



Diseño de un prototipo mecánico de recolección y traslado de batata [Ipomoea batatas L.] para facilitar labores de cosecha a pequeños productores

**Rubén Darío Blanco Miranda
Julio César Galvis Forero**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Barranquilla, Colombia
2020

Diseño de un prototipo mecánico de recolección y traslado de batata [Ipomoea batatas L.] para facilitar labores de cosecha a pequeños productores

**Rubén Darío Blanco Miranda
Julio César Galvis Forero**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

PhD, Wilman Antonio Orozco Lozano

Línea de Investigación:

Diseño mecánico

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Barranquilla, Colombia

2020

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis hijos Laura y Dilan Galvis, quienes son las personitas que vienen detrás de mí y de las cuales soy ejemplo.

A mi padre Jesús Galvis, que Dios lo tenga en su santa gloria quien sé que estaría orgulloso, mi madre hermosa que siempre ha estado ahí incondicionalmente.

A mi esposa Luz quien a mi lado también estudia para ser una profesional excelente y ejemplo para nosotros.

A mis maestros con los cuales compartimos cinco años de una experiencia enriquecedora.

A todos los amigos que me apoyaron para no desistir a pesar de los problemas.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Julio Galvis

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mis dos hijas, que son el motor que impulsa mi vida, que día a día me levanto con el objetivo de sacarlas adelante. Quiero que siempre me vean y me recuerden como ese gran padre ejemplar que ha conseguido hacer realidad los sueños con esfuerzo y sacrificio.

A mi esposa Yaneth, mi gran amor, mi apoyo fiel e incondicional, que siempre ha estado presente en los momentos felices y gozosos, pero más aún en las situaciones difíciles y dolorosas de mi vida.

A mi Madre, que, a pesar de no estar presente en vida, mi mente no deja de recordar su sonrisa, sus esfuerzos y todo el trabajo que hacía para sacarnos adelante a mis hermanos y a mí. Estoy totalmente seguro, de que allá en el cielo, su alma se va a llenar de orgullo al saber que su quinto hijo se va a graduar como Ingeniero.

*A estas cuatro mujeres, las Amo con el corazón.
Gracias.*

Rubén Blanco

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer al director de esta tesis de grado profesor Wilman Orozco Lozano, quien con sus conocimientos y apoyo nos guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. También queremos agradecer a Universidad Antonio Nariño por brindarnos todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiésemos podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, queremos agradecer a todos nuestros compañeros y a nuestras familias por apoyarnos en todo momento. En especial, a nuestro padre celestial, que siempre estuvo ahí para darnos la sabiduría y las energías par no decaer.

Muchas gracias a todos.

Resumen

El proyecto de grado presentado en este documento tiene como fin principal diseñar un prototipo mecánico de recolección y traslado de batatas para facilitar las labores de cosecha a los pequeños productores. Para ello, se aplicaron las consideraciones de diseño propuestas por la metodología DFMA (Diseño para la manufactura y el montaje) y herramientas tecnológicas, en este caso particular, el software SolidWorks. Dicho software se utilizó para crear el modelo tridimensional del prototipo, realizar pruebas dinámicas y estáticas de esfuerzos, deformaciones y coeficientes de seguridad permisibles, apoyados en los cálculos teóricos asociados a los respectivos métodos de diseño.

Para la selección de los componentes del prototipo, se compararon ciertas alternativas, las cuales se evaluaron técnico-económicamente bajo los criterios seleccionados por el equipo de trabajo, teniendo en cuenta, las consideraciones de diseño.

Los planos para la fabricación del prototipo, así como el instructivo para su ensamble son los resultados tangibles logrados con este proyecto, de forma que estos puedan ser aprovechados a corto plazo e incluso, sea posible realizar mejoras sobre él.

En conclusión, el proyecto cumple con los objetivos descritos y fomenta la creación de iniciativas para la resolución de problemas relacionados con los campesinos y agricultores de Colombia, que se encuentran olvidados por el Gobierno Nacional, permitiéndoles mejorar sus labores de cosecha mediante la tecnificación de las labores de recolección y, además, pensar en la exportación de los productos del campo.

Palabras clave: Cosecha, diseño, Ipomoea batatas L., prototipo.

Abstract

The main purpose of the degree project presented in this document is to design a mechanical prototype for harvesting and transporting sweet potatoes to facilitate harvesting tasks for small producers. For this, the design considerations proposed by the DFMA methodology (Design for manufacturing and assembly) and technological tools were applied, in this particular case, SolidWorks software. This software was used to create the three-dimensional model of the prototype perform dynamic and static tests of stresses, deformations and permissible safety coefficients, supported by the theoretical calculations associated with the respective design methods.

For the selection of the prototype components, certain alternatives were compared, which were evaluated technically and economically under the criteria selected by the work team, taking into account design considerations.

The drawings for the manufacture of the prototype, as well as the instructions for its assembly are the tangible results achieved with this Project, so that they can be used in the short term and even make improvements on it.

In conclusion, the project fulfills the objectives described and promotes the creation of initiatives for the resolution of problems related to the peasants and farmers of Colombia, which are forgotten by the National Government, allowing them to improve their harvesting work through the modernization of harvesting tasks and also, to think about the export of farm products

Keywords: Design, harvesting, Ipomoea batatas L., prototype.

Contenido

	Pág.
Resumen	6
Lista de figuras.....	10
Lista de tablas.....	12
Lista de Símbolos y abreviaturas	13
Introducción	15
1. Generalidades	17
1.1 Descripción del problema	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
2. Marco referencial	21
2.1 Antecedentes y estado actual del arte.....	21
2.2 Marco conceptual	23
2.3 Marco legal.....	25
3. Metodología de trabajo para el diseño del prototipo	27
3.1 Enfoque y tipo de investigación	27
3.2 Metodología de diseño aplicada al prototipo.....	28
3.3 Desarrollo del concepto del prototipo	31
3.3.1 Requerimientos de diseño y especificaciones.....	31
3.4 Limitaciones del proyecto	34

4.	Diseño del prototipo	36
4.1	Selección de materiales y diseño de la estructura física	36
4.1.1	Criterios para la selección de materiales	36
4.1.2	Criterios para el diseño de la estructura física	37
4.1.3	Cálculos teóricos asociados con el diseño del prototipo	49
5.	Resultados	69
5.1	Planos para la fabricación del prototipo	69
5.2	Evaluación de los costos asociados con el diseño del prototipo	70
5.3	Criterios para la implementación del prototipo	73
5.3.1	Instructivo para el armado y mantenimiento del prototipo	73
6.	Conclusiones	75
A.	Anexo: Planos de taller y de montaje del prototipo	77
	Bibliografía	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Batata [<i>Ipomoea batatas</i> L.]	24
Figura 4-1. Calidades de aceros más comerciales en Colombia.	37
Figura 4-2: Representación esquemática de la planta <i>Ipomoea batatas</i> L.	38
Figura 4-3: Variedades de batatas encontradas en las zonas de aplicación del proyecto.	39
Figura 4-4: Características de las zonas agroecológicas de evaluación.....	39
Figura 4-5. Modelo 3D del prototipo.	44
Figura 4-6: Modelo tridimensional de la cuchilla.....	44
Figura 4-7: Dimensiones de la cuchilla.....	45
Figura 4-8: Vistas lateral y frontal de la rejilla.	45
Figura 4-9: Modelo del chasis del prototipo.....	46
Figura 4-10: Conjunto soldado para la tracción del prototipo.....	47
Figura 4-11: Eslabones para transmisión de movimientos principales.	47
Figura 4-12: Ejes para la transmisión de movimientos dentro del prototipo.....	48
Figura 4-13: Clasificación de los ambientes de acuerdo con la Norma ISO 9223.....	49
Figura 4-14: Distribución de cargas sobre la cara superior de la cuchilla.	50
Figura 4-15: Malla aplicada a la cuchilla para la aplicación del estudio.	51
Figura 4-16: Tensiones de Von Mises alcanzadas según la aplicación de la carga.....	51
Figura 4-17: Factor de seguridad mínimo y máximo obtenido.	52
Figura 4-18: Escala de deformación propias de la cuchilla.....	52
Figura 4-19: Estudio de fatiga aplicado sobre la cuchilla.....	53
Figura 4-20: Resultado del estudio de fatiga realizado en la cuchilla.	53
Figura 4-21: Carga máxima distribuida sobre la rejilla.....	54
Figura 4-22: Tensiones de Von Mises para la rejilla máximas y mínimas.....	55

Figura 4-23: Factor de seguridad analizado para la rejilla.	55
Figura 4-24: Deformaciones presentadas en la cuchilla.	56
Figura 4-25: Diagrama de cuerpo libre del chasis.....	56
Figura 4-26: Especificación SAE para pernos de acero.....	59
Figura 4-27:.....	60
Figura 4-28: Factor de superficie de materiales con diferentes acabados superficiales..	60
Figura 4-29: Factores de carga teniendo en cuenta los esfuerzos a los que se encuentra sometido el elemento.	61
Figura 4-30: Efectos de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.	61
Figura 4-31: Factor de tamaño para elementos sometidos a torsión y flexión.	61
Figura 4-32: Factor de confiabilidad correspondientes a ocho desviaciones estándar porcentuales al límite de resistencia a la fatiga.....	62
Figura 4-33: Ecuación de ED-Goodman.....	63
Figura 4-34: Zona crítica del prototipo sometida a esfuerzos debido a soldadura.....	64
Figura 4-35: Propiedades torsionales de las soldaduras de filete.	64
Figura 4-36. Propiedades de los electrodos usados para la unión de elementos.....	67
Figura 5-1. Plano de montaje del prototipo con listado de materiales.	70
Figura 5-2: Vista explosionada del prototipo diseñado.....	73
Figura 5-3: Partes enumeradas del prototipo.....	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Patentes de dispositivos cosechadores de papa/batata.	22
Tabla 3-1: Consideraciones de diseño para la fabricación de un equipo o producto.	30
Tabla 3-2: Formato de especificaciones del producto a fabricar.....	31
Tabla 4-1: Variables asociadas con el diseño del prototipo	40
Tabla 4-2: Matriz morfológica asociada con las alternativas de diseño del prototipo.....	40
Tabla 4-3: Descripción de ventajas y desventajas para cada alternativa.....	42
Tabla 4-4: Valoración técnico-económica de las alternativas	42
Tabla 4-5: Coeficientes de labranzas según el estado del suelo.	49
Tabla 4-6: Características del perno adecuado para el prototipo.	63
Tabla 5-1: Análisis de precios unitarios ligado a la fabricación y ensamble del prototipo.	71
Tabla 5-2: Despiece de materiales que componen el prototipo.	71
Tabla 5-3: Comparativo entre los costos del prototipo vs precios de máquinas disponibles en el mercado.	72

