.

La distancia $d_2 = 0,3m$ se referencia a partir del análisis del mecanismo, donde se define los desplazamientos verticales máximos de la palanca.

La distancia d_3 es un parámetro desconocido que posteriormente será calculado.

La distancia de separación desde el parante base hasta el punto de unión del soporte del chasis es $d_4 = 0,441 m$, $d_5 = 0,459 m$, $d_6 = 0,3 m$ y $d_7 = 0,4 m$.

3.1.2 Parámetros geométricos de distancias verticales

$$h_1 = 1,14 m$$

$$h_2 = 0,8 m$$

$$h_3 = 0,625 m$$

$$h_4 = 0,4 m$$

$$h_5 = 0,184 m$$

3.2 Parámetros de fuerzas aplicadas

Para determinar las fuerzas se tomó en cuenta las magnitudes referenciales de la Tabla 2, con el propósito de facultar el desarraigado de la planta de yuca. Estos parámetros se muestran en la Figura 24.

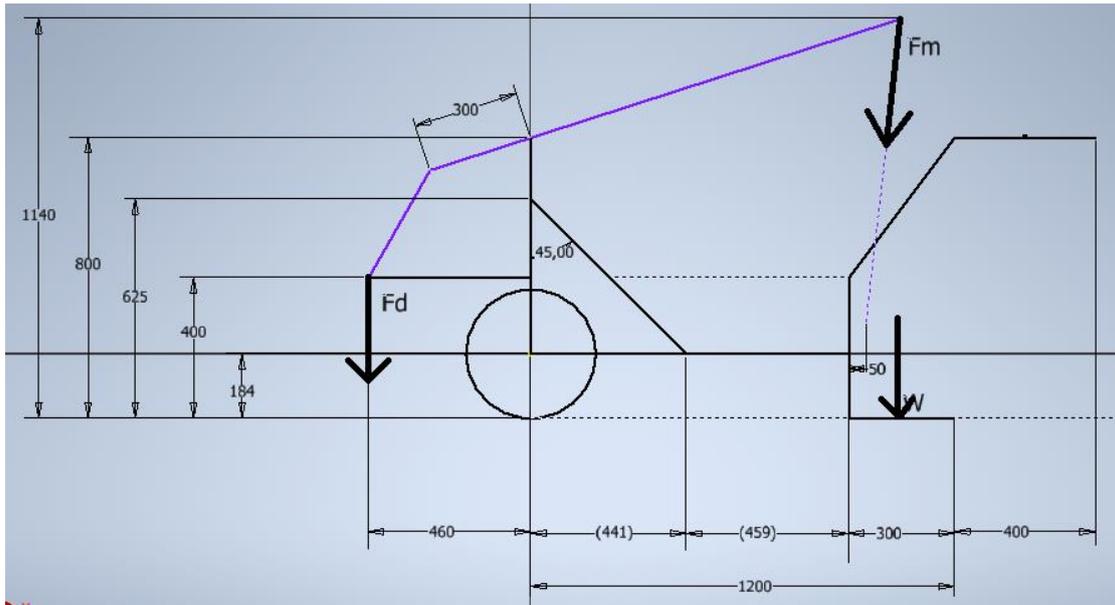


Figura 24. Parámetros establecidos para el prototipo. Medidas en milímetros

La fuerza de desarraigado $F_d = 1.800 \text{ N}$ se la determina a razón de que se asegure el trabajo a realizar.

La fuerza ejercida por el motor F_m es un impulso desconocido que será determinada posteriormente mediante cálculos estáticos.

La fuerza W es un parámetro desconocido que será determinado posteriormente, se refiere al peso mínimo W que debe un operario ejercer sobre el pedal de apoyo para evitar que el prototipo se mueva.

3.3 Análisis estático

Para el análisis estático de la estructura del prototipo se determina las dimensiones faltantes de la misma y posteriormente se analizan los soportes y las partes móviles de la estructura para identificar la fuerza cortante y su momento flector.

3.3.1 Obtención de la longitud del segmento \overline{DE} (d_3)

Para realizar la obtención de la longitud d_3 , se calcula el ángulo θ , para lograr esto se establece una medida previa de la distancia proyectada $d_{3x} = 1 \text{ m}$ La Figura 25 ilustra el dimensionamiento del segmento \overline{DE} .

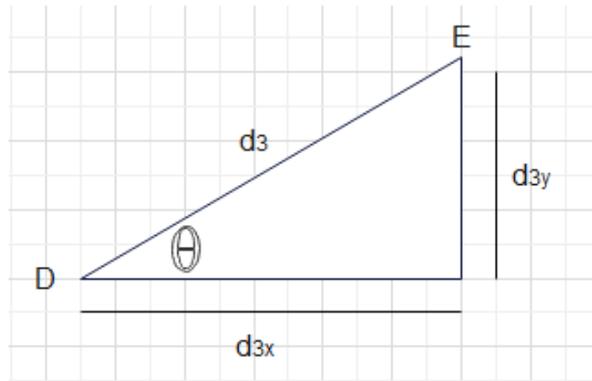


Figura 25. Ángulos de inclinación y distancias proyectadas del segmento \overline{DE}

Si $d_{3x} = 1 \text{ m}$

$$d_{3y} = h_1 - h_2 = 1,14 - 0,8 = 0,34 \text{ m}$$

Entonces el ángulo de inclinación θ es:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_{3y}}{d_{3x}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0,34}{1}\right) = 17,78^\circ$$

La longitud d_3 es:

$$\cos(\theta) = \frac{d_{3x}}{d_3}$$

$$d_3 = \frac{1}{\cos(17,78^\circ)} = 1,06 \text{ m}$$

Para realizar una medida de corte exacta se toma $d_3 = 1,1 \text{ m}$ y se determina nuevamente el ángulo θ .

$$\sin(\theta) = \frac{d_{3y}}{d_3}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{0,34}{1,1}\right)$$

$$\theta = 18^\circ$$

3.3.2 Obtención de la longitud del segmento \overline{AC}

Para realizar la obtención de la longitud \overline{AC} , se calcula el ángulo α , para lograrlo se establecen los valores de las medidas de las distancias proyectadas del segmento \overline{CD} (d_2), así: $d_{2x} = 0,3 \cos(18^\circ)$ y $d_{2y} = 0,3 \sin(18^\circ)$. En la Figura 26 se muestra el dimensionamiento del segmento \overline{AC} .

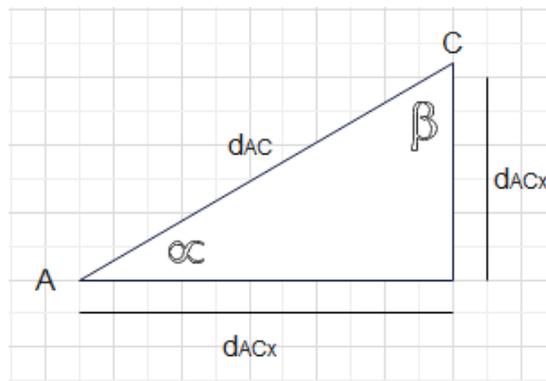


Figura 26. Ángulos de inclinación y distancias proyectadas del segmento \overline{AC}

$$d_{ACx} = d_1 - d_{2x} = 0,46 - 0,3 \cos(18^\circ)$$

$$d_{ACy} = h_2 - h_4 - d_{2y} = 0,8 - 0,4 - 0,3 \sin(18^\circ) = 0,4 - 0,3 \sin(18^\circ)$$

Con los valores obtenidos de d_{ACx} y d_{ACy} , el ángulo de inclinación α es:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{d_{ACy}}{d_{ACx}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,4 - 0,3 \sin(18^\circ)}{0,46 - 0,3 \cos(18^\circ)} \right) = 60,38^\circ$$

Entonces d_{AC} es:

$$\sin(\alpha) = \frac{d_{ACy}}{d_{AC}}$$

$$d_{AC} = \frac{0,4 - 0,3 \sin(18^\circ)}{\sin(60,38^\circ)} = 0,353 \text{ m}$$

$$d_{AC} \approx 353,4 \text{ mm}$$

El ángulo β es:

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 60,38^\circ = 29,62^\circ$$

3.3.3 Cálculo de reacciones en el punto A

Partiendo del diagrama de cuerpo libre de la placa de unión, que se representa en la Figura 27, podemos calcular las fuerzas en el punto A.

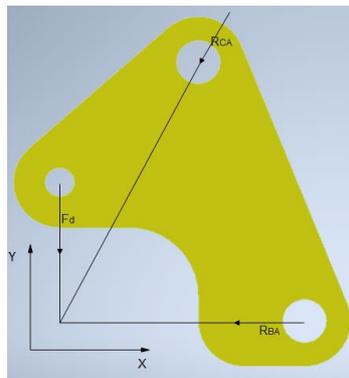


Figura 27. Diagrama de cuerpo libre de la placa de unión

El punto de análisis A, que se representa como un nodo en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 28, es el punto de intersección de las tres fuerzas presentes en la placa de unión.

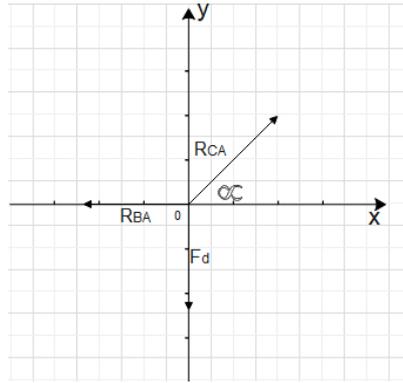


Figura 28. Punto A, diagrama de cuerpo libre (DCL)

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0$$

$$R_{CAy} = F_d$$

$$R_{CAy} = 1.800 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje x se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\rightarrow (+) \sum F_x = 0$$

$$R_{CAx} = R_{BA}$$

3.3.4 Cálculo de reacciones en el segmento \overline{AC}

Tomando como punto de partida el diagrama de cuerpo libre del elemento de unión \overline{AC} de la Figura 29, podemos calcular las reacciones en dicho segmento.

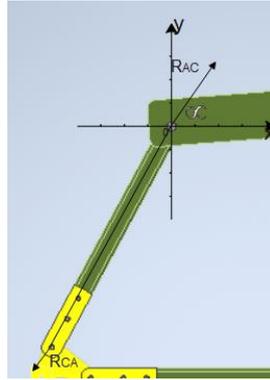


Figura 29. Segmento \overline{AC} , diagrama de cuerpo libre (DCL)

$$R_{CA} = R_{AC}$$

Se determina que la reacción $R_{ACy} = 1.800 \text{ N}$, entonces la reacción R_{AC} es:

$$R_{ACy} = R_{AC} \sin(\alpha)$$

$$1.800 = R_{AC} \sin(60,38^\circ)$$

$$R_{AC} = \frac{1.800}{\sin(60,38^\circ)} = 2.070,6 \text{ N}$$

Por tanto R_{ACx} es:

$$R_{ACx} = R_{AC} \cos(\alpha) = 2.070,6 \cos(60,38) = 1.023,4 \text{ N}$$

3.3.5 Cálculo de la fuerza F_m para realizar el movimiento de palanca principal

Comenzamos con el diagrama de cuerpo libre de la palanca principal \overline{CE} para calcular la fuerza F_m en el segmento \overline{CE} . Esto se ve en la Figura 30.

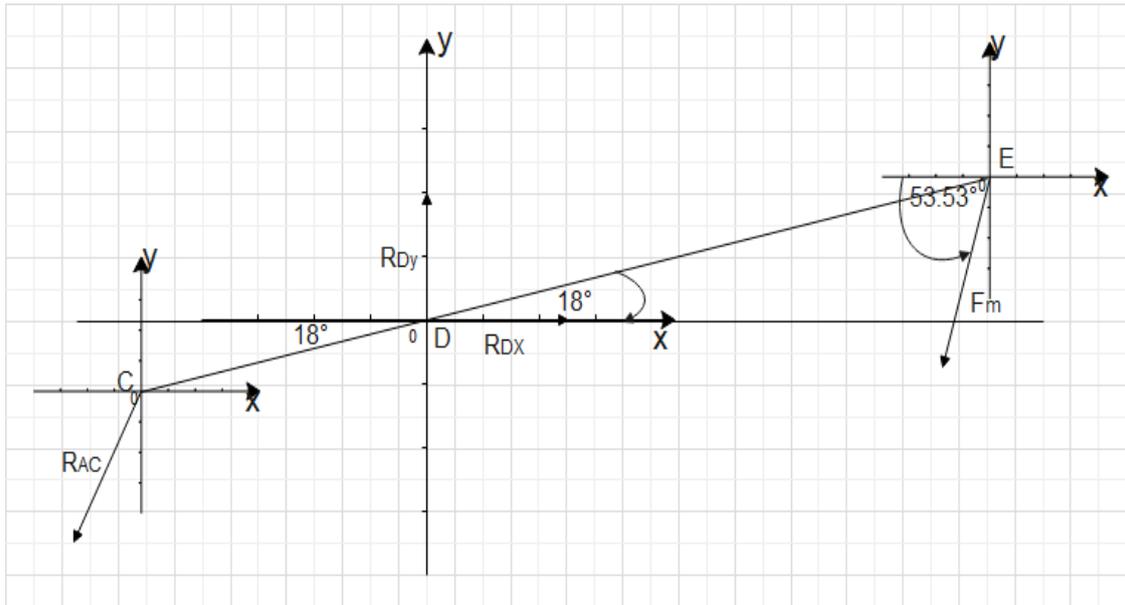


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre del segmento \overline{CE}

Las componentes del segmento \overline{CD} (d_2) están dadas por:

$$d_{2x} = d_2 \cos(18^\circ) = 0,3 \cos(18^\circ)$$

$$d_{2y} = d_2 \sin(18^\circ) = 0,3 \sin(18^\circ)$$

Las componentes del segmento \overline{DE} (d_3) están dadas por:

$$d_{3x} = d_3 \cos(18^\circ) = 1,1 \cos(18^\circ)$$

$$d_{3y} = d_3 \sin(18^\circ) = 1,1 \sin(18^\circ)$$

Las componentes de la fuerza F_m están dadas por:

$$F_{mx} = F_m \cos(83,53^\circ) = F_m \cos(83,53^\circ)$$

$$F_{my} = F_m \sin(83,53^\circ) = F_m \sin(83,53^\circ)$$

Si se conoce los valores de las componentes de la reacción R_{AC} , entonces se tiene:

$$\curvearrowright (+) \sum M_D = 0$$

$$R_{ACy}(d_{2x}) + F_{mx}(d_{3y}) = R_{ACx}(d_{2y}) + F_{my}(d_{3x})$$

$$1.800(0,3 \cos(18^\circ)) + F_m \cos(83,53^\circ) (1,1 \sin(18^\circ)) = 2070,6 \cos(60,38) (0,3 \sin(18^\circ)) + F_m \sin(83,53^\circ) (1,1 \cos(18^\circ))$$

$$F_m = \frac{1.800(0,3 \cos(18^\circ)) - 2.070,6 \cos(60,38) (0,3 \sin(18^\circ))}{\sin(83,53^\circ) (1,1 \cos(18^\circ)) - \cos(83,53^\circ) (1,1 \sin(18^\circ))} = 485,8 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0$$

$$R_{Dy} = R_{ACy} + F_{my} = 1.800 + F_m \sin(83,53^\circ) = 1.800 + 485,8 \sin(83,53^\circ)$$

$$R_{Dy} = 2.282,7 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje x se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\rightarrow (+) \sum F_x = 0$$

$$R_{Dx} = R_{ACx} + F_{mx} = 1.023,4 + F_m \cos(83,53^\circ) = 1.023,4 + 485,8 \cos(83,53^\circ)$$

$$R_{Dx} = 1.078,1 \text{ N}$$

La reacción R_D es:

$$R_D = \sqrt{R_{Dx}^2 + R_{Dy}^2} = \sqrt{1.078,7^2 + 2.282,7^2} = 2.524,7 \text{ N}$$

3.3.6 Cálculo de reacciones en el segmento \overline{AB}

Como se ilustra en la Figura 31, empezamos estudiando el diagrama de cuerpo libre del segmento \overline{AB} para calcular las reacciones en el punto B.



Figura 31. Segmento \overline{AB} , diagrama de cuerpo libre (DCL)

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0$$

$$R_{ACy} = F_d + R_{By}$$

$$R_{AC} \sin(60,38^\circ) = 1.800 + R_{By}$$

$$R_{By} = 2.070,6 \sin(60,38) - 1.800 = 0 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje x se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\rightarrow (+) \sum F_x = 0$$

$$R_{ACx} = R_{Bx}$$

$$R_{AC} \cos(60,38^\circ) = R_{Bx}$$

$$R_{Bx} = 2.070,6 \cos(60,38^\circ) = 1023,4 \text{ N}$$

3.3.7 Cálculo del peso W

Para mantener el equilibrio del modelo, el peso W se transfiere al pedal. Para comprobarlo, se realiza un estudio del diagrama de cuerpo libre, como se ilustra en la Figura 32.

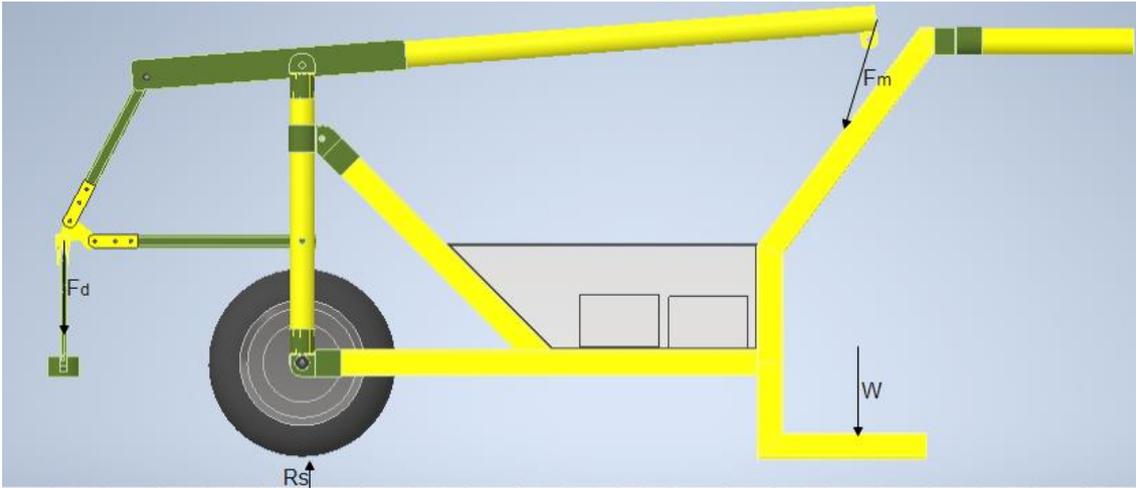


Figura 32. Diagrama de cuerpo libre del prototipo

Realizando sumatorias de momentos en el punto S, se tiene:

$$\sum (+) M_S = 0$$

$$F_d(d_1) + F_{mx}(h_1) = W \left(d_4 + d_5 + \frac{d_6}{2} \right) + F_{my}(d_{3x})$$

$$(1.800)(0,46) + F_{mx}(1,14) = W(0,441 + 0,459 + 0,15) + F_{my}((1,1) \cos(18^\circ))$$

$$W = \frac{(1.800)(0,46) + (485,8) \cos(83,53^\circ)(1,14) - (485,8) \sin(83,53^\circ)(1,1 \cos(18^\circ))}{1,05}$$

$$W = 367,1 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0$$

$$R_S = F_d + F_{my} + W$$

$$R_S = 1.800 + (485,8) \sin(83,53) + 367,1 = 2.649,8 \text{ N}$$

3.3.8 Cálculo de las reacciones del pedal de apoyo

El diagrama de cuerpo libre del segmento \overline{SP} se examina como se ilustra en la Figura 33 para realizar los cálculos de las respuestas en el pedal de apoyo.

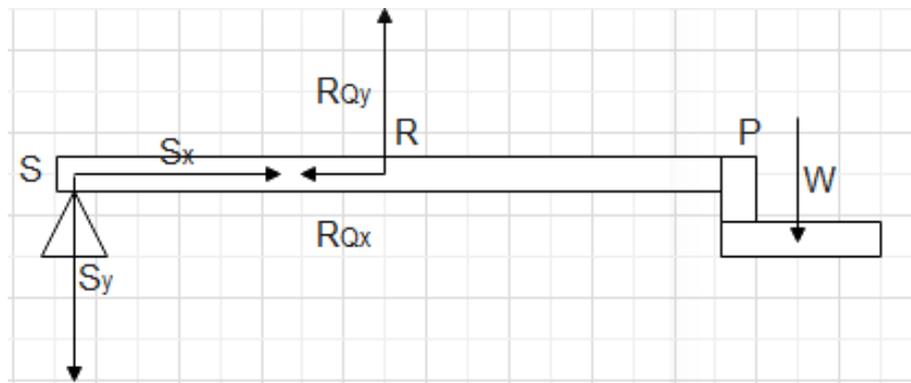


Figura 33. Segmento \overline{SP} , diagrama de cuerpo libre (DCL)

Realizando sumatorias de momentos en el punto S, se tiene:

$$\curvearrowright (+) \sum M_S = 0$$

$$R_{Qy}(d_4) = W \left(d_4 + d_5 + \frac{d_6}{2} \right)$$

$$R_{Qy}(0,441) = (367,1)(0,441 + 0,459 + 0,15)$$

$$R_{Qy} = \frac{(367,1)(1,05)}{0,441} = 874 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\uparrow (+) \sum F_y = 0$$

$$R_{Qy} = S_y + W$$

$$S_y = 874 - 367,1 = 506,9 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje x se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\rightarrow (+) \sum F_x = 0$$

$$S_x = R_{Qx}$$

Al tener un ángulo de inclinación de 45°

$$R_{Qx} = R_{Qy}$$

$$S_x = 874 \text{ N}$$

Entonces las magnitudes de S_R y R_Q son:

$$R_Q = \sqrt{R_{Qx}^2 + R_{Qy}^2} = \sqrt{874^2 + 874^2} = 1.236 \text{ N}$$

$$S_R = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} = \sqrt{874^2 + 506,9^2} = 1.010,4 \text{ N}$$

3.4 Cálculo de soldadura

Para completar el análisis de la soldadura, se tienen en cuenta las fuerzas operativas de todas las fuerzas presentes en la articulación de la palanca principal, como se ilustra en la Tabla 7.

Tabla 7

Fuerzas máximas presentes en las uniones soldadas

Unión	Fuerza [N]
F_m	485,8
R_D	2.524,7
R_{AC}	2.070,6

Se toma el segmento \overline{CE} donde se encuentra una sección de pieza soldada, además de la mayor fuerza aplicada durante todo el proceso de extracción de yuca como se muestra en la Figura 34.