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m^2
F	Carga máxima	N
P	Carga axial	N
P_m	Peso del material	kg
V	Volumen	m^3

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
δ	Densidad	kg/m^3
\emptyset	Diámetro	mm, cm, m
σ	Esfuerzo	$\frac{N}{m^2}$

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AGA	American Galvanizers Association
AISC	American Institute for Steel Construction
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials

APU	Análisis De Precios Unitarios
ALACERO	Asociación Latinoamericana Del Acero
ANDI	Asociación Nacional De Empresarios De Colombia
cm	Centímetro
CL	Coeficiente de labranza
CAD	Computer-Aided Design
dm	Decímetro
DANE	Departamento Administrativo Nacional De Estadística
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DFx	Diseño Por Factores
USD	Dólar Estadounidense
ENA	Encuesta Nacional Agropecuaria
et. al.	Et Alii (Y Otros)
FEA	Finite Element Analysis
FAO	Food And Agricultural Organization
GR	Grado
ISO	International Organization For Standarization
kgf	Kilogramos fuerza
I	Ancho
m	Metro
mm	Milímetro
PTE	Perfil Tubular Estructural
COP	Peso Colombiano
PL	Platina o Lámina
PIB	Producto Interno Bruto
b	Profundidad
PNUD	Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo
RAE	Real Academia Española
TLC	Tratado De Libre Comercio
3D	Tridimensional

Introducción

La batata [*Ipomoea batatas* L.] es un tubérculo o raíz rica en carbohidratos, utilizada para la alimentación humana y animal y que, además, se está aplicando en la industria de almidones y para la producción de alcohol [1].

De acuerdo con la información entregada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los cultivos de batata en Suramérica en el año 2018 produjeron 1.539.264 toneladas de este alimento [2] y 91.945.358 toneladas a nivel mundial, lo que permite ubicarlo en el octavo lugar dentro de los principales cultivos alrededor del mundo, después del trigo, arroz, papa, tomate, maíz, yuca y bananas [3].

Aunque este tipo de cultivo es de gran importancia a nivel mundial, en Colombia no hace parte de las plantaciones empleadas para la industria; actualmente sólo es cosechado por algunos campesinos tradicionales [4]. Sin embargo, debido a la producción mundial y a la demanda creciente de este tubérculo, la exportación puede ser un mercado de nichos interesante y se podría analizar como una alternativa de diversificación productiva de beneficio económico para las regiones cálidas del país [5].

Por esta razón, es imperativo fomentar iniciativas de desarrollo tecnológico tendientes a fortalecer y mejorar la producción agrícola. A través del diseño un prototipo de máquina cosechadora de batata es posible pensar en mejoras significativas dentro del sistema de agricultura tradicional, disminuyendo costos, tiempo e incrementando la rentabilidad de esta actividad económica [6].

Para llevar a cabo este proyecto, el equipo de trabajo se basó en la metodología de diseño denominada Diseño para la fabricación y el montaje (DFMA por sus siglas en inglés); a partir de esta se establecieron los requerimientos del prototipo y se definió su función

principal: arrancar, limpiar y devolver el tubérculo al suelo para su posterior recolección. El objetivo principal se logró haciendo uso de recursos tecnológicos como softwares tipo CAD que trabajan sinérgicamente con los saberes adquiridos en diseño mecánico, materiales de ingeniería, procesos de manufactura, entre otros.

A pesar de que este proyecto se limita sólo al desarrollo teórico del prototipo, el equipo estableció los fundamentos para su puesta en marcha, puesto que, la selección de materiales y componentes se hizo teniendo en cuenta su disponibilidad en los mercados locales y costos, respetando los factores más importantes para el diseño como lo son la resistencia mecánica, utilidad, seguridad, confiabilidad, corrosión, desgaste y mantenimiento. Del mismo modo, en este documento se realiza un análisis de costos para garantizar que el prototipo sea de fácil adquisición para los pequeños productores y, por último, un manual de instrucciones para efectuar el armado y desarmado del mismo.

1. Generalidades

1.1 Descripción del problema

En los años 1990, la producción agrícola tuvo un crecimiento importante, por lo cual el Estado podía pensar en competir a nivel mundial; no obstante, ciertos factores como la guerra, la falta de apoyo en el cultivo de algunos productos, entre otros hizo que las cantidades cosechadas cayeran significativamente y se mantuvieran paralizados durante mucho tiempo. La agricultura pasó de representar el 22,3 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) a representar sólo el 6,3 por ciento en el año 2017 [7].

En el año 2019, la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) indicó que la producción agrícola en Colombia fue de 31.144.905 toneladas, de las cuales, sólo el 10,5 por ciento de la producción, (3.261.501 toneladas) pertenece al grupo de tubérculos y plátano y de ese porcentaje, la mayor participación la tuvo el cultivo de papa con 50,7 por ciento, el plátano con 27,2 por ciento y la yuca con 20,8 por ciento [8]. La batata, aunque se encuentra dentro de este grupo, su porcentaje de participación no es significativo.

La agricultura se ha visto afectada por ciertos factores, en los cuales se halla la globalización, las transformaciones tecnológicas, los tratados de libre comercio (TLC), los impuestos y algunas restricciones en el mercado; la gran parte de los campesinos no poseen los recursos económicos suficientes, ni la educación y/o capacitación para ser competitivos en el mercado local y, por ende, en el mercado global [18]. De acuerdo con el DANE, el rango de edad de los productores se encuentra entre 55 y 59 años, con un nivel educativo del 64,7 por ciento en básica primaria [9].

A pesar de que históricamente la agricultura ha contribuido significativamente en el desarrollo económico mundial, puesto que ha tenido un fuerte impacto en el aumento de la producción, reducción de la pobreza, acrecentamiento del empleo e ingresos del sector,

que se ha evidenciado en el desarrollo de los sectores agrícolas y no agrícolas en los países industrializados y emergentes [10], los datos arrojados por las distintas entidades gubernamentales demuestran el poco apoyo con el que cuenta la agricultura y las repercusiones que esa falta de apoyo ha tenido sobre el crecimiento de la economía del país.

De hecho, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) [11], propicia una visión integrada que sea capaz de abordar los asuntos relacionados con la pobreza multidimensional, desigualdad, exclusión y sostenibilidad, cuyo objetivo se centra en fortalecer las capacidades y promover un ambiente favorable para el acceso a las oportunidades, tomando como eje central las comunidades más vulnerables y relegadas para que sean sostenibles económica, social y medioambientalmente.

1.2 Justificación

La tecnificación cuando se aplica adecuadamente dentro de la sociedad permite aumentar la productividad de una actividad económica o bien, de un sector completo. Durante muchos años Colombia se ha identificado por sus altos índices de informalidad de trabajo en el campo, afectando así la competitividad y el uso eficiente de la producción agropecuaria en el país [12].

La batata, aunque se trata de un tubérculo poco cultivado en Colombia, ha demostrado ganar terreno a nivel mundial, porque ciertas potencias mundiales como China y Estados Unidos se han concentrado en su producción para consumo humano y alimentación animal. La región Caribe colombiana, debido a su clima predominante, es propicia para el cultivo de dicho tubérculo, pero se hace necesario que la producción sea competitiva para poder efectuar su exportación.

La poca o nula tecnificación impide que esta meta sea lograda, razón por la cual, se debe pensar en alternativas para cosechar este producto eficientemente. Cabe resaltar que la cosecha es el punto crucial del cultivo porque se debe garantizar la conservación del producto con los menores daños posibles. Es por esto que el proyecto tiene como fin diseñar un prototipo mecánico de recolección y traslado de batata buscando minimizar los

esfuerzos físicos implicados en el arranque manual, lograr la recolección en menor tiempo y gastar menos recursos en mano de obra.

El equipo de trabajo tiene como premisa diseñar el prototipo con materiales y componentes comercializados dentro del territorio nacional, que sean de fácil consecución, económicos, que sean sencillos de reemplazar y efectuar el mantenimiento; de igual manera, se evaluarán los costos asociados con la fabricación del prototipo y adicionalmente, entregar un manual de instrucciones para su armado y mantenimiento. Con ello se busca que la adquisición del equipo (en un futuro) sea accesible para los pequeños productores.

La propuesta es viable porque se cuenta con los recursos físicos, humanos, tecnológicos y económicos para su puesta en marcha. Cabe destacar que este proyecto será sostenible pues se regirá bajo los objetivos dispuestos por el PNUD, que se mencionan en el planteamiento del problema descrito.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un prototipo mecánico de recolección y traslado de batata [*Ipomoea batata*] para facilitar labores de cosecha a pequeños productores mediante la utilización de un software tipo CAD que emule las condiciones de carga a las cuales estará sometido el prototipo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Comparar las alternativas actualmente existentes, en el mercado y en la literatura, sobre equipos de recolección de este tipo de cultivos, de forma que sea posible aplicar conceptos de similitud para el diseño del prototipo en particular.
- Efectuar los cálculos requeridos considerando las condiciones de carga a las cuales estará sometido el prototipo garantizando el cumplimiento de los parámetros de diseño que definen la funcionalidad de una máquina.

- Analizar el comportamiento estático y dinámico del prototipo haciendo uso de las herramientas propias del software, así como la realización de los planos para que, en un futuro, se pueda fabricar y ensamblar.
- Identificar y evaluar los costos directos e indirectos necesarios para llevar a cabo la fabricación del prototipo, de modo que se garantice el desarrollo sostenible del mismo teniendo en cuenta variables sociales, físicas y ambientales.

2. Marco referencial

2.1 Antecedentes y estado actual del arte

Las cosechadoras de batata y papa trabajan indistintamente, es decir, estos dispositivos pueden ser usados tanto para la cosecha de papa como de batata. En la literatura existen un sinnúmero de trabajos relacionados con en el diseño y fabricación de equipos recolectores de batata y papa, mientras que otros se han dedicado a probar el rendimiento de diversas máquinas existentes en el mercado.

Por un lado, A. Pantoja, en su proyecto de grado [6] implementó un prototipo para la cosecha de la papa con el fin de lograr una mayor rentabilidad en el cultivo de esta. Llatas et. al. [13] Diseñaron un implemento cosechador de papas de tipo monosurco adaptado al motocultor DF-15L; allí determinaron las correctas dimensiones de los elementos mecánicos para el implemento, de forma que pudiera ser adaptado al modelo de diseño VDI-222, que ofrece la oportunidad de diseñar sin necesidad de contar con experticia en el tema. Quevedo [14], al igual que los autores anteriores, analizó y diseñó un apero cosechador de papas para el motocultor YTO DF-15L-MAGAP. Del mismo modo, Alcaciega [15] en el año 2017, desarrolló un apero para cosechar papas en campos agrícolas, dispositivo que es acoplado a un tractor por medio de un sistema cardán, disco de arado de 26 pulgadas, vertedera y sistemas de poleas y bandas. Olmos et. al. [16] Trabajaron en un artefacto que aumente la productividad en los procesos de siembra y/o cosecha de cultivos de papa en Chiquinquirá-Boyacá, que, a su vez, mejore la calidad de vida del campesino colombiano.

También, autores como Kakahi et. al [17], Lui Bao et. al. [18] Y Hu Lianglong [19], presentaron sus estudios relacionados con el diseño de máquinas propiamente cosechadoras de batata, cuya premisa fue mantener la integridad del tubérculo.

Adicional a estas publicaciones, en la web se encuentran patentes de máquinas cosechadoras de papa. Hay patentes, que datan de los años 1800 y en los años recientes estas máquinas aún se encuentran desarrollándose. En la Tabla 2-1, que se describe a continuación se enumeran algunas de estas patentes; allí se relaciona la denominación de la patente, nombre del autor, año y se ofrece una breve descripción de la misma.

Tabla 2-1: Patentes de dispositivos cosechadores de papa/batata.

Denominación de patente	Autor	Año	Descripción
US490596A [20]	James Colgrave	1893	Cosechadora de papa adaptada para quitar las puntas de la papa, cavarlas del suelo, retirar la suciedad y almacenarlas, mediante un trabajo ininterrumpido.
US2277450A [21]	Frank J. Parr	1942	Cosechadora de papa que separa la raíz y la dispone en un punto. Cuenta con un dispositivo fácilmente portátil, eficiente y económico.
US4971155A [22]	Nick J. Peturis	1987	Cosechadora de papas que posee un área para clasificar el producto de tres formas de acuerdo con el tamaño y que, a su vez, permite la eliminación de los residuos.
US5083978A [23]	Erling Royneberg	1992	Máquina recolectora de cultivos de raíces, que puede desenterrar dos filas de cultivo y descargarlo más tarde.
US7958942B2 [24]	Klemens Kalverkamp	2006	Cosechadora de patatas que cuenta con un dispositivo de elevación para separar las crestas del suelo, además de que tiene unas rejillas para efectuar la excavación.
US9615511B2 [25]	David L. Johnson Matthew John Rizzo James R. Schmidt Barry Stott Zane Wesley Unrau	2017	Dispositivo separador para una cosechadora de papas, que separa el material de grano del que no lo es, usando múltiples áreas de procesamiento, incluyendo un área de cosecha, un área de comedero, un área de trilla, un área de limpieza y un área de entrega de grano.

Fuente: Autores.

En el mercado también hay cierta maquinaria relacionada con el arranque de cultivos de papa, batata, arroz, trigo, cebada, entre otros; empresas como John Deere [26], Case IH

[27], Challenger [28], New Holland [29] y otras ofrecen al público distintos tipos de cosechadoras que se ajustan a las necesidades del cultivo, sin embargo, ninguna se describe como cosechadoras de papas y/o batatas, por lo que posible concluir que ninguna de estas empresas tienen un producto desarrollado específicamente para estos cultivos; por esta razón, se puede pensar en que la integridad del tubérculo puede verse afectada al usar este tipo de maquinarias.

Por otro lado, Dewulf [30], empresa europea proveedora de maquinaria agrícola, se especializa en la comercialización de cosechadoras para patatas y tubérculos autopulsadas y remolcadas. Standen [31] por su lado, fabrica y comercializa cosechadoras de camote (batata) a la medida. El común denominador de ambas compañías es que sus máquinas son costosas, es decir, son ofrecidas para cultivos tecnificados en los cuales el cultivador debe contar con buen poder adquisitivo; además de eso, estas marcas no son distribuidas en Colombia, haciéndolas aún más difíciles de conseguir, puesto que se deben considerar los costos de importación, impuestos por nacionalización y demás.

2.2 Marco conceptual

Con el fin de ampliar la visión sobre este proyecto, es preciso definir algunos términos considerados como los más relevantes según el equipo de trabajo.

Diseño. La Real Academia Española (RAE) define el diseño como el trazado o delineación de un edificio o de una figura [32]. Proyecto, plan que configura algo.

Prototipo. De acuerdo con la RAE [33], es el ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

Ipomoea batatas L. La batata (Figura 2-1) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia Convolvulaceae. La planta tiene flores simétricas blancas y moradas y tiene grandes raíces de almacenamiento nutritivo. Las raíces de la batata se desarrollan principalmente como raíces de almacenamiento, con hojas alternas en forma de corazón o palmadas lobuladas, que son largas y afiladas. Las raíces de la batata tienen una cáscara lisa de color amarillo, naranja, rojo, marrón, morado y/o beige, y su pulpa es de beige a

blanco, rojo, rosa, violeta, amarillo, naranja o morado, según el cultivar. Las raíces, hojas y tallos de la batata son comestibles y nutritivos, y estos juegan un papel vital para garantizar la seguridad alimentaria de muchos países en desarrollo [34].

Figura 2-1: Batata [*Ipomoea batatas* L.]



Fuente: <http://plants.bauercreative.sk/ipomoea-batatas.php>

Software de diseño tipo CAD. Los paquetes de software son instrumentos y recursos de gran potencial para el diseño, análisis y simulación de componentes mecánicos. EL software para el diseño asistido por computadora (CAD) admite la producción de modelos tridimensionales (3D) sobre los cuales es factible la realización de cálculos rápidos y exactos de las propiedades del modelo.

Parámetro. Dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación [35].

Máquina. Conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada, o para producir un efecto determinado [36].

Esfuerzo. La fuerza por unidad de área o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se llama esfuerzo sobre esa sección y se representa con la letra griega σ (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal A sometido a una carga axial P se obtiene, por lo tanto, al dividir la magnitud de P de la carga entre el área A (Ecuación 2-1) [37]:

$$\sigma = \frac{P}{A} (2-1)$$

2.3 Marco legal

A continuación, se hace referencia a ciertas leyes y normas que cobijan los objetivos de este proyecto.

Como se menciona en la cartilla titulada “Derechos de los campesinos colombianos”, cuyo autor es la Defensoría del pueblo Colombia [38], los artículos de la Constitución Política de Colombia [39] que cobijan al campesino son:

Artículo 64. Es deber del Estado promover el acceso progresivo a la propiedad de la tierra de los trabajadores agrarios, en forma individual o asociativa, y a los servicios de educación, salud, vivienda, seguridad social, recreación, crédito, comunicaciones, comercialización de los productos, asistencia técnica y empresarial, con el fin de mejorar el ingreso y calidad de vida de los campesinos.

Artículo 65. La producción de alimentos gozará de la especial protección del Estado. Para tal efecto, se otorgará prioridad al desarrollo integral de las actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales y agroindustriales, así como también a la construcción de obras de infraestructura física y adecuación de tierras.

De igual manera, el Estado promoverá la investigación y la transferencia de tecnología para la producción de alimentos y materias primas de origen agropecuario, con el propósito de incrementar la productividad.

Artículo 66. Las disposiciones que se dicten en materia crediticia podrán reglamentar las condiciones especiales del crédito agropecuario, teniendo en cuenta los ciclos de las cosechas y de los precios, como también los riesgos inherentes a la actividad y las calamidades ambientales.

Por otro lado, en la Ley 29 de febrero de 1990 [40] se dictan las disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico; allí se decreta lo siguiente:

Artículo 2. La acción del Estado en esta materia se dirigirá a crear condiciones favorables para la generación de conocimiento científico y tecnología nacionales; a estimular la capacidad innovadora del sector productivo, a orientar la importación selectiva de tecnología aplicable a la producción nacional; a fortalecer los servicios de apoyo a la investigación científica y al desarrollo tecnológico; a organizar un sistema nacional de información científica y tecnológica; a consolidar el sistema institucional respectivo y, en general, a dar incentivos a la creatividad, aprovechando sus producciones en el mejoramiento de la vida y la cultura del pueblo.

Así mismo, en el Artículo 1, párrafo sexto de la Ley 160 de 1994 [41], se establece que es responsabilidad del estado acrecer el volumen global de la producción agrícola, ganadera, forestal y acuícola, en armonía con el desarrollo de los otros sectores económicos; aumentar la productividad de las explotaciones y la eficiente comercialización de los productos agropecuarios y procurar que las aguas y tierras se utilicen de la manera que mejor convenga a su ubicación y características.