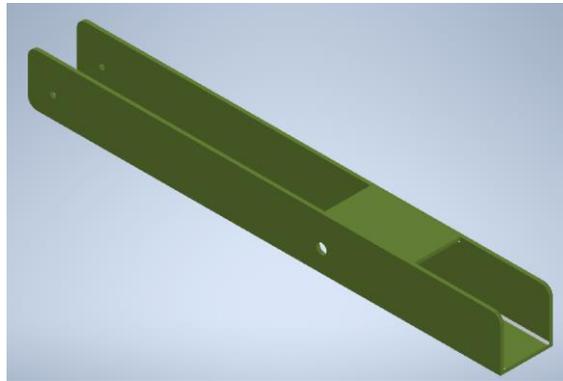


Figura 34. Cabeza de la palanca soldada

El diagrama de cuerpo libre para el segmento \overline{DE} del estudio de la parte soldada para confirmar las fuerzas en la placa se presenta en la Figura 35.

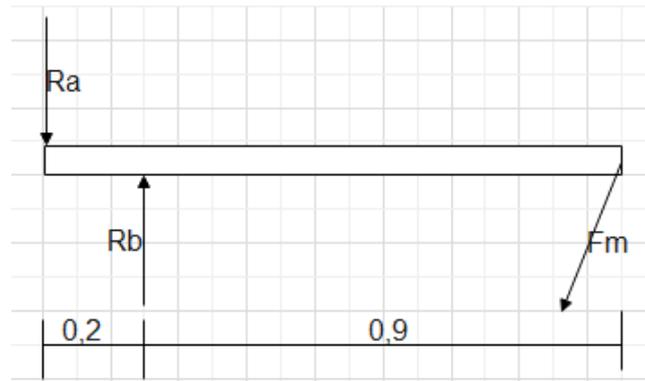


Figura 35. Diagrama de cuerpo libre de la palanca principal con un análisis de respuesta en la placa de apoyo

Los momentos en el punto b pueden sumarse para obtener:

$$\sum (+) M_b = 0$$

$$d_{ab}(R_a) = F_{my}(d_{bfm})$$

$$(0,2)R_a = F_m \sin(83,53^\circ) (0,9)$$

$$R_a = \frac{485,8 \sin(83,53^\circ) (0,9)}{0,2} = 2.172,2 \text{ N}$$

Las fuerzas a lo largo del eje y se suman para obtener los siguientes resultados:

$$\sum (+) F_y = 0$$

$$R_b = R_a + F_{my}$$

$$R_b = 2.172,2 + 485,8 \sin(83,53^\circ) = 2.654,1 \text{ N}$$

Se recomienda una placa de 3,175 mm de espesor según la Tabla 9-6 de la 9ª edición del libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley. Se selecciona una placa de 4 mm de espesor para el mercado ecuatoriano debido a consideraciones prácticas.

En la Figura 36 se muestra cómo actúa la carga sobre el apoyo *b* para determinar las cargas que actúan sobre la garganta de soldadura.

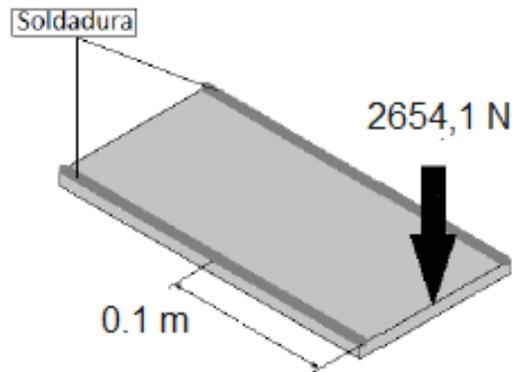


Figura 36. Apoyo inferior de la placa, diagrama de cuerpo libre (DCL)

La carga cortante que actúa en las gargantas de las soldaduras es:

$$V = \frac{1}{2}(R_b) = \frac{1}{2}(2.654,1) = 1.327,1 \text{ N}$$

Como se muestra en la Figura 36, con $r=100 \text{ mm}$, el momento de torsión producido al colocar la mitad del peso en cada garganta es el siguiente:

$$M = V(r) = 1.327,1(0,1) = 1.32,71 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se comprueba que la fuerza existente en la cabeza de la palanca es la mayor aplicada, por tanto, se realiza el análisis de soldadura con el valor de 1.327,1 N.

El perfil de la garganta de soldadura de cada lado se muestra en la Figura 37

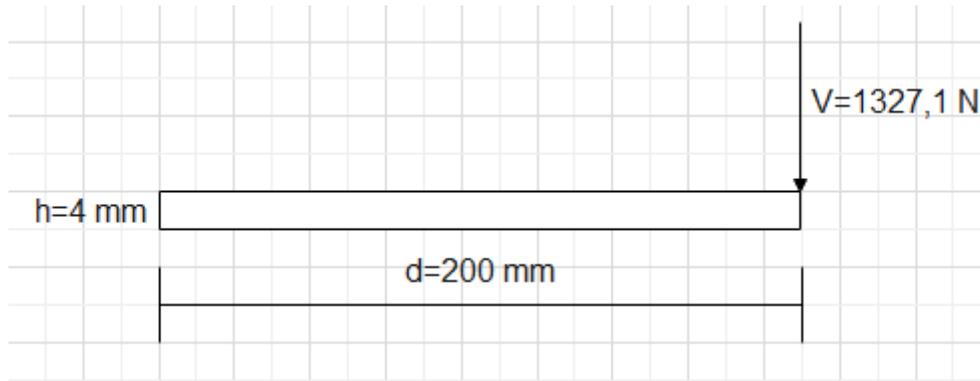


Figura 37. Perfil lateral de garganta de la soldadura

El libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley, 9ª edición, sección 9-3 proporciona la siguiente información:

$$\tau' = \frac{V}{A}$$

$$\tau'' = \frac{Mr}{J}$$

$$J = 0,707hJ_u$$

El libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley, 9ª edición, sección 9-1 proporciona la siguiente información:

$$J_u = \frac{d^3}{12}$$

$$A = 0,707hd$$

Los esfuerzos τ' y τ'' de la soldadura son:

$$\tau' = \frac{1.327,1}{0,707hd} = \frac{1.327,1}{0,707(4 \times 10^{-3})(0,2)} = 2,35 \text{ MPa}$$

$$\tau'' = \frac{132,71(0,1)}{0,707hJ_u} = \frac{132,71(0,1)}{0,707(4 \times 10^{-3}) \left(\frac{d^3}{12}\right)} = \frac{132,71(0,1)}{0,707(4 \times 10^{-3}) \left(\frac{0,2^3}{12}\right)}$$

$$\tau'' = 7,04 \text{ MPa}$$

$$\tau = \sqrt{(\tau')^2 + (\tau'')^2} = \sqrt{(2,35)^2 + (7,04)^2} = 7,42 \text{ MPa}$$

De acuerdo con la Tabla 9-4 de diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9ª edición, el esfuerzo cortante permitido en el cuello es $\tau_{perm} = 0,3S_u$, por lo que se utiliza un electrodo E60 para realizar el análisis comparativo. Como resultado:

$$\tau_{perm} = 0,3(413) = 123,9 \text{ MPa}$$

Se compara los resultados obtenidos donde:

$$\tau_{perm} > \tau$$

$$123,9 \text{ MPa} > 7,42 \text{ MPa}$$

Comprobando que el proceso de soldadura con electrodo E60 y $h = 4 \text{ mm}$ cumple y está dentro del esfuerzo permisible τ_{perm} .

3.5 Análisis del mecanismo

Después de determinar todas las reacciones y fuerzas existentes en el modelo, se realiza un análisis del desplazamiento del mecanismo para verificar la cantidad de movimiento que realiza al momento de la des compactación y desarraigado de la planta de yuca como se muestra en las Figura 38 y Figura 39.

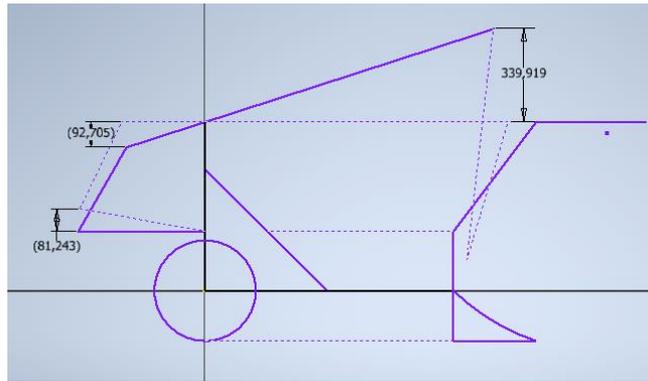


Figura 38. Palanca principal en posición horizontal

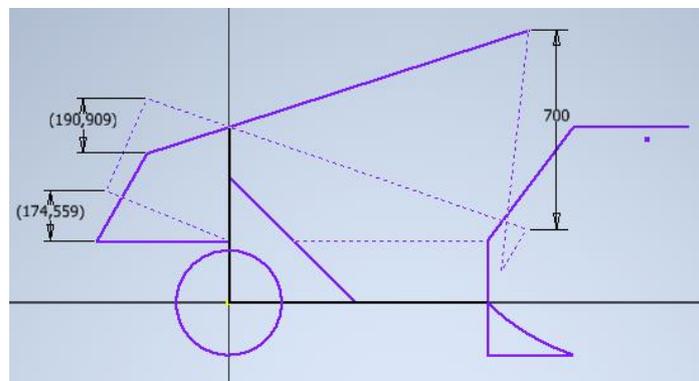


Figura 39. Movimiento de la palanca principal hasta la conclusión de la extracción

Se observa que el modelo cumple con los requerimientos de des compactación y desarraigado de la planta de yuca.

3.6. Selección de materiales, tubos, pasadores, pernos y rodamientos

Al elegir los materiales, factores de seguridad y dimensiones de cada pieza, teniendo en cuenta los indicadores antropométricos de una mujer ecuatoriana promedio, se buscó mantener al operador en posición erguida durante todo el proceso de trabajo. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1.

3.6.1 Selección de material para el segmento \overline{CD}

Mediante simulación de cargas en MDSolids se obtiene un momento flector $M_{max} = 434,43 \text{ N.m}$, como se muestra en la Figura 42.