En cuanto al desarrollo del diseño del equipo en sí, la Norma ISO 8210 de 1989: Equipment for harvesting-Combine harvesters Test procedure [42] y el Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO: Principios y Prácticas de prueba y evaluación de máquinas y equipos agrícolas [43] son las principales metodologías dirigidas a la evaluación de máquinas y/o equipos agrícolas [44].

3. Metodología de trabajo para el diseño del prototipo

3.1 Enfoque y tipo de investigación

La metodología como lo indica Bernal [45], es “la teoría de los procedimientos generales de investigación que describen las características que adopta el proceso general del conocimiento científico y las etapas en que se divide dicho proceso, desde el punto de vista de su producción y las condiciones en las cuales debe hacerse”.

El proyecto se basa en el diseño de un prototipo mecánico de recolección y traslado de batatas para la facilitación de las labores de cosecha en pequeños productores. Por tal razón, se enmarca dentro del tipo de investigación proyectiva, puesto que, tiene como objetivo diseñar y crear propuestas orientadas a resolver diversas situaciones, aplicándose en su mayoría, en proyectos de ingeniería y arquitectura [46].

La investigación proyectiva posee fases metodológicas que facilitan la estructuración lógica del proyecto. A partir de esta información, se plantean los pasos que se describen a continuación, los cuales darán lugar a la consecución de los objetivos trazados.

- Se llevará a cabo una investigación de la literatura, utilizando herramientas como libros, artículos científicos, patentes, normas, leyes y empresas que distribuyen este tipo de máquinas y/o equipos con el fin de identificar productos similares que permitan implementar las leyes de afinidad (semejanza) sobre el diseño del prototipo.
- Realización de investigaciones acerca de las características físicas de la batata y evaluar las condiciones físicas de los terrenos predominantes en la Región caribe donde se cultiva esta clase de tubérculos. Caracterizar las variables físicas más

importantes mediante tablas y cuadros, indicando porcentualmente su importancia, de acuerdo con los resultados encontrados en las investigaciones y análisis.

- Elaboración de los cálculos de diseño del producto teniendo en cuenta los criterios para el diseño de maquinaria y equipos expuestos en libros, artículos, así como en la normativa vigente para la construcción de dichas máquinas.
- Simulaciones de las partes fijas y móviles y, realización de estudios estáticos (de esfuerzos) para medir la confiabilidad de los elementos principales que lo componen y a su vez, predecir el desempeño del prototipo para que sea posible aplicar, en futuros estudios o análisis, alternativas para mejorar el diseño de la máquina.
- Elaboración de los planos mediante el software SolidWorks, a través de la integración de las diversas piezas que serán dibujadas por el diseñador bajo los criterios ya definidos en la fase teórica. Estos planos contarán con información técnica como medidas, tipos de materiales y demás elementos exigidos que den lugar a la fabricación del prototipo.
- Documentar los resultados obtenidos en el proceso de diseño identificando las ventajas, las características más importantes del prototipo y las conclusiones derivadas del mismo para garantizar la factibilidad de la construcción de este equipo de recolección. Además de eso, se efectuará un análisis de los posibles costos involucrados en la fabricación sostenible del prototipo, así como la realización de un instructivo para el armado y desarmado de este equipo, cuando tenga lugar su fabricación.

3.2 Metodología de diseño aplicada al prototipo

El diseño implica la formulación de un procedimiento que busque satisfacer una necesidad específica o resolver un problema; si este procedimiento da como resultado la fabricación de un producto, este debe ser confiable, mantenible, competitivo y útil [47]. Hoy en día, existen ciertas metodologías de diseño que se ajustan de acuerdo con las exigencias del producto.

La metodología denominada Diseño para la fabricación y el montaje, cuyas siglas en inglés son DFMA, tiene por objeto principal optimizar los aspectos de fabricabilidad, montabilidad y costos, manteniendo las funciones primordiales del producto [48]. Esta metodología se desprende del modelo de diseño por factores (DFx), el cual se propone para establecer la finalidad del diseño en un factor que la empresa y/o cliente considere importante.

El concepto de diseño para la fabricación y el montaje se define como la práctica de diseñar productos con fabricación en mente para que puedan diseñarse en el menor tiempo posible, con el menor costo de desarrollo; hacer la transición más rápida y más suave a la producción; ensamblarse y probarse con el costo mínimo en el tiempo mínimo; tener el nivel deseado de calidad y confiabilidad; satisfacer las necesidades de los clientes y competir bien en el mercado [49]. Esta es, también, enfoque de la denominada ingeniería concurrente, que incluye el diseño y desarrollo de productos/servicios de forma global o integrada.

Al ser una de las metodologías más utilizadas en las compañías actualmente, debido a la reducción de los costos de diseño, fabricación y montaje, se ha seleccionado como procedimiento para la realización del proyecto. Estudios realizados demuestran que, al integrar los dos factores, los beneficios son mayores que al utilizar cada uno por separado. Los principales aspectos que esta recopila son:

- Desarrollo del producto.
- Arquitectura del producto y modularidad.
- Fabricación.
- Montaje.

En la Tabla 3-1 que se presenta a continuación, se dispone de una lista de referencia otorgada por la guía para la fabricación y el montaje que ayudará a la organización de ciertas consideraciones de diseño como funciones, características, prestaciones y condiciones del entorno del producto. Dicha tabla será tomada como referencia para la organización de los requerimientos de diseño y especificaciones.

Tabla 3-1: Consideraciones de diseño para la fabricación de un equipo o producto.

Concepto	Determinaciones
Función	Descripción de las funciones principales, ocasionales y accidentales del producto (si es necesario, con esquemas).
Dimensiones	Espacios, volúmenes, masas, longitudes, anchuras, alturas, diámetros; número y disposición de elementos.
Movimientos	Tipos de movimiento; desplazamientos, secuencias y tiempos; trayectorias, velocidades y aceleraciones.
Fuerzas	Magnitud, dirección y sentido de fuerzas y momentos; variación en el tiempo; desequilibrios y deformaciones admisibles.
Energía	Accionamientos mecánicos y otros conversores de energía: alimentación y control; transmisiones; potencia y rendimiento.
Materiales	Flujo, transporte y transformación de materiales; Limitaciones o preferencias sobre su uso; condicionantes de mercado.
Señales y control	Señales de entrada y salida; sensores y actuadores; funciones del control.
Fabricación y montaje	Volumen y cadencia de producción; limitaciones o preferencias en procesos y equipamiento; variantes del producto; flexibilidad en la fabricación.
Transporte y distribución	Embalaje y transporte: dimensiones, masas, orientación, golpes; Instalación, montaje y puesta a punto.
Vida útil y mantenimiento	Vida prevista; fiabilidad y mantenibilidad; tipos de mantenimiento e intervalos de servicio; criterios sobre recambios.
Costos y plazos	Costes de desarrollo, fabricación y utillaje; Plazos de desarrollo y tiempo para el mercado.
Seguridad y ergonomía	Sistemas y dispositivos de seguridad; relación con el usuario: operación, inteligibilidad, confort y aspecto.

Tabla 3-1: Continuación

Impacto ambiental	Consumos de energía y materiales; limitaciones al impacto ambiental en la fabricación, utilización y fin de vida.
Aspectos legales	Cumplimiento de normativas (función de los usos y mercados); evitar la colisión con patentes.

Fuente: http://www.prodintec.es/attachments/article/272/fichero_15_4333.pdf

3.3 Desarrollo del concepto del prototipo

3.3.1 Requerimientos de diseño y especificaciones

Con respecto a los requerimientos de diseño y especificaciones, se ha tomado como guía la Tabla 3-1, expuesta en el ítem anterior, de manera que se estructuren los requerimientos que proponen los clientes y diseñadores para la fabricación del dispositivo. A partir de dicha tabla, se elabora el formato propuesto en el libro Diseño Concurrente, cuyo autor es Carles Riba [50], en el que es conveniente organizar las especificaciones del proyecto con la mayor cantidad de información relevante; es titulado con el nombre de la empresa fabricante (ocasionalmente, por la empresa cliente) y la denominación del producto, contiene el concepto (similar a la Tabla 3-1), quién lo propone, si se trata de un requerimiento o deseo y, por último, ofrece una breve descripción del concepto (Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Formato de especificaciones del producto a fabricar.

Fabricante: Rubén Blanco Miranda Julio Galvis Forero	Producto: Prototipo mecánico recolector de Ipomoea Batatas L.	Fecha inicial: Agosto de 2020	
		Página 1/1	
Especificaciones			
Concepto	Propone C/D*	R/D**	Descripción
Función	D	R	Prototipo debe ser capaz de arrancar, limpiar y dejar el tubérculo formando hileras sobre la superficie del suelo.

Tabla 3-2: Continuación

	D	R	Equipo de tracción animal o que sea posible adaptarlo a un tractor.
Dimensiones	D	R	El prototipo debe ser pequeño, que pueda extraer una fila del cultivo de batata a la vez
	D	R	El prototipo no debe ser muy pesado.
	D	D	Fácil de cargar y transportar.
Fuerzas	D	R	El equipo deberá soportar esfuerzos de tracción, cargas cíclicas y vibraciones.
Energía	D	R	El dispositivo será accionado mecánicamente bajo fuerzas de tracción.
	D	R	Elementos convertidores de potencia (reductores de potencia).
Materiales	D	R	Materiales resistentes a condiciones agrestes como humedad, temperaturas elevadas, polvo, corrosión, vibraciones, cargas cíclicas, golpes, abrasión.
	D	R	Materiales económicos y de fácil consecución.
	D	D	De fácil maquinabilidad.
Señales y control	D	R	Prototipo completamente mecánico
	D	R	Ruedas direccionadas por tracción animal.
Fabricación y montaje	D	R	La unión de piezas del producto debe ser desmontable.
	D	R	Fácil reemplazo de los elementos deteriorados.
	D	R	Los elementos del dispositivo se ensamblarán mediante uniones soldadas y pernadas.
Vida útil y mantenimiento	D	R	Definir el tiempo de vida de los componentes mecánicos del producto, para el posterior mantenimiento de éste.