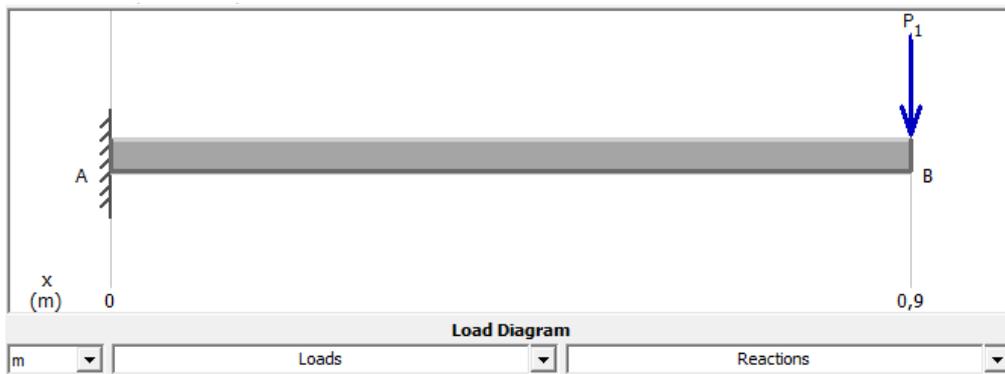


Figura 40. Diagrama de carga de segmento \overline{CD} , simulación de una viga empotrada

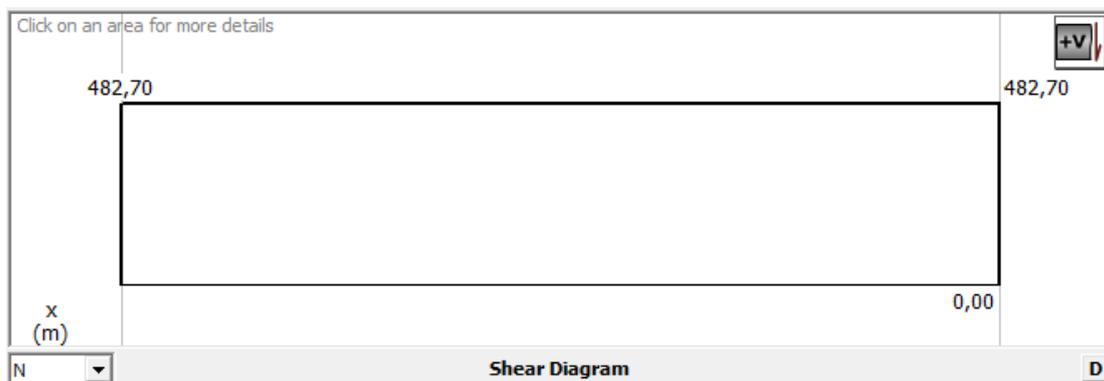


Figura 41. Diagrama fuerzas cortantes del segmento \overline{CD}

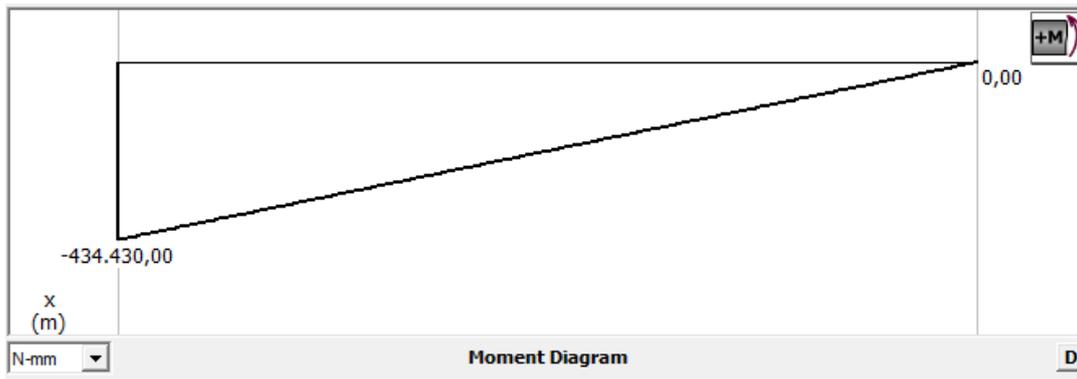


Figura 42. Diagrama de momentos del segmento \overline{CD}

A partir de este resultado obtenido se realiza la selección de un tubo redondo estructural ASTM A500 Gr. A, con diámetro exterior de 2" (50,8 mm) que cumple con la norma y lista de comprobación de herramientas manuales, además de un espesor de 4 mm del catálogo de ImportAceros, verifique la Figura 43.

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas			
Diámetro Exterior	Espesor			Flexión			
		Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro			
D	e	A	P	I	W	i	
pulg.	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
		1,40	2,17	1,71	6,63	2,61	1,75
		1,50	2,32	1,82	7,06	2,78	1,74
		1,80	2,77	2,18	8,33	3,28	1,73
2	50,80	2,00	3,07	2,41	9,14	3,60	1,73
		3,00	4,51	3,54	12,92	5,09	1,69
		4,00	5,88	4,62	16,22	6,39	1,66

Figura 43. Catálogo de tubo redondo [31]

Las características mecánicas de los tubos estructurales de sección circular de grado A se detallan en la Tabla 8 de la norma ecuatoriana NTE_INEN_2415.

Tabla 8

Tubo de grado A según las características mecánicas ASTM A500/A500M

Grado	Descripción	Límite de fluencia mínima (MPA)	Resistencia a la tracción mínima (MPA)	Elongación mínima en 50mm ^A (%)
A	Tubos estructurales sección circular	230	310	25 ^B

De la fórmula para determinar la sección circular de un tubo redondo se obtiene:

$$S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{\pi(0,0508^4 - (D - e)^4)}{32(0,0508)} = \frac{\pi(0,0508^4 - (0,0508 - 0,008)^4)}{32(0,0508)}$$

$$S = \frac{\pi(0,0508^4 - (0,0428)^4)}{32(0,0508)} = 6,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

De la ecuación 6-12 del libro de mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, 8.^a edición, se obtiene:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S} = \frac{434,43}{6,4 \times 10^{-6}} = 67,9 \text{ Mpa}$$

De la ecuación 1-8 del libro de mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, 8.^a edición el factor de seguridad F_s es:

$$F_s = \frac{F_{falla}}{F_{permisible}} = \frac{0,6S_y}{\sigma_{max}} = \frac{0,6(230)}{67,9} = 2,03$$

Los valores analíticos obtenidos fueron satisfactorios y el material se probó con el software Inventor 2022 como se muestra en la Figura 44.

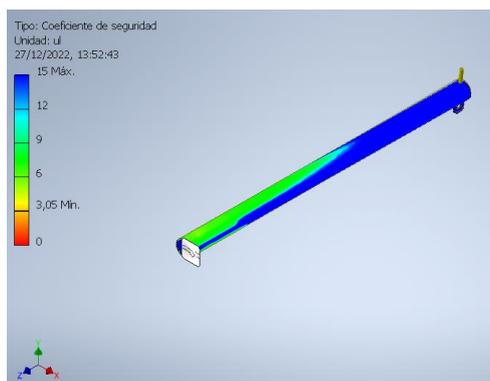


Figura 44. Simulación Factor de Seguridad segmento \overline{CD}

Se observa que en simulación mediante elementos finitos se obtiene un factor de seguridad superior al de diseño.

3.6.2 Selección de material para los segmentos \overline{AC} y \overline{AB}

De los datos obtenidos en los cálculos se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Fuerzas presentes en los segmentos \overline{AC} y \overline{AB} .

Segmento	Fuerza [N]
AC	2.070,6
AB	1.023,4

Se elige la fuerza del segmento \overline{AC} para realizar la selección de ambos segmentos, por tanto, se elige un tubo cuadrado estructural y grandes dimensiones ASTM A500 Gr. A, con longitud exterior de 25 mm (0,025 m) del catálogo de ImportAceros, en la Figura 45 se muestra dicha selección.

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
				Eje x-x = y-y		
				Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
B	e	A	P	I	W	r
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
	1,40	1,27	1,00	1,16	0,93	0,95
25	1,50	1,25	1,06	1,22	0,97	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	1,11	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	1,19	0,93
	1,40	1,55	1,22	2,08	1,39	1,16

Figura 45. Catálogo de tubo cuadrado [31]

En la octava edición de Mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, la ecuación 1-6 establece:

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{2.070,6}{270 \times 10^6} = 7,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A \approx 7,7 \text{ mm}^2$$

Al realizar un corte transversal en el tubo cuadrado se obtiene los parámetros que se muestran en la Figura 46, entonces la longitud b es:

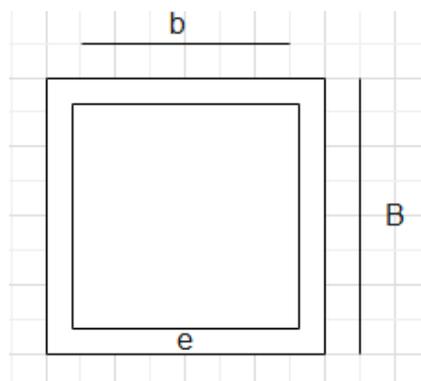


Figura 46. Sección transversal del tubo cuadrado

$$A = B^2 - b^2$$

$$b = \sqrt{B^2 - A} = \sqrt{25^2 - 7,7} = 24,8 \text{ mm}$$

Entonces el espesor mínimo e es:

$$e = \frac{B - b}{2} = \frac{25 - 24,8}{2} = 0,1 \text{ mm}$$

Se elige el espesor de 2 mm para asegurar el diseño, además de que el tubo cuadrado del espesor elegido es el producto comercial más vendido.

3.6.3 Selección de pasadores

De los datos obtenidos, la Tabla 10 muestran las fuerzas actuantes.

Tabla 10

Fuerzas presentes en pasadores.

Punto de pasador	Fuerza [N]
A	2.070,6
B	1.023,4
D	2.524,7

Se toma la fuerza del punto D para realizar la selección de los pasadores, por tanto, se elige una varilla redonda lisa ASTM A36, del catálogo de ImportAceros que se muestra en la Figura 47.

Varilla Redonda Lisa				
Denominación	Diámetro		Peso	Área
	D	kg / m	kg / 6m	cm ²
VRL 5,5	5,5	0,34	2,04	0,43
VRL 8	8,0	0,50	2,96	0,63
VRL 10	10,0	0,62	3,70	0,79
VRL 12	12,0	0,89	5,33	1,13
VRL 15	15,0	1,39	8,32	1,77
VRL 18	18,0	2,00	11,98	2,55
VRL 22	22,0	2,98	17,90	3,80
VRL 24,5	24,0	3,70	22,20	4,71

Figura 47. Catálogo de varilla redonda lisa [31]

De la ecuación 1-7 del libro de mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, 8.^a edición, se tiene:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Por ser un cortante doble se tiene que:

$$\tau = \frac{F}{2A} = \frac{F}{2\left(\pi\frac{D^2}{4}\right)} = \frac{2(F)}{(\pi)D^2}$$

Entonces el diámetro mínimo D es:

$$D = \sqrt{\frac{2(2.524,7)}{\pi(250 \times 10^6)}} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D \approx 2.5 \text{ mm}$$

Para garantizar que soporta un peso superior a la carga requerida, se utilizó un taco de 12 mm x 70 mm.

3.6.4 Selección de pernos

De los datos obtenidos, las fuerzas actuantes se muestran en la Tabla 10.

Se toma la fuerza del punto A para realizar la selección de los pernos, por tanto, se elige perno hexagonal Gr. 2 galvanizado ASTM A307, del catálogo de Imporpernos.

Los tornillos hexagonales clasificados como de grado 2 por ASTM A307 tienen las características mecánicas indicadas en la Tabla 11.

Tabla 11

Propiedades mecánicas de pernos hexagonales ASTM A307 Grado A [32].

Grado	Resistencia a la tracción mínima (MPA)	Resistencia de prueba (MPA)	Limite elástico mínimo (MPA)	Elongación mínima (%)
A	413	250	---	18

De la ecuación 1-7 del libro de mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, 8.^a edición, se tiene:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Por ser un cortante doble se tiene que:

$$\tau = \frac{F}{2A} = \frac{F}{2\left(\pi\frac{D^2}{4}\right)} = \frac{2(F)}{(\pi)D^2}$$

$$D = \sqrt{\frac{2(2.070,6)}{\pi(250 \times 10^6)}} = 2,3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D \approx 2,33 \text{ mm}$$

El uso en la Figura 48 de un pasador de 6,35 mm (1/4") x 76,2 mm (3") garantiza que soportará más peso del necesario.