Tabla 3-2: Continuación

	D		Lograr que el mantenimiento se realice en el menor tiempo posible para garantizar la disponibilidad del equipo.
	D	R	Diseño debe permitir la limpieza de las piezas que están en contacto directo con el suelo.
	D	R	Componentes robustos que no se deterioren rápidamente.
		R	
Costos y plazos	D	R	Los elementos que lo conforman deben ser de fácil acceso en el mercado.
	D	R	El diseño del prototipo debe efectuarse en el año 2020.
Seguridad y ergonomía	D	R	Los elementos de la máquina que puedan ocasionar accidentes deben ser protegidos con guardas, de forma que no dañen la vida de las personas.
	D	R	Equipo liviano que no afecte la salud del animal que lo acarreará.
	D	R	Que cuente con un freno de emergencia, de modo que se suspenda su operación cuando haya una situación potencial de peligro. Adecuada sujeción de cables y componentes.
Impacto ambiental	D	R	Materiales que no se degraden con el tiempo.
	D	D	Materiales cuya contaminación sea poca debido a su utilización.
	D	R	Que se puedan reciclar o reusar los materiales que lo conforman.
Aspectos legales	D	R	Norma ISO 8210 de 1989: Equipment for harvesting-Combine harvesters Test procedure.

Tabla 3-2: Continuación

	D	R	Boletín de servicios agrícolas de la FAO.
--	---	---	---

*C: Cliente, D: Diseñador

**R: Requerimiento, D: Deseo

Fuente: Elaboración propia.

Basados en la tabla anterior, el equipo de trabajo definió que el objetivo principal del prototipo es el de arrancar, limpiar y devolver a la superficie del suelo la batata para su posterior recolección. Con ello se busca mejorar las condiciones de cosecha de los productores de batata, permitiéndoles realizar esta labor con mayor ergonomía y menor desgaste físico, lo que se traduce en la mejora de sus condiciones laborales, físicas y aumento de su productividad.

3.4 Limitaciones del proyecto

Una de las competencias profesionales de los Ingenieros Mecánicos es diseñar, fabricar y efectuar montajes de máquinas, infraestructuras, procesos y sistemas productivos; por lo tanto, aunque este proyecto está limitado sólo al diseño de elementos de máquinas, estructuras y equipos cumplirá a cabalidad con todas las exigencias y consideraciones requeridas para que sea un diseño funcional, mantenible y confiable.

Uno de los factores limitantes de este proyecto es el panorama actual de salud mundial, ya que impide la construcción del prototipo y, por ende, sólo es posible hablar de diseño del mismo.

Debido a que la envergadura de este proyecto es netamente investigativa y/o teórica; a corto plazo no hay usuarios beneficiados por los resultados de este, pues no será tangible. No obstante, este estudio podrá incentivar a mediano e incluso corto plazo la construcción de máquinas y equipos que estén orientados a la cosecha mecaniza o semimecanizada de la batata. Al conseguir la tecnificación de este cultivo, se podría pensar en la exportación de este producto a mercados internacionales, respondiendo a la alta demanda que existe actualmente.

Por otro lado, el software tipo CAD seleccionado para la realización de los planos funciona a través de una licencia cuyo valor es elevado y la cual debe pagarse anualmente; por lo tanto, se debe disponer de los recursos universitarios, que, si bien cuentan con este

programa, la licencia del mismo es estudiantil, restringiendo el uso de ciertas funciones importantes para la simulación, que se requieren para dar viabilidad al diseño del prototipo. La licencia gratuita de este programa (SolidWorks Student Design Kit) sería la ideal para el equipo de trabajo en el diseño del prototipo, siempre y cuando, la Universidad disponga de una licencia SolidWorks Education Edition [51], puesto que, de ser así, los estudiantes podrían obtener esta licencia gratuita y realizar el trabajo desde casa. La última actualización disponible es del año 2015, sin embargo, se tendría acceso durante un año a las siguientes funciones: Software de CAD 3D, SolidWorks Animator, entre otros, los cuales son herramientas suficientes para el alcance del proyecto.

4. Diseño del prototipo

4.1 Selección de materiales y diseño de la estructura física

4.1.1 Criterios para la selección de materiales

Basado en ...Requerimientos de diseño y especificaciones..., en el cual se definió que los materiales del prototipo deben ser resistentes a condiciones agrestes, así como de fácil consecución y buena maquinabilidad, razón por la que el equipo de trabajo optó por elegir el acero como material utilizado por excelencia en dispositivos con este tipo de aplicaciones.

De acuerdo con la Asociación Latinoamericana del Acero (Alacero) [52], las propiedades físicas y químicas del acero varían según su composición y tratamiento térmico, químico o mecánico; sin embargo, dicho material comparte algunas propiedades genéricas, destacándose entre ellas:

Conforme con la temperatura, es posible contraerse, dilatarse o fundirse; su punto de fusión está alrededor de 1375°C y de ebullición a 3000°C. Es un material muy tenaz, dúctil, maleable, de buena mecanización, de fácil soldabilidad, alta conductividad eléctrica, además, es reciclable.

Teniendo en cuenta las propiedades antes mencionadas, se procede a revisar los catálogos de aceros más comerciales en Colombia, encontrándose un catálogo [53] que posee gran variedad de calidades en elementos de acero estructural comúnmente usados dentro del territorio nacional.

Las calidades van desde la ASTM A-36 para estructuras metálicas en general, hasta ASTM A-588 GR B, para fabricación de estructuras metálicas que no requieren recubrimiento.

En la Figura 4-1, que se muestra a continuación, se resumen dichas calidades describiendo su composición química, propiedades mecánicas y sus aplicaciones más frecuentes.

Figura 4-1. Calidades de aceros más comerciales en Colombia.

CALIDADES MAS COMUNES		COMPOSICIÓN QUÍMICA										PROPIEDADES MECÁNICAS				APLICACIONES MAS FRECUENTES		
ASTM	DIN	L	C	MN	P	S	SI	CU	Ni	Cr	V	LÍMITE ELÁSTICO		RESISTENCIA A LA TRACCIÓN			% ALARGA	
												(x 100)	(x 100)	(x 100)	(x 100)			(x 100)
A - 36	ST 33 - 1.2	MIN		80			15						23Kg/mm2		41Kg/mm2	400MPa	20	Estructuras metálicas en general.
		MAX	25	120	4	4	30	20						25Kg/mm2	250MPa	56Kg/mm2	550MPa	
A - 283 GR C	RST 37 - 1.2	MIN		50			7						-	-	39Kg/mm2	380MPa	20	Tanques de almacenamiento.
		MAX	18	90	3.5	3.5	35	30						21Kg/mm2	205MPa	46Kg/mm2	450MPa	
A - 285 GR C		MIN											-	-	38Kg/mm2	380MPa	23	Recipientes a presión de baja e intermedia resistencia a la tracción.
		MAX	28	90	3.5	3.5								21Kg/mm2	205MPa	45Kg/mm2	515MPa	
A - 131 GR A	RST 34 - 1.2	MIN		53									-	-	41Kg/mm2	400MPa	21	Construcción naval en general.
		MAX	21		4	4	50.4							23Kg/mm2	235MPa	50Kg/mm2	490MPa	
A - 516 GR 70		MIN	27	85			15						-	-	49Kg/mm2	485MPa	17	Recipientes a presión temperaturas media-alta.
		MAX	31	120	4	3.5	40							27Kg/mm2	260MPa	63Kg/mm2	620MPa	
A - 514 GR A	RQT 601	MIN				1.5							-	-	71Kg/mm2	690MPa	-	Resistencia a la abrasión.
		MAX	20	150	3.5	4	50							64Kg/mm2	600MPa	87Kg/mm2	850MPa	
A - 572 GR 50		MIN					15						-	-			-	Fabricación de estructuras metálicas.
		MAX	23	135	4	5	40							50Kg/mm2	345MPa	65Kg/mm2	450MPa	
A - 588 GR B		MIN		75			15	2		4	0.1		-	-			-	Fabricación de estructuras metálicas que no requerirán de recubrimiento.
		MAX	20	135	4	5	40	4	5	7	1			50Kg/mm2	345MPa	70Kg/mm2	485MPa	

Fuente: Steckerl Hierros y Aceros S.A.

Para el caso particular de este trabajo, el principal criterio para elegir la calidad del acero implicado en el diseño y fabricación del prototipo es el criterio económico, seguido de la disponibilidad del mismo. En otras palabras, el equipo de trabajo evidenció que las calidades ASTM A-36 y A-572 GR 50 en aceros planos como láminas, platinas y perfiles (L, C, I o en H), ASTM A-500 C para tubería estructural, son los más comercializados en Colombia con los mejores precios por kilogramo, e igualmente, cuentan con disponibilidad inmediata.

4.1.2 Criterios para el diseño de la estructura física

En primera instancia, es necesario conocer las características físicas del tubérculo a cosechar (batata) y del suelo donde se cultiva, con la finalidad de establecer el primer criterio para el diseño del prototipo.

Sarceño Carrillo [54], en su trabajo de grado, define las características morfológicas de la batata o camote; en él expresa que las hojas simples insertadas en el tallo poseen entre 4 a 20 centímetros (cm) de longitud y cuya forma puede ser orbicular ovalada. Las flores se agrupan en espigas de tipo racimo, con raquis de 5 a 20 cm de largo y el fruto es una cubierta redonda de 3 a 7 milímetros (mm) de diámetro. El tallo, de hábito rastroso, puede alcanzar longitudes de hasta un metro (m). Por su lado, la raíz, de nuestro interés, es fibrosa y extensiva, tanto en profundidad como en sus laterales; la parte comestible es la raíz tuberosa donde los colores de la cáscara y pulpa pueden variar de blanco a amarillo naranja y se originan en la raíz del tallo que se ubica bajo tierra; estas pueden medir hasta 30 cm de longitud y 20 cm de diámetro y pesar desde 200 - 300 gramos (g) a 6 kilogramos (kg). En la Figura 4-2 se dispone de una representación esquemática de la planta.