Figura 48. Catálogo pernos hexagonales grado 2 [32]

3.6.5 Selección del material para el segmento \overline{SRP}

Mediante simulación de cargas en MDSolids se obtiene un momento flector $M_{max} = 196,57 \text{ N.m}$, como se muestra en la Figura 51.

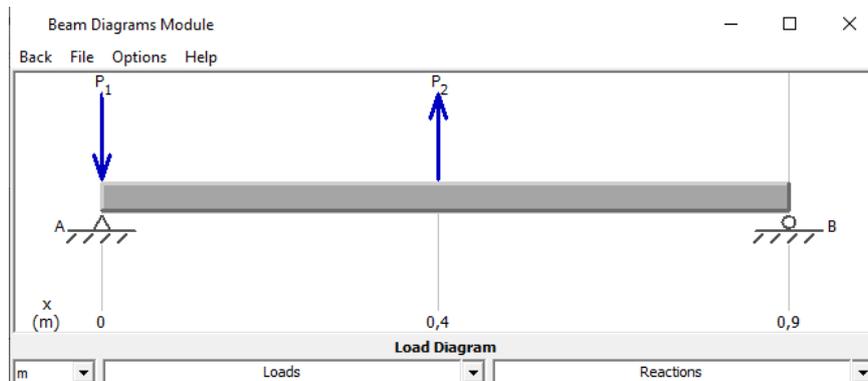


Figura 49. Diagrama de carga de segmento \overline{SRP} , simulación de una viga empotrada

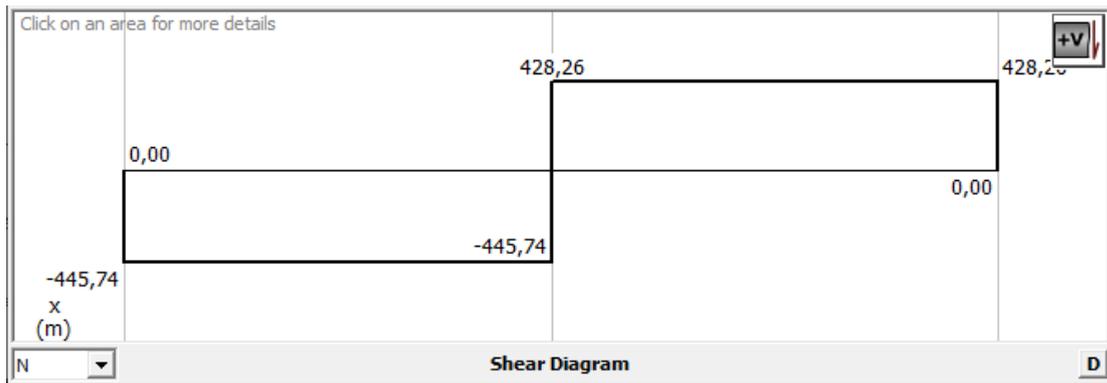


Figura 50. Diagrama fuerzas cortantes del segmento \overline{SRP}

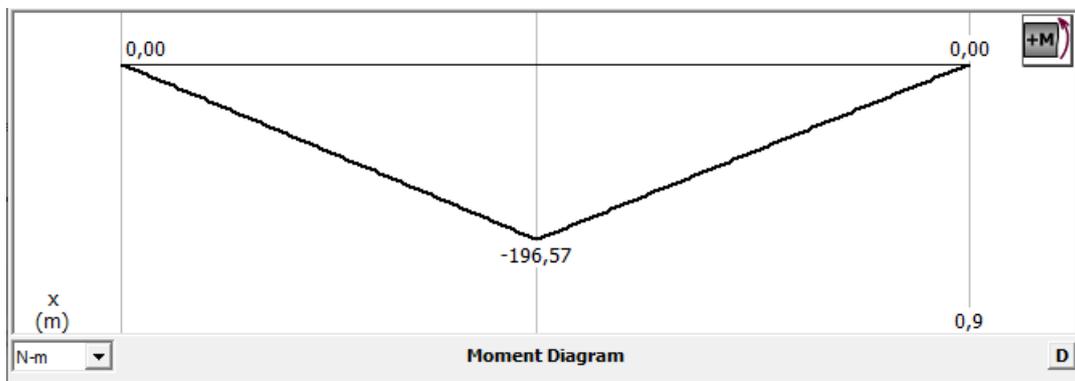


Figura 51. Diagrama de momentos del segmento \overline{SRP}

A partir de este resultado obtenido se realiza la selección de un tubo rectangular estructural y grandes dimensiones ASTM A500 Gr. A, con longitud $B = 25 \text{ mm}$ ($0,025 \text{ m}$) y $H = 50 \text{ mm}$ ($0,05 \text{ m}$) del catálogo de ImportAceros, como se logra apreciar en la Figura 52.

Tubería Estructural Rectangular										
Designaciones			Área	Peso	Propiedades Estáticas					
					Eje x - x			Eje y - y		
B	H	e	A	P	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
mm	mm	mm	cm²	kg/m	cm⁴	cm³	cm	cm⁴	cm³	cm
		1,40	1,97	1,55	6,28	2,51	1,79	2,13	1,71	1,04
		1,50	2,10	1,65	6,66	2,66	1,78	2,26	1,80	1,04
		1,80	2,49	1,95	7,72	3,09	1,76	2,60	2,08	1,02
25	50	2,00	2,74	2,15	8,39	3,36	1,75	2,82	2,25	1,01
		2,50	3,34	2,62	9,90	3,96	1,72	3,29	2,64	0,99
		3,00	3,91	3,07	11,20	4,48	1,69	3,70	2,96	0,97

Figura 52. Catálogo de tubo rectangular [31]

Según la norma ecuatoriana NTE_INEN_2415 los tubos estructurales de sección circular de grado A tienen las propiedades mecánicas como se indica en la Tabla 3.

De la ecuación 6-12 del libro de mecánica de materiales de Russell C. Hibbeler, 8.^a edición, se tiene que:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I}$$

$$c = \frac{B}{2} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ mm}$$

$$c = 0,0125 \text{ m}$$

Entonces la I_x es:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I}$$

$$I = \frac{196,57(0,0125)}{270 \times 10^6} = 9,1 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$I_x = 9,1 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Por tanto, el espesor mínimo e es:

$$I_x = \frac{HB^3 - (H - 2e)(B - 2e)^3}{12}$$

Resolviendo la ecuación obtenida mediante Matlab se tiene que el espesor mínimo e es:

$$e = 0,53 \text{ mm}$$

Para asegurar una carga mayor a la estimada se elige un espesor $e = 1,5 \text{ mm}$

3.6.6 Selección de material para el segmento \overline{DQBS}

De los cálculos obtenidos, se muestra en la Tabla 12 las fuerzas actuantes.

Tabla 12

Reacciones presentes en el segmento \overline{DQBS} .

Reacción	Fuerza [N]
R_D	2.524,7
R_Q	1.236,0
R_B	1.023,4
S_R	1.010,4

En la Figura 53 se muestra la selección de un tubo redondo estructural ASTM A500 Gr.

A, con diámetro exterior de 1 1/4" (31,8 mm) y espesor de 2 mm

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
Diámetro Exterior	Espesor			Flexión		
D	e	A	P	I	W	i
pulg.	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
	1,40	1,33	1,05	1,54	0,97	1,07
	1,50	1,43	1,12	1,63	1,03	1,07
1 1/4	31,80	1,69	1,33	1,91	1,20	1,06
	2,00	1,87	1,47	2,08	1,31	1,05

Figura 53. Catálogo de tubo redondo [31]

El software Inventor 2022 se utiliza para simular la elección a realizar, como se ve en la Figura 54.

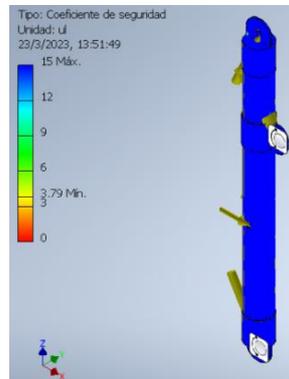


Figura 54. Simulación Factor de Seguridad segmento \overline{DQBS}

3.6.7 Selección de la pinza de sujeción

Según el modelo propuesto por [23], en la Figura 55 se muestra la pinza de sujeción que se acopla perfectamente al diseño del prototipo cosechador de yuca, por tanto, se decide hacer uso del diseño, modelo, pernos y pasadores propuestos.



Figura 55. Pinza de agarre [23]

3.7.1 Conexión del actuador

EL actuador utilizado se menciona en la Tabla 14.

Tabla 14

Conexión y tipo de señal de lectura del actuador

Descripción	Tipo de señal	Pin de Arduino	Señal detectada
Motor a pasos NEMA 17	Salida digital	D3, D4, D5, D6, D7	Pulsos

El actuador es controlado por el microcontrolador que se encarga de recibir las señales que el operario le indica. Las señales que envía el microcontrolador al actuador son:

- Reducir o aumentar la velocidad de giro
- Inicializar el movimiento
- Cambiar el sentido de giro

Para conocer si están funcionando los pulsadores del circuito se implementan dos indicadores LED para verificar.

3.7.2 Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento

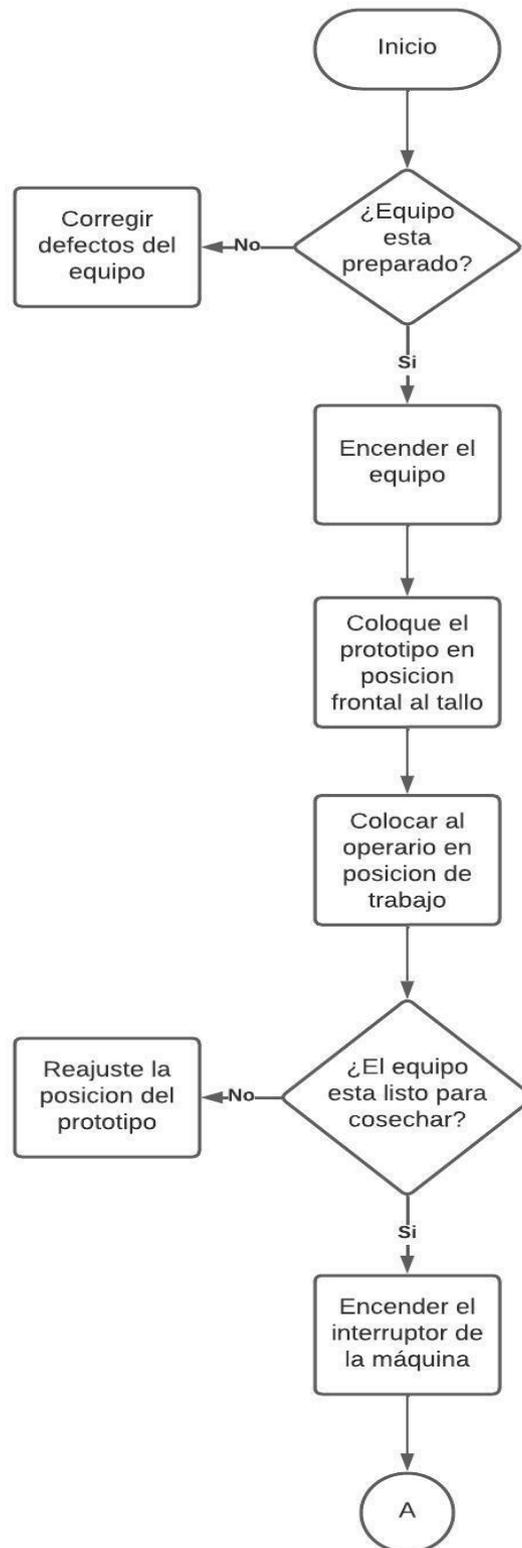


Figura 57. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 1)