Figura 4-2: Representación esquemática de la planta *Ipomoea batatas* L.

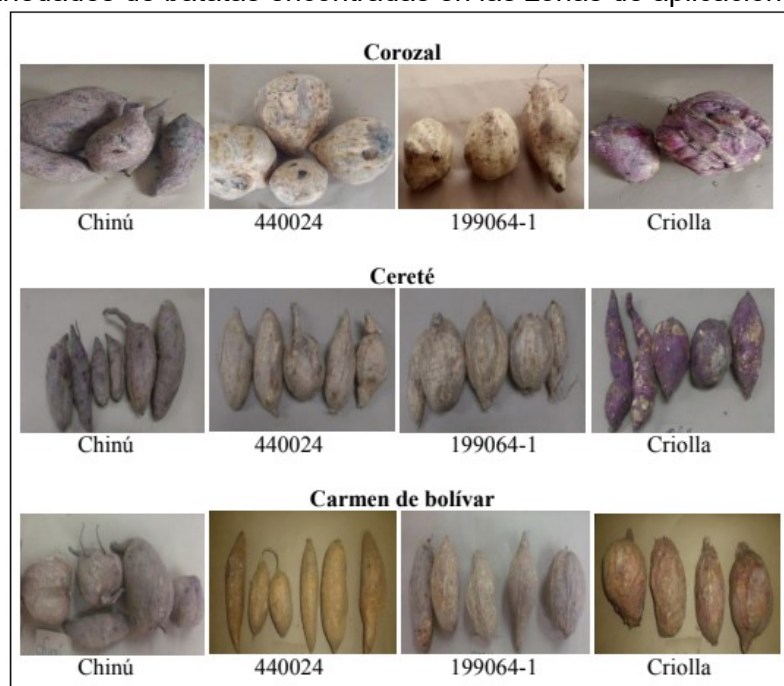


Fuente: Lago, Luis.

Arrieta et. A

I. [4] Centrarón su trabajo de grado en la caracterización de cuatro variedades de batata cultivadas en la Costa Caribe Colombiana, del cual se destaca la Figura 4-3. Allí se señalan variedades de las zonas agroecológicas de Corozal, Carmen de Bolívar y Cereté pertenecientes a los departamentos de Sucre, Bolívar y Córdoba respectivamente. Análogamente, presentaron las condiciones físicas de los terrenos de las zonas agroecológicas mediante la tabla mostrada en la Figura 4-4.

Figura 4-3: Variedades de batatas encontradas en las zonas de aplicación del proyecto.



Fuente: Arrieta, Lina y Jiménez, Karla.

Figura 4-4: Características de las zonas agroecológicas de evaluación.

Cód. Zona agroecológica	Relieve	Clima	Municipio	Información adicional
WR17	Planicie	Cálido seco	Corozal	Departamento de Sucre, Las Tinas, Lote Sr José Gregorio Pérez Barbosa, 9°17'34.38"N, 75°20'9.00"W
VR18-19	Planicie	Cálido húmedo	Cereté	Departamento de Córdoba. Lote experimental CORPOICA - C.I. Turipana (km 13 Vía Montería-Cereté), N 8° 50' 27.47", W 75° 48' 27.56''
WM49,WP22	Montaña y pie de Monte	Cálido seco	Carmen de Bolívar	Departamento de Bolívar. Lote experimental CORPOICA –Sede Carmen de Bolívar, N9° 42' 50.8'', W75° 06' 26.9''

Fuente: Arrieta, Lina y Jiménez, Karla.

Como se manifestó previamente en los requerimientos, el prototipo debe ser capaz de extraer, limpiar y devolver el tubérculo nuevamente en el suelo formando hileras, de tal forma, que facilite su posterior recolección. Por ello, el equipo de trabajo organizó las

variables por orden de relevancia para el diseño del equipo (Tabla 4-1), de la siguiente forma:

Tabla 4-1: Variables asociadas con el diseño del prototipo

Variable	Orden de relevancia	Función asociada
Condiciones del terreno	2	Arranque/extracción
Dimensiones de la raíz tuberosa	3	Arranque/extracción
Profundidad de la raíz	1	Arranque/extracción
Longitud de la planta	4	Arranque/extracción y limpieza

Fuente: Elaboración propia.



A la profundidad de la raíz con respecto a la superficie se le asignó el mayor valor, seguido de las condiciones del terreno; en tercer lugar, se sitúan las dimensiones de la raíz tuberosa y, por último, la longitud de la parte visible de la planta.

A partir de dicha tabla, se procede a realizar una matriz en que se comparen múltiples opciones de diseño de las partes de una máquina, dispositivo o equipo. Para efectos de este proyecto, se expone la matriz señalada en la (Tabla 4-2).

Tabla 4-2: Matriz morfológica asociada con las alternativas de diseño del prototipo

Descripción	Alternativas		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Elemento de extracción	Rejilla excavadora 	Pala de excavación 	Cuchilla lisa 
Elemento para la limpieza del tubérculo	Lámina perforada 	Rejilla a partir de barras corrugadas 	Rejilla tipo T 
Transmisión del movimiento	Cadena 	Engranajes 	Correa 

Tabla 4-2: Continuación

Tipo de accionamiento	Manual	Autopropulsada	De tracción animal/Tractor
Ruedas	Rueda de nylon con fibra de vidrio 	Lisa de metal 	Rueda con banda de goma 
Recubrimiento/ Acabado	Sin recubrimiento	Galvanizado	Pintado

Fuente: Elaboración propia. Imágenes tomadas de internet.

Dentro de las opciones presentadas, se destacan dos alternativas:

- Alternativa 1: Se selecciona la cuchilla, a partir de lámina delgada, como elemento para la extracción de la raíz tuberosa que la dirigirá hacia el elemento para la limpieza de la misma, que, en este caso se trata de una rejilla formada de varillas corrugadas, en la cual se dará lugar al desprendimiento de algunos elementos como tierra, hojas y hierba mediante las vibraciones propias del movimiento del equipo y que caerán al suelo producto de la gravedad. La cadena tendrá como finalidad de transmitir el movimiento realizado por las ruedas a la rejilla de modo que la batata vuelva nuevamente al suelo formando filas y le ayude al cosechador su recolección. La tracción se ha definido como de tracción animal y que se adapte a un tractor. Las ruedas se tomaron de goma y el acabado del prototipo sería galvanizado para garantizar su vida útil y evitar mantenimientos por la corrosión de los materiales.
- Alternativa 2: Se eligen las barras cortadoras para cumplir la tarea de extracción, con rejilla formada a partir de platinas (Rejilla tipo T), transmisión por engranajes, de tracción animal y/o tractor según lo definido, ruedas lisas de hierro y acabado pintado. Cada uno de los elementos detallados estaría en la capacidad de cumplir las mismas funciones que se explicaron en la primera alternativa.

En la Tabla 4-3 se indican las ventajas y desventajas de las alternativas preseleccionadas.

Tabla 4-3: Descripción de ventajas y desventajas para cada alternativa

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Alternativa 1	<p>Materiales de disponibilidad inmediata.</p> <p>Construcción relativamente fácil.</p> <p>La cuchilla puede ofrecer un buen rendimiento de extracción.</p> <p>Aumenta el tiempo en el reemplazo de partes por corrosión.</p> <p>Apto para todas las dimensiones de las batatas.</p> <p>Costos accesibles para todo tipo de agricultores.</p>	<p>La cuchilla puede presentar mayor desgaste.</p> <p>La cadena deberá ser ajustada regularmente de acuerdo con el uso que tenga el prototipo.</p> <p>Los costos, aunque asequibles, estarían ligeramente por encima que los costos de la segunda alternativa.</p>
Alternativa 2	<p>Materiales de disponibilidad inmediata.</p> <p>Construcción relativamente fácil.</p> <p>Apto para todas las dimensiones de las batatas.</p> <p>Costos accesibles para todo tipo de agricultores.</p>	<p>Dificultad para el armado de la rejilla tipo T.</p> <p>Las ruedas de hierro pueden sufrir de atascamiento en el terreno debido al peso del equipo.</p> <p>El mantenimiento es mayor debido al tipo de acabado de esta alternativa.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Para cerrar el criterio de diseño de la estructura física, el equipo propone una evaluación técnico-económica [14] (Tabla 4-4) de las alternativas. Al criterio de evaluación se le ha asignado un factor de importancia, definido de la siguiente forma:

- 1 para no accesible / no importante
- 2 para poco accesible / poco importante
- 3 para accesible / importante
- 4 para muy accesible / muy importante

Tabla 4-4: Valoración técnico-económica de las alternativas

Criterio a evaluar	Factor de importancia (F_i)	Puntaje para alternativas (P_a)		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Puntaje ideal
Rendimiento del prototipo	4	4	3	4
Costo de materiales	4	3	3	4
Costo de fabricación	4	3	3	4
Dimensión del prototipo	3	4	4	4
Tiempo de fabricación y ensamble de las partes	4	3	2	4
Vida útil de las partes	3	3	4	4
Mantenimiento del prototipo	4	3	2	4
Seguridad y ergonomía	4	4	4	4

Tabla 4-4: Continuación

Impacto ambiental	3	3	3	4
Limpieza del prototipo	2	4	2	4
Efectividad de arranque del tubérculo	4	4	2	4
Profundidad del labrado	4	3	3	4
$Total = \sum (F_i \cdot P_a)$		146	125	172
Porcentaje respecto del puntaje ideal		85%	73%	100%

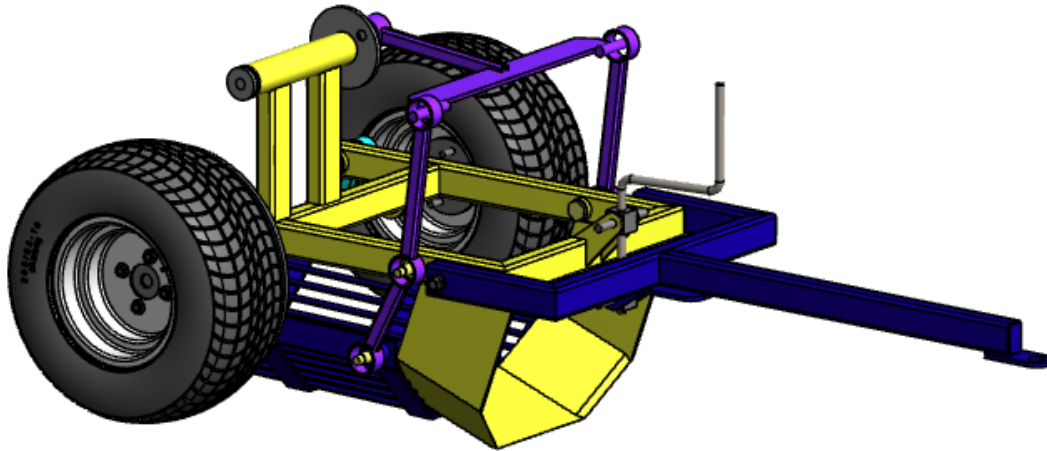
Fuente: Elaboración propia.