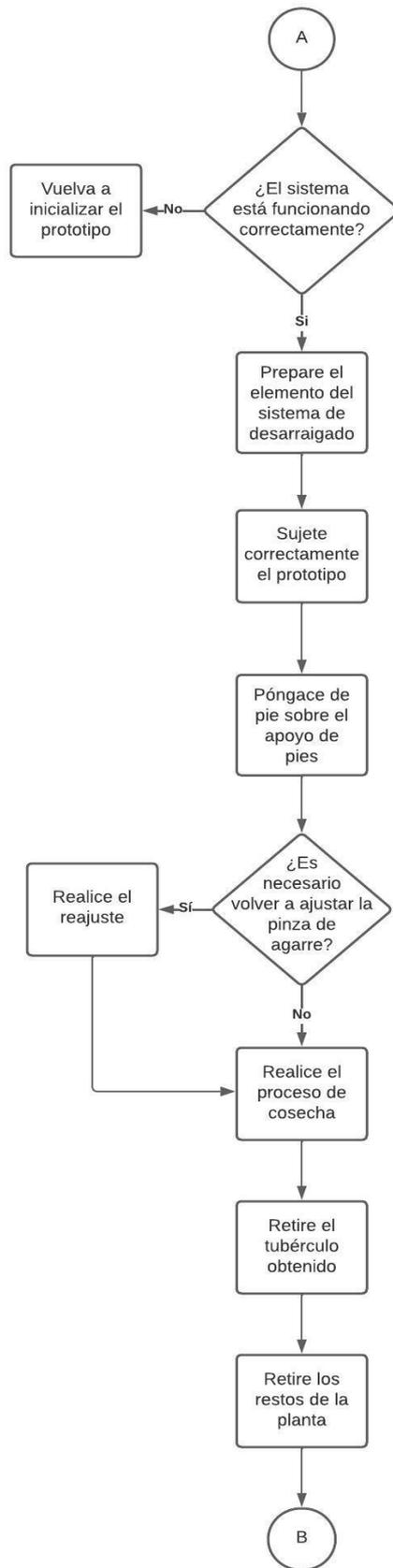


Figura 58. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 2)



Figura 59. Diagrama de flujo del funcionamiento (Parte 3)

A continuación, se indica cómo debe realizar el operario el procedimiento de recolección, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de funcionamiento en la Figura 57.

Antes de iniciar el proceso de recolección, el operario debe encender el equipo y asegurarse de que todos los pulsadores, variadores de tensión y partes mecánicas funcionan correctamente. Una vez realizada la inspección anterior, se puede iniciar el proceso de recolección. Es importante saber utilizar correctamente la máquina para evitar errores y, lo que es más importante, accidentes. El operario encargado debe comprobar siempre que la máquina está en buen estado y con la palanca principal montada. El operador debe dejar la máquina en el mismo estado inicial al concluir el procedimiento de cosecha, teniendo en cuenta que la palanca principal debe estar en la posición inicial.

3.7.3 Diagrama de flujo del sistema eléctrico

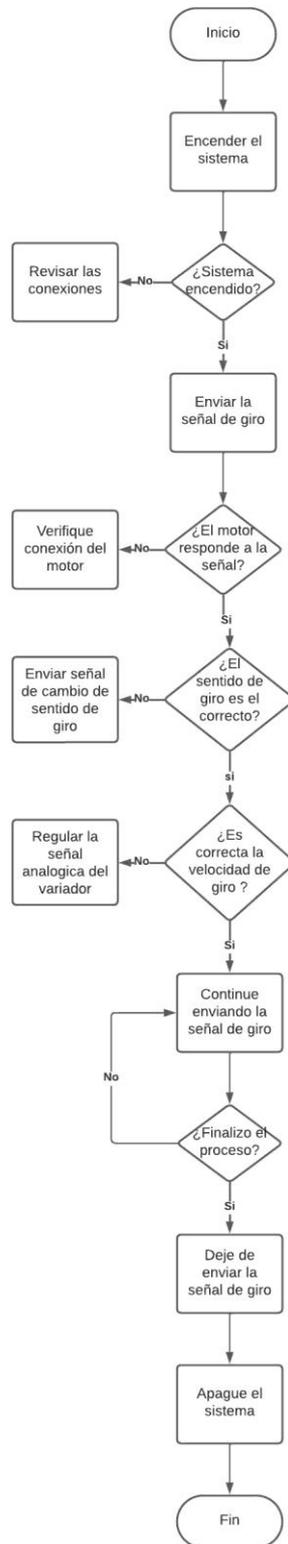


Figura 60. Diagrama de flujo del diseño electrónico

A continuación, se indica cómo se intercambia la comunicación entre el microcontrolador y las acciones que el operario desea realizar, tal y como se muestra en el diagrama de flujo del diseño electrónico en la Figura 60.

Al recibir las señales dadas por el operador, el microcontrolador se encarga de enviar las señales necesarias para que el motor nema 17 se mueva. Cuando el operador pulsa el botón azul, el microcontrolador recibe una señal que le ordena girar el motor paso a paso en una dirección. Si la dirección es incorrecta, el operador puede enviar una señal ordenándole que modifique la rotación pulsando el botón rojo. Para que el microcontrolador sepa si el motor debe girar a mayor o menor velocidad si el sentido es correcto, el operador debe modificar la velocidad de giro enviándole una señal analógica.

3.7.4 Diagrama de flujo del motor a pasos

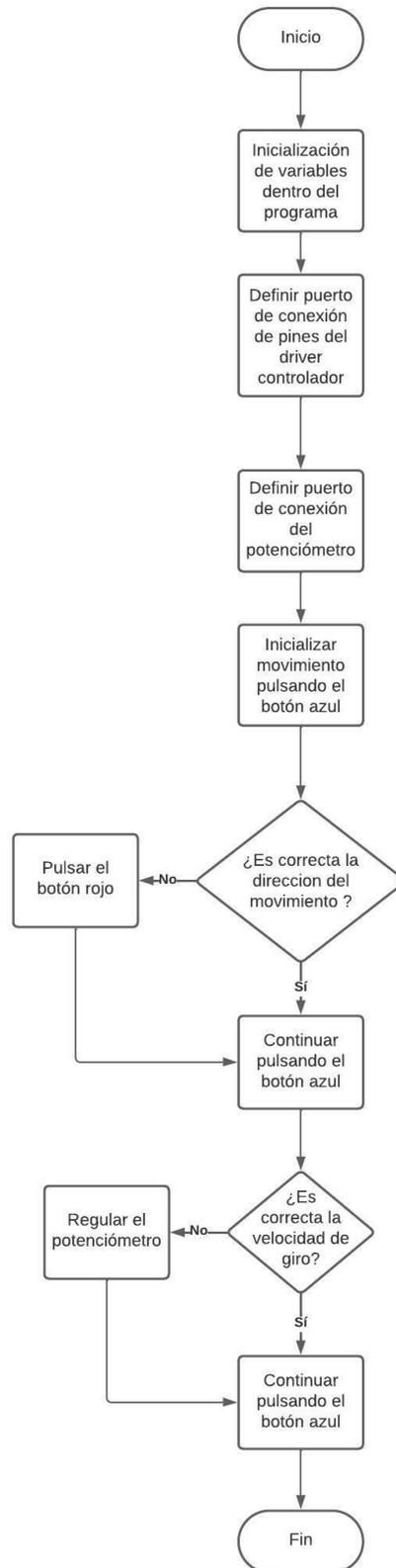


Figura 61. Diagrama de flujo del motor a pasos

A continuación, se indica cómo se procesa las señales en el microcontrolador, tal y como se muestra en el diagrama de flujo del diseño electrónico en la Figura 61.

Cuando se recibe una señal de giro por el puerto digital D5 se envían señales de respuesta a través de los pines digitales D3, D4 y D7 correspondientes a los pines STEP, DIR y ENABLE del controlador del motor nema 17, respectivamente; estos son los encargados de controlar el motor paso a paso. El microcontrolador comienza con la inicialización de las variables donde cada una de ellas va cambiando en el tiempo según las señales enviadas por las entradas del sistema (pulsadores o variador de tensión). El pulsador rojo que se encarga de transmitir una señal de cambio de rotación al microcontrolador para su análisis y posterior actualización está representado por el puerto digital D6. El variador de tensión es el encargado de comunicarse con el controlador del driver y cambiar la velocidad de giro entregando una señal analógica al microcontrolador, específicamente al puerto A0.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

El propósito de este capítulo es obtener el prototipo de máquina cosechadora de yuca, cumpliendo con los requerimientos dimensionales y funcionales que fueron descritos en el capítulo anterior.

4.1 Manufactura y ensamble

El proceso de manufactura se realiza mediante el uso de diferentes métodos, como el serrado, corte por haz de luz, soldadura por el proceso SMAW, entre otros.

Como puede verse en la sección ANEXOS, los materiales y accesorios elegidos se corresponden con los diseños de cada componente que conforma el prototipo.

4.2 Secuencia para la construcción del prototipo

Tabla 15

Secuencia de construcción del prototipo.

Secuencia de construcción	
Proceso	Tareas
O	Tubo redondo estructural ASTM A500 Gr. A, con diámetro
P	exterior de 2" y 4 mm de espesor
E	Tubo cuadrado estructural y grandes dimensiones ASTM
R	A500 Gr. A, 25 mm y 2 mm de espesor
A	Obtención de materia prima
C	Tubo redondo estructural ASTM A500 Gr. A, con diámetro
I	exterior de 1 7/8" y 2 mm de espesor
O	Tubo rectangular estructural y grandes dimensiones ASTM
N	A500 Gr. A, 25 x 50 mm y 1.5 mm de espesor
E	Segmento \overline{DE}
S	Segmento \overline{AC}
D	Serrado
E	Segmento \overline{AB}
P	Segmento \overline{DE}
	Segmento \overline{DQBS}
	Estructura de apoyo

R		Placa de unión segmentos \overline{CD} y \overline{DE}
O	Corte por haz	Placa de unión segmentos \overline{AC} y AB
C	láser (LBC)	Base de fijación al suelo
E		Estructura de apoyo
D	Soldadura	Placas de unión de los segmentos
I	(SMAW)	Junturas de la estructura de apoyo
M		
I	Recubrimiento	Recubrimiento superficial anticorrosivo
E		
N		Sistema de palanca – Tubo redondo – Tubo cuadrado
T	Ensamble	Soporte principal – Tubo redondo
O	mecánico	Soporte de rodamientos – Neumático eléctrico
		Estructura de apoyo – Tubo rectangular
	Ensamble eléctrico	Teclé eléctrico
		Neumático eléctrico

4.3 Adquisición de materia prima

El prototipo de recolección se construyó utilizando perfiles normalizados con dimensiones que se obtuvieron mediante análisis. Se emplearon perfiles redondos, cuadrados y rectangulares ASTM A500 Gr. en la construcción, como se ve en la Figura 62.



Figura 62. Adquisición de materiales metálicos

4.4 Proceso de serrado

Como se ilustra en la Figura 63, el corte se realiza con una sierra circular (aserrado) en los componentes metálicos que componen la estructura del prototipo. Los aceros

estructurales ASTM A500 son especialmente resistentes a los cortes, por lo que esta técnica se realiza para obtener mejores resultados y, ahorrar tiempo.