De esta evaluación, se obtiene un porcentaje del 85% para la alternativa 1, frente a un 73% para la alternativa 2, quedándose con el primer lugar como la mejor opción para el diseño del prototipo de arranque y traslado de batatas. Con base en la alternativa seleccionada, el equipo de trabajo toma este camino para proseguir con los cálculos teóricos, simulaciones y demás.

Siguiendo con el diseño a detalle del prototipo, este se desarrolla a través de un paquete de software como herramienta de gran capacidad para el diseño, análisis y simulación de componentes mecánicos. Un software para el diseño asistido por computadora (CAD) hace factible la producción de modelos tridimensionales sobre los cuales es posible calcular rápidamente las propiedades del modelo con resultados cercanos a la realidad y que, se integra a un software de simulación como los de análisis de elementos finitos (FEA).

Particularmente, el equipo de trabajo ha elegido a SolidWorks para tal fin, puesto que, integra un sinnúmero de funciones que abarcan desde el diseño hasta simulaciones y elaboración de planos a partir de la representación del modelo en 3D, análisis estructurales estáticos/dinámicos, eléctricos, de fluidos y térmicos, destacándolo como el instrumento ideal para cumplir el objetivo de este proyecto.

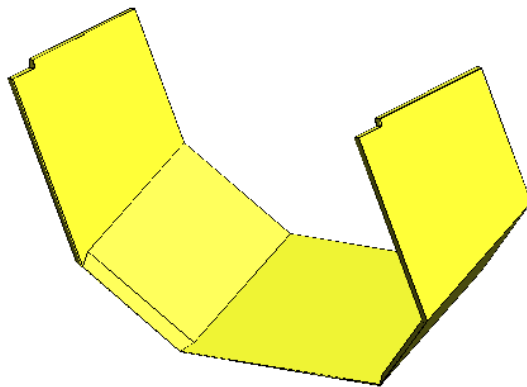
Figura 4-5. Modelo 3D del prototipo.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-6 se exhibe el primer elemento diseñado para el prototipo, se trata de la cuchilla extractora de batatas. Esta cuchilla se compone de lámina delgada de acero al carbono de calidad AISI 1045, material distribuido en Colombia, de buena soldabilidad y maleabilidad, lo que permite que pueda ser doblado de acuerdo con el requerimiento propio del proyecto. Se optó por una lámina de 6 mm de espesor, puesto que sus delgados bordes sirven a su vez de cuchilla, sin necesidad de ser afilada; del mismo modo, este espesor soporta la fuerza de corte sin alcanzar deformaciones que afectan la funcionalidad y el rendimiento del dispositivo.

Figura 4-6: Modelo tridimensional de la cuchilla.

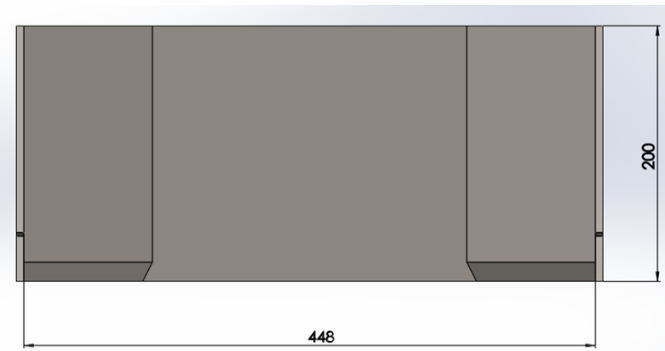


Fuente: Elaboración propia.

En lo concerniente a las dimensiones de la cuchilla como la longitud y ancho, el equipo se ha basado en las características morfológicas de la planta descritas, propiamente, la

longitud de las raíces para determinar la profundidad a la que debe llegar la cuchilla y extraer el producto íntegramente. Dicha profundidad es de hasta 200 mm y, se propone un ancho útil máximo de 448 mm (Figura 4-7).

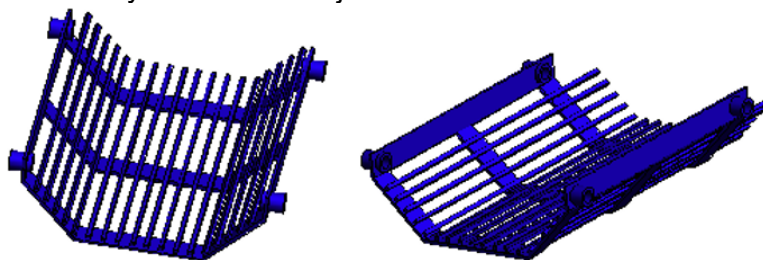
Figura 4-7: Dimensiones de la cuchilla



Fuente: Elaboración propia.

En segunda instancia, se analiza el elemento que recibe las batatas y les ofrece un lavado parcial, llamado por el equipo de trabajo, rejilla limpiadora del tubérculo (Figura 4-8), cuyo material es de estándar ASTM A-706, constituido por múltiples barras corrugadas de 1/4 pulgada de diámetro que se fijan soldadas a tres platinas de 6 mm de espesor. La parte se configuró en forma de canasta para evitar que el camote caiga al suelo por los laterales de la máquina y causando trabamiento de la misma.

Figura 4-8: Vistas lateral y frontal de la rejilla.



Fuente: Elaboración propia.

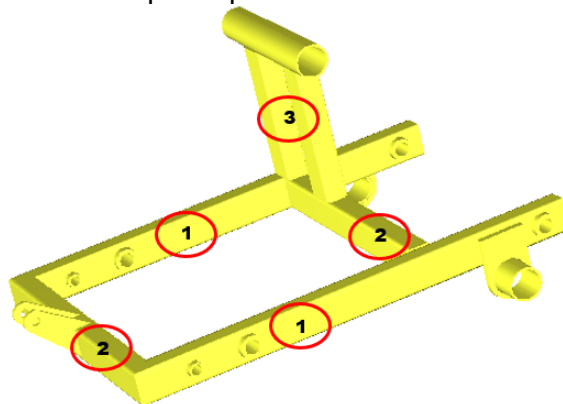
El tamaño de la rejilla viene dado, igualmente por la morfología vegetal, resaltando el hecho de que debe recibir por lo menos una de las plantas, que, aunque posean una altura de hasta 1 m, su tallo no está completamente erguido, sino que se arrastra por la tierra y, considerando que otro de los requisitos es que sea pequeño, liviano y fácil de transportar entonces se proyecta una la longitud máxima de 650 mm. El ancho y la profundidad de la

rejilla deben guardar relación con el ancho y profundidad de la cuchilla, 448 mm y 170 mm respectivamente.

Para determinar cuál debe ser la separación entre las barras de la rejilla, se hace necesario conocer la forma de las raíces reservantes o tuberosas, que se han mostrado en la Figura 4-3 y de las que se sabe, tienen un diámetro máximo de 200 mm. Por ende, las barras deben contar con un espaciamiento entre sí de 30 mm asegurando completamente la planta.

El chasis es otro elemento significativo en el diseño del prototipo. En la Figura 4-9 se aprecia esta pieza que consta de una serie de perfiles tubulares estructurales (PTE) en calidad estructural ASTM A-500 C, tanto rectangulares como redondos soldados entre sí y en los cuales estará soldada la cuchilla, se ubicará el eje de las ruedas y se conectarán algunos eslabones para transmitir el movimiento de las ruedas hacia la rejilla de tal forma que esta última pueda devolver las plantas arrancadas al suelo. Este consta de dos perfiles tubulares rectangulares de 700 mm de longitud y a los que se les denomina soportes principales (1), dos perfiles tubulares rectangulares llamados vigas secundarias (2) de 500 mm y dos tubos rectangulares de 270 mm cada uno como soportes del tubo circular (3) de 200 mm que protege al eje que transmite el movimiento hacia la rejilla.

Figura 4-9: Modelo del chasis del prototipo.

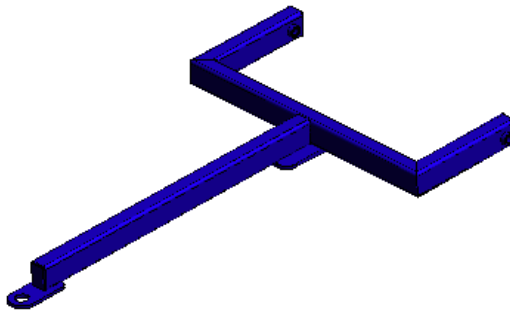


Fuente: Elaboración propia.

En el chasis, además se incluye el conjunto soldado de perfiles tubulares rectangulares que se acopla con el vehículo de tracción (Figura 4-10), que para este caso particular es, animal o tractor. La calidad de los perfiles tubulares es la misma para todos los perfiles con

las mismas características dimensionales. La longitud para cada uno de los brazos más cortos es de 270 mm, mientras que la viga que los une posee una longitud 620 mm y el brazo principal, 800 mm.