Figura 63. Proceso de serrado del material adquirido

4.5 Corte por haz de láser (LBC)

Se utiliza un rayo láser para cortar las placas metálicas que sirven para unir las distintas conexiones que componen la parte móvil del prototipo. Se utilizan placas ASTM A36 de 4 y 6 milímetros de espesor; la Figura 64 muestra el procedimiento de corte.



Figura 64. Proceso de corte por haz de laser de la placa de unión de la garra superior

4.6 Proceso de soldadura SMAW

Para la estructura de soporte se utiliza la soldadura SMAW; la unión permanente de los perfiles que componen la estructura debe ser completamente rígida.

Dado que los perfiles empleados están compuestos de material ASTM A500, el conocido método SMAW, presente en todos los talleres metalúrgicos, es suficiente para crear la unión que se ve en la Figura 65.



Figura 65. Proceso de suelda SMAW del perfil metálico

4.7 Proceso de recubrimiento

Todas las piezas que componen la estructura deben estar completamente protegidas de la intemperie, ya que la humedad acelera la oxidación del metal.

Para aumentar la vida útil de la estructura, se requiere un acabado de pintura de esmalte sólido; el procedimiento se ve en la Figura 66.



Figura 66. Proceso de recubrimiento anticorrosivo

4.8 Ensamble mecánico

El prototipo se compone de perfiles de acero estructural fabricados conforme a la norma ASTM A500, chapas de acero fabricadas conforme a la norma ASTM A36, componentes eléctricos neumáticos y un teclado electrónico con su correspondiente cuadro de control y fuente de alimentación.

La mayoría de los elementos de fijación utilizados en el montaje son pernos y soldaduras, mientras que los pasadores o los anillos de bloqueo también se incluyen en las piezas. Parte del ensamble se indica en la Figura 67.



Figura 67. Ensamble mecánico de las piezas metálicas y accesorios

4.9 Ensamble eléctrico

El neumático eléctrico y el teclado constituyen el conjunto eléctrico. A excepción del bloque de la batería, que se colocará en el exterior, los componentes eléctricos del conjunto están cubiertos para evitar el contacto con la suciedad y la humedad. En la Figura 68, se representa el procedimiento de construcción.



Figura 68. Ensamble eléctrico y electrónico

4.10 Implementación del sistema de control

El sistema de control del movimiento de la palanca se hace utilizando el microcontrolador Arduino Nano y las piezas que se indican en el capítulo 3. Mira en la sección de anexos donde dice que programación se realiza.

4.11 Implementación y funcionamiento

El resultado representado en la Figura 69 es lo que queda tras la implementación y el montaje mecánico, eléctrico y de control.



Figura 69. Integración de todas las partes del prototipo

Donde se observa que el prototipo consta de dos partes importantes:

- Sistema de movimiento del prototipo
- Sistema de movimiento de la palanca

Elementos como el neumático eléctrico, el variador de velocidad, el bloque de baterías, el interruptor de encendido y su correspondiente controlador se integran como parte del sistema de movimiento. Su función es encender el neumático eléctrico mediante la llave de contacto correspondiente, tras lo cual se puede ajustar el voltaje que entra en el neumático para permitir que el prototipo se mueva. Es importante tener en cuenta que mover el prototipo cuesta arriba o en espacios de difícil acceso es una ayuda para el operario y la principal función de este sistema.

El sistema de movimiento de palanca se compone de un microcontrolador Arduino NANO, cable de acero, motor nema 17, botones de movimiento y cambio de dirección, y un variador de tensión. El motor se puede mover pulsando el botón azul, y el botón rojo cambia el sentido de giro. El variador de tensión se puede utilizar para variar la velocidad de rotación, y el tecla se combina con el motor nema 17 para apretar el sistema de palanca y elaborar la cosecha de yuca.

CAPÍTULO 5

PRUEBA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo incluye las pruebas y los resultados obtenidos para garantizar que el prototipo funciona bien y cumpla las especificaciones del diseño. El análisis económico permite conocer la rentabilidad del proyecto.

5.1 Prueba 1

Los resultados de la prueba inicial figuran en la Tabla 16.

Tabla 16

Resultados obtenidos prueba 1

Prueba 1				
Peso total de yucas arrancadas por planta [kg]	Peso de yucas partidas [kg]	Tiempo de montaje [s]	Tiempo de extracción [s]	Tiempo total [s]
5,2	0	90	42	132
4,1	0,9	87	31	118
5,6	0	77	47	124
3,3	0,52	75	23	98

Tras la realización de estas pruebas, se extraen las siguientes conclusiones:

- El mecanismo diseñado es adecuado.
- Ninguna parte del prototipo interfiere con el proceso de cosecha.
- La altura de extracción permite realizar el proceso de cosecha.
- El operario no presenta ninguna molestia durante el proceso de cosecha.
- La cantidad de yuca partida es del 7,8 %.
- El tiempo de montaje es elevado.

5.2 Prueba 2

En la Tabla 17 se indican los resultados que se obtuvieron después de realizar la segunda prueba.

Tabla 17
Resultados obtenidos prueba 2

Prueba 2				
Peso total de yucas arrancadas por planta [kg]	Peso de yucas partidas [kg]	Tiempo de montaje [s]	Tiempo de extracción [s]	Tiempo total [s]
3,4	0	70	24	94
3,7	0,27	64	27	91
4,2	0,55	62	37	99
5,1	0	56	41	97
5	0	56	40	96
4,3	0,7	50	33	83

Tras la realización de estas pruebas, se extraen las siguientes conclusiones:

- El mecanismo diseñado es adecuado.
- El tiempo de extracción se mantiene variando según el peso del tubérculo.
- El operario mejora el tiempo de montaje
- La cantidad de yuca partida es del 5,9 %.

5.3 Prueba 3

En la Tabla 18 se indican los resultados que se obtuvieron después de realizar la segunda prueba.

Tabla 18

Resultados obtenidos prueba 3.

Prueba 3				
Peso total de yucas arrancadas por planta [kg]	Peso de yucas partidas [kg]	Tiempo de montaje [s]	Tiempo de extracción [s]	Tiempo total [s]
5,4	0	32	44	76
4,7	0,22	28	37	65
4,2	0,87	30	35	65
3,5	0	25	25	50
3,6	0	35	26	61
4,4	0,5	20	33	53

Tras la realización de estas pruebas, se extraen las siguientes conclusiones:

- El mecanismo diseñado es adecuado.
- El tiempo de extracción se mantiene variando según el peso del tubérculo.
- El operario mejora el tiempo de montaje
- La cantidad de yuca partida es del 5,9 %.

5.4 Información económica

El análisis de costes se realiza para evaluar la viabilidad del proyecto. El flujo de caja, que es una métrica especializada para estimar el VAN (Valor Actual Neto) y la TIR (Tasa Interna de Rentabilidad), que son indicadores financieros, se determina en función de muchos criterios.

5.4.1 Inversión

En la Tabla 19 se detalla el activo analizado necesario para realizar la operación del proyecto.

Tabla 19

Costo de inversión del proyecto

Costos de insumos de inversión	
Descripción	Valor [USD]
Herramientas	102,5
Total [USD]	102,5

5.4.2 Depreciación

La depreciación de la inversión es un factor muy importante que se debe conocer, debido a que los insumos tienden a tener un valor de venta menor con el paso del tiempo, como se muestra en la Tabla 20, los valores de depreciación anual son tomados como referencia al marco legal propuesto por el SRI (Servicio de rentas internas)

Tabla 20

Depreciación de activos fijos con el paso del tiempo

Depreciación			
Descripción	Depreciación anual [%]	Valor del bien [USD]	Depreciación anual [USD]
Herramientas	10	102,5	10,25
Total [USD]		932,5	10,25

5.4.3 Costos fijos

El valor de pago de los costos fijos se muestra en la Tabla 21

Tabla 21

Costos fijos

Costos fijos del proyecto de inversión	
Descripción	Valor anual [USD]
Servicios Básicos	180
Depreciación	10,25
Total [USD]	190,25

5.4.4 Costos variables

Se examinan los precios de los materiales estructurales utilizados para fabricar el prototipo, y los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22

Costos de la materia prima para la construcción del prototipo

Costos de materiales					
N°	Descripción	Cantidad [metros]	Valor unitario [USD/LB]	Masa [Kg]	Valor Total [USD]
1	Tubo redondo estructural ASTM A500 Gr. A, con diámetro exterior de 2" y espesor 4 mm	1,1		3,4	4,8
2	Tubo cuadrado estructural y grandes dimensiones ASTM A500 Gr. A, 25 mm y espesor 2 mm	0,73	0,65	1	0,65
3	Tubo redondo estructural ASTM A500 Gr. A, con diámetro exterior de 1 7/8" y espesor 2 mm	1,1		1,4	2
4	Tubo rectangular estructural y grandes dimensiones ASTM A500 Gr. A, 25 mm x 50 mm y espesor 1.5 mm	5,9		9,5	13,6
Total [USD]					21,05

Los costos de los insumos mecánicos se presentan en la Tabla 23, donde se observa los costos.

Tabla 23

Materiales mecánicos

Costos de insumos mecánicos			
Descripción	Cantidad [Unidades]	Valor unitario [USD]	Valor Total [USD]
Tecla grúa manual	1	35	35
Pernos 1/4" x 1 1/2"	9	0,25	2,25

Tuercas	9	0,25	2,25
Eje 12 mm	2	1	2
Total [USD]			41,5

A continuación, los precios de los componentes eléctricos figuran en la Tabla 24 y la lista de componentes del kit en la Tabla 25.

Tabla 24

Materiales eléctricos y electrónicos

Costos de insumos eléctricos			
Descripción	Cantidad [Unidades]	Valor unitario [USD]	Valor Total [USD]
Kit de componentes par moto eléctrica	1	354	330
Arduino Nano	1	10	10
Cableado	1	5	5
Nema 17	1	24	24
Total [USD]			369

Tabla 25

Lista de componentes del kit de moto eléctrica

Kit de insumos de moto eléctrica			
Descripción	Cantidad [Unidades]	Valor unitario [USD]	Valor Total [USD]
Controlador de 2000w 60v 30a			
Interruptor de tres velocidades			
Batería portátil 60v	1	354	354
Llanta eléctrica de 2000w			
Cableado eléctrico			
Acelerador de mano derecha			
Total [USD]			354

A continuación, en la Tabla 26 se consideran los elementos que se debe utilizar para conseguir la construcción del prototipo.

Tabla 26

Mano de obra directa para la construcción del prototipo

Producción del prototipo			
Descripción	Cantidad [Unidades]	Valor unitario [USD]	Valor Total [USD]
Puntos de suelda	70	0,25	17,5
Cortes con maquina Tronzadora	22	0,22	4,84
Perforaciones	28	0,20	5,6
Pintura esmalte	1	10	10
		Total [USD]	37,94

En cuanto a los costes laborales indirectos, véase la Tabla 27.

Tabla 27

Mano de Obra indirecta

Producción de prototipo			
Descripción	Cantidad [Unidades]	Valor unitario [USD]	Valor Total [USD]
Lijas	1	1	1
Electrodos	35	0,15	5,1
Disco de corte	1	1,10	1,10
Disco de pulir	1	1	1
Corte laser	1	5	5
		Total [USD]	13,5

Al realizar el análisis de todos los gastos obtenidos se muestra en la Tabla 28 un resumen de los gastos para la elaboración del proyecto.

Tabla 28

Resumen de costos variables totales

Resumen de costos variables		
Nº	Descripción	Valor total [USD]
1	Costos de materiales	21,05
2	Costos mecánicos	41,5
3	Costos eléctricos	369
4	Mantenimiento y transporte	70
5	Mano de obra indirecta	37,94
6	Mano de obra directa	13,5
	Costo Total [USD]	552,99

Mediante el análisis del flujo de caja que se muestra a continuación en la Tabla 29 se determina el índice financiero VAN y TIR.

Para determinar algunos valores de la caja de flujo se aplican ciertos criterios aplicados por las normativas ecuatorianas.

- Crecimiento de ventas: 2% (Dato obtenido de la proyección de crecimiento económico ecuatoriano para el año 2023 proporcionado por el CEPAL)
- Inflación aplicada: 4% (Dato obtenido de la inflación acumulada hasta mayo del año 2023 proporcionado por el INEC)}
- Tasa de descuento VAN (10%): Dato obtenido por el sistema financiero ecuatoriano donde se sugiere un 7% pero al ser un proyecto de emprendimiento se da un 3% más por el costo de oportunidad.

5.4.5 Análisis para determinar el TIR y el VAN

Tabla 29
Flujo de caja

Vida útil del proyecto									
Cosechadora de yuca para pequeños agricultores									
Ingresos	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Numero de prototipos vendidos [Unidades]		6	6	6	6	6	7	7	7
Precio de venta [USD]		577	588,54	600,31	612,32	624,56	637,05	649,80	662,79
Valor Total [USD]		3462	3601,86	3747,38	3898,77	4056,28	4220,16	4390,65	4568,04
Egresos									
Costos de operación (Costos fijos)									
Servicios básicos [USD]		180	187,20	194,69	202,48	210,57	219,00	227,76	236,87
Depreciación [USD]		10,25	10,66	11,09	11,53	11,99	12,47	12,97	13,49
Costos de producción (Costos variables) [USD]		3317,94	3450,66	3519,67	3590,06	3661,87	3735,10	3809,80	3886,00
Total, costos de operación [USD]		3508,19	3648,52	3725,45	3804,07	3884,43	3966,57	4050,53	4136,36
Inversión (Activos Fijos)									
Herramientas [USD]		102,5							
Total, egresos [USD]	102,5	3508,19	3648,52	3725,45	3804,07	3884,43	3966,57	4050,53	4136,36
Saldo efectivo [USD]	-102,50	-46,19	-46,65	21,93	94,70	171,85	253,59	340,12	431,68
Saldo efectivo acumulado [USD]	-102,50	-148,69	-195,34	-173,41	-78,70	93,15	346,74	686,86	1118,54

Posterior a realizar el flujo de caja mediante fórmulas financieras que posee el entorno de Excel se logran determinar los valores para el VAN y el TIR.

Tabla 30

Valores de VAN y TIR

Valores de VAN y TIR	
VAN [USD]	476,26
TIR [%]	40%

- Utilizando el flujo de caja para calcular los valores de saldo de efectivo acumulado, es posible determinar que el proyecto de inversión es rentable para el quinto año.
- Se obtiene una rentabilidad del 40% en el proyecto al realizar el análisis del TIR, lo que nos da un indicador muy bueno y superior al 25%, mientras que se requiere obtener un porcentaje de rentabilidad del 20% para ser aceptable y del 25% para ser óptimo.
- Tener un valor actual neto (VAN) positivo de USD 476,26 nos permite predecir la viabilidad del proyecto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Luego de la construcción y verificación del prototipo de desarraigo de la planta de yuca, se pueden extraer las conclusiones:

- Para encontrar las especificaciones tecnológicas necesarias para desarrollar el prototipo de cosechadora de mandioca, se realizó un estudio bibliográfico. La revisión encuentra que el acero estructural ASTM A500 y ASTM A36 proporcionan la mejor estructura. El prototipo pesa 40 kg, y como se trata de un dispositivo tipo carretilla que se atiene a la física de las palancas de segundo grado, donde se requiere muy poco esfuerzo para trasladarlo.
- El diseño de palanca para realizar el proceso de cosecha es diseñado con el propósito de lograr una fuerza de extracción de hasta 1,8 kN. El cálculo y las simulaciones mediante software comprueban que el diseño obtenido es óptimo para realizar el proceso de desarraigado, evitando golpes y problemas de control del prototipo.
- Durante las pruebas de campo el dimensionamiento establecido para el prototipo cumplió satisfactoriamente con las pruebas establecidas logrando obtener porcentajes menores al 10% de pérdidas. Además, se conoce que operario del prototipo debe realizar un número de 10 repeticiones para obtener una comprensión total del funcionamiento de la máquina.

Recomendaciones

A pesar de que el prototipo cumple satisfactoriamente su función se recomienda implementar un sistema con motor reductor que permita al prototipo operar sin la necesidad de usar la palanca.

Para maximizar el funcionamiento del prototipo, se aconseja diseñar un sistema de control que permita a la máquina atravesar el campo de siembra y determinar el mejor lugar para la recolección.

El sistema de alimentación del prototipo requiere de un largo tiempo de duración para cumplir con la cosecha del tubérculo de yuca lo que genera que en grandes campos de cultivo no le permite cumplir con el periodo de trabajo, por tanto, se recomienda optimizar el suministro de energía.

Se recomienda hacer uso de materiales más ligeros que cumplan con las funciones del prototipo, pero que mejoren el rendimiento de las baterías.

REFERENCIAS

- [1] F. Hinostroza, M. Mendoza, M. Navarrete, y X. Muñoz, «Cultivo de Yuca en el Ecuador», 2014. Accedido: 16 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5214/1/INIAPEEPbd436.pdf>
- [2] J. Silva, «Cultivo de Yuca_Paso a Paso, Siembra y Manejo Agronómico», noviembre de 2019. <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/el-cultivo-de-la-yuca/> (accedido 16 de diciembre de 2022).
- [3] «Manual del Sector de la Energía - Quema de Combustibles», 2019. Accedido: 6 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/7-bis-handbook-on-energy-sector-fuel-combustion.pdf>
- [4] E. Aguilar *et al.*, *Manual del cultivo de Yuca*. 2017. Accedido: 18 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10918.pdf>
- [5] J. Del Prado, «Lesiones por Sobreesfuerzo Muscular», 2019. <https://blogs.informacion.com/blog/prevencion-riesgos-laborales/sin-categoria/lesiones-sobreesfuerzo-muscular/> (accedido 16 de diciembre de 2022).
- [6] «Costos de Producción de Yuca», 2014. Accedido: 6 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologia.iniap.gob.ec/images/rubros/contenido/yuca/10costos.pdf>
- [7] A. Ortiz, «Uso Correcto de una Carretilla», 2018. Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://profesores.dcb.unam.mx/users/arnulfoog/Archivos/publicaciones/El%20uso%20correcto%20de%20una%20carretilla.pdf>
- [8] M. Posicionado, «Las Ventajas de las Carretillas», 15 de enero de 2021. <https://www.clark.com.ar/blog/las-ventajas-de-las-carretillas/#:~:text=Las%20carretillas%20son%20las%20que> (accedido 30 de mayo de 2022).
- [9] Bernardo. Ospina y Hernán. Ceballos, «Tecnologías Modernas para Producción de yuca», 2015. Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.fundacionpromotoradelcanaldeldique.org/Portals/0/Documentos/Tecnologias%20modernas%20para%20produccion%20de%20yuca.pdf>
- [10] I. Agro, «El Cultivo de la Yuca», enero de 2019. <https://www.infoagro.com/hortalizas/yuca.htm#:~:text=La%20recolecci%C3%B3n%20puede%20ser%20manual> (accedido 18 de abril de 2022).
- [11] L. Suárez y V. Mederos, «Apuntes Sobre el cultivo de la Yuca (Manihot esculenta Crantz). Tendencias Actuales», 2011. Accedido: 28 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v32n3/ctr04311.pdf>
- [12] M. Viteri, «Plan de Negocios para la Exportacion de Yuca congelada a Helsinki-Finlandia». Accedido: 28 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/8398/1/57843_1.pdf

- [13] Asociación Española de Esofagitis Eosinofílica, «La Yuca y sus Propiedades Nutritivas», 28 de abril de 2017. <https://aedeseo.es/aedeseo/wp-content/uploads/2016/11/17-04-28-yuca.pdf> (accedido 13 de enero de 2023).
- [14] A. Pérez, «Características Generales y Usos de la Yuca (Manihot Esculenta)», 2018. Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/43066/K%2065260%20P%c3%a9rez%20S%c3%a1nchez%20Nelvis%20Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] B. Ospina y H. Ceballos, «La Yuca en el Tercer Milenio - Sistemas Modernos de Producción, Procesamiento, Utilización y Comercialización», 2002, Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/54117>
- [16] A. Segreda *et al.*, «Cultivo de Yuca Manihot esculenta Crantz», 2016.
- [17] «Cosecha y Poscosecha de Yuca», 2014, Accedido: 30 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://tecnologia.iniap.gob.ec/images/rubros/contenido/yuca/9cosecha.pdf>
- [18] F. Pavón, Chavarría Eusebio, y K. Nicaragua, «Guia MIP del cultivo de la Yuca», 2004. Accedido: 6 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENH10N583.pdf>
- [19] «Guía Técnica para Producción y Análisis de Almidón de Yuca».
- [20] SD Agricultural Products Equipment, «Cosechadoras de Yuca Industrialea», 19 de enero de 2021. <https://www.maquinadeyuca.com/producci%C3%B3n-tecnol%C3%B3gica/310.html> (accedido 6 de junio de 2022).
- [21] E. Chinchillana, «Estudio del Proceso de Trabajo y Operaciones, Perfil de riesgo y Ecigencias Laborales en el Cultivo y Empaque de la Yuca», 2004. Accedido: 18 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.cso.go.cr/documentos_relevantes/tecnicos/series/10_serie%20tecnica%20No.%2010.pdf
- [22] J. Rodríguez, Y. Contreras, S. Rodríguez, y M. Herrera, «Apero para la Cosecha Semimecanizada de Raíces Reservantes, Tubérculos y Rizomas», Santa Clara, oct. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/299508316>
- [23] H. Gómez y M. Osorio, «Diseño y Construcción de un Prototipo Mecánico para Desarraigar una Planta de Yuca», 2016. Accedido: 4 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/673/Proyecto-prototipo%20desarraigador%20de%20yuca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] R. Briceno y G. Larson, «Investigacion y Desarrollo de una Cosechadora de Yuca (Manihot esculenta Crantz)», 1972.

- [25] A. Canahualpa, «MECANISMOS Y MÁQUINAS INDUSTRIALES DE CONTROL». Accedido: 14 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://alfredoch66.files.wordpress.com/2013/04/palancas.pdf>
- [26] Facultad de Ingeniería Industrial, «Antropometría».
- [27] A. Lamingo y L. Loor, «INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE CARGA», 2018.
- [28] I. A. (Ibrahim A. Kapandji y M. Torres Lacomba, *Fisiología articular*. Médica Panamericana, 2012.
- [29] S. Antuña y J. Clavería, «Biomecánica del Codo y sus Implicaciones en el Diseño de Recambios Articulares», 2005.
- [30] «Norma NTE INEN 2415-2», 2016. Accedido: 18 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://escuelaing.s3.amazonaws.com/staging/documents/2956_antropometria.pdf
- [31] ImportAceros, *Catalogo ImportAceros*. 2022.
- [32] ImportPernos, «Norma ASTM A307 (Pernos y Varillas Roscadas)», 2022. <https://www.imporpernos.com/blog/norma-astm-a307> (accedido 18 de enero de 2023).