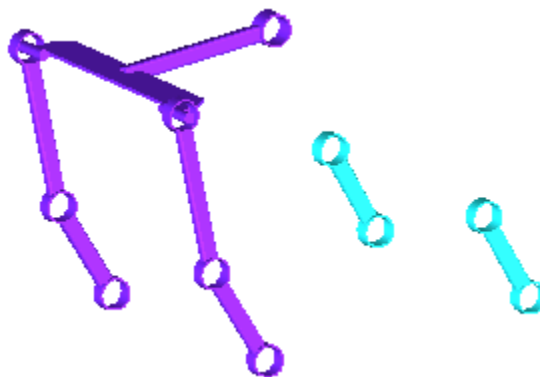
Figura 4-10: Conjunto soldado para la tracción del prototipo.



Fuente: Elaboración propia.

El conjunto de eslabones dispuestos en la Figura 4-11 son elementos formados a partir de láminas y/o platinas y tubos que se sueldan entre sí para facilitar la transmisión del movimiento. Se han situado estratégicamente para que sean capaces de llevar el movimiento realizado por las ruedas hacia la rejilla a fin de ejercer la función previamente descrita. Las calidades de los materiales son ASTM A-36 para las láminas y ASTM A-500 C para los tubos. Las longitudes de cada eslabón se muestran en los planos anexos a este trabajo.

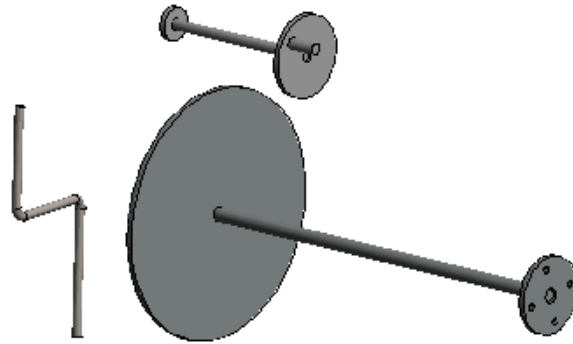
Figura 4-11: Eslabones para transmisión de movimientos principales.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, los ejes que hacen parte del diseño, obtenidos a partir de barras redondas en acero AISI 1045 (Figura 4-12).

Figura 4-12: Ejes para la transmisión de movimientos dentro del prototipo.



Fuente: Elaboración propia.

El recubrimiento elegido para las partes metálicas del prototipo es el galvanizado por inmersión en caliente, puesto que, da lugar a la unión intermetálica entre el zinc y el acero evitando que la abrasión y corrosión afecten a este último. La Asociación Americana de Galvanizadores (AGA) [55] promueve el GIC porque además de brindar protección al acero posee otras propiedades como costo inicial más bajo, durabilidad, longevidad, versatilidad, disponibilidad, sostenibilidad y estética.

Este recubrimiento es ideal para la máquina diseñada, ya que su principal material es el acero estructural, dispuesto en la cuchilla, rejilla y chasis, recomendado para recibir el tratamiento de galvanizado según la Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) [56].

Por otro lado, la Norma ISO 9223 [57], clasifica los ambientes valorando el lugar donde se localiza el elemento metálico y el número de años que puede durar el galvanizado dependiendo de ese lugar.

Los departamentos de Atlántico, Córdoba, Sucre y Bolívar ubicados en la Región Caribe presentan una clasificación C5 por estar dentro de zonas costeras con alta salinidad y humedad, por ello, según lo expresado en la Figura 4-13, fácilmente el galvanizado aseguraría una vida útil para la estructura de 10 a 20 años, sin ser efectuado ningún tipo de mantenimiento.

Figura 4-13: Clasificación de los ambientes de acuerdo con la Norma ISO 9223.

Clasificación	Descripción	Valoración corrosión por (Zn $\mu\text{m}/\text{y}$)	Característica de vida en el primer año de mantenimiento (85 μm Zn en HDG)
C1	Interior: seco	≈ 0.1	>200 +
C2	Interior: condensación moderada Exterior: rural	0.1 - 0.5	>170
C3	Interior: alta humedad, algunos contaminantes Exterior: ciudades mediterráneas o cercanas a la costa	0.5 - 2	42 - 170
C4	Interior: piscinas, plantas químicas etc. Exterior: ciudades industriales mediterráneas o costeras	2 - 4	21 - 42
C5	Exterior: ciudades industriales con alta humedad o alta salinidad costera	4 - 8	10 - 21

Fuente: ANDI.

4.1.3 Cálculos teóricos y modelado del prototipo

Una de las consideraciones de diseño más relevantes es asegurar que los componentes de una máquina o equipo se desempeñen adecuadamente sin presentar fallas de tipo estructural (debido a esfuerzos) o deformaciones que pongan en riesgo su funcionalidad y rendimiento. Por tal motivo, es trascendental analizar dichos esfuerzos y deformaciones para evitar que la máquina falle.

El primer elemento sometido a estudio es la cuchilla, de la cual se toman las dimensiones indicadas en el numeral llamado... Criterios para el diseño de la estructura física.. con el fin de hallar la carga máxima a la que estará es sometida. También, es imperativo conocer las características del suelo, mediante el coeficiente de labranza (CL) dado en la Tabla 4-5:

Tabla 4-5: Coeficientes de labranzas según el estado del suelo.

Estado del suelo	Coeficiente de labranza (CL) [kgf/dm ²]
Tierra muy suelta	30
Tierra suelta	30-40
Tierra mediana	40-60
Tendiendo a compacta	60-80
Tierra compactada	80-100

Fuente: Herrera, Miguel.

La batata se desarrolla mejor en suelos arenosos, de textura gruesa, sueltos, desmenuzables, granulados y con buen drenaje [58], por lo que el coeficiente de labranza a utilizar será para suelo suelto, máximo de 40 kgf/dm².

Con la ecuación 4-1 se procede a calcular la fuerza antes citada.

$$F = CL \cdot b \cdot l \quad (4-1)$$

Donde,

CL = Coeficiente de labranza [kgf/dm²]

b = Profundidad de la cuchilla [dm]

l = Ancho operativo de la cuchilla [dm]

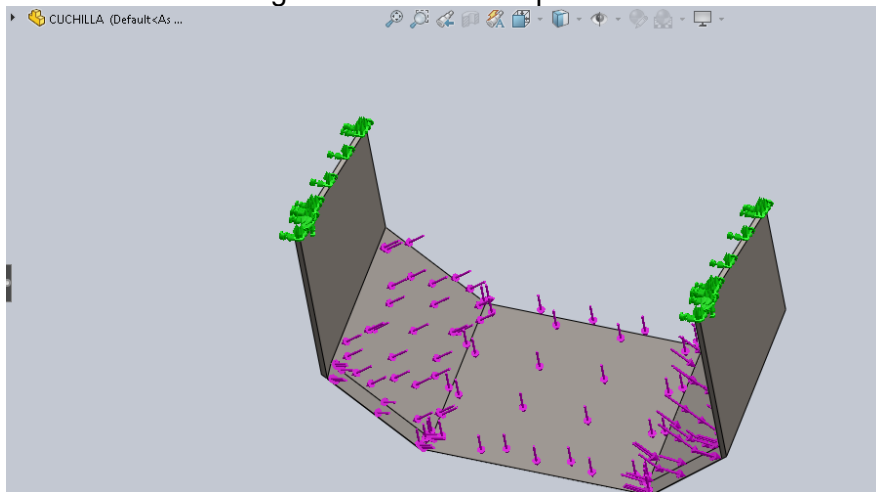
Remplazando los valores, se tiene que:

$$F = 40,00 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{dm}^2} \right] \cdot 2,00[\text{dm}] \cdot 4,48[\text{dm}] = 358,4 \text{ [kgf]} \cdot \frac{9,81 \text{ [N]}}{1 \text{ [kgf]}} = 3515,904 \text{ N}$$

En lo que se refiere al modelado, se hace uso del análisis de elementos finitos, así:

Se agrega la fuerza calculada anteriormente distribuida sobre la cara de la cuchilla (Figura 4-14), y se le agregan las dos sujeciones fijas, ya que esta lámina va soldada a la estructura principal.

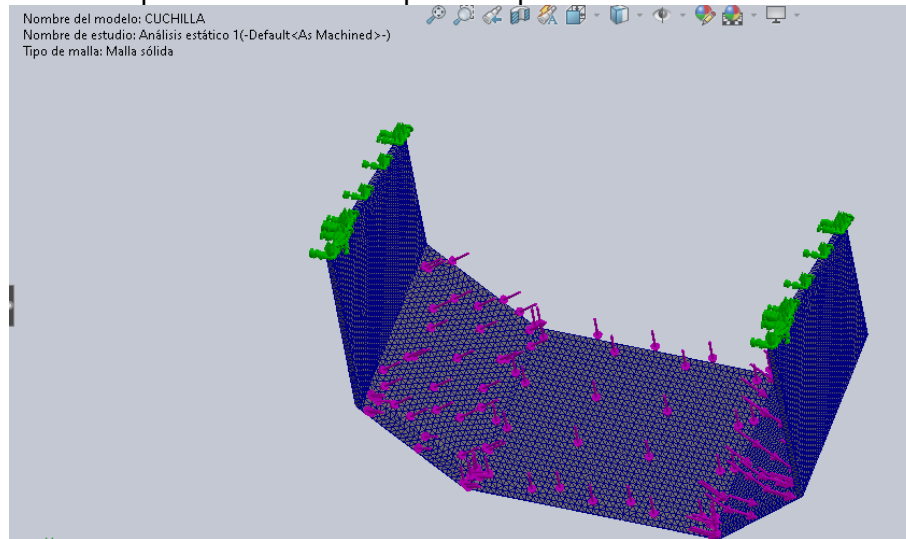
Figura 4-14: Distribución de cargas sobre la cara superior de la cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se genera la malla para el cálculo, en caso particular se eligió un tipo de malla fina lo que asegura una mayor precisión en los cálculos (Figura 4-15).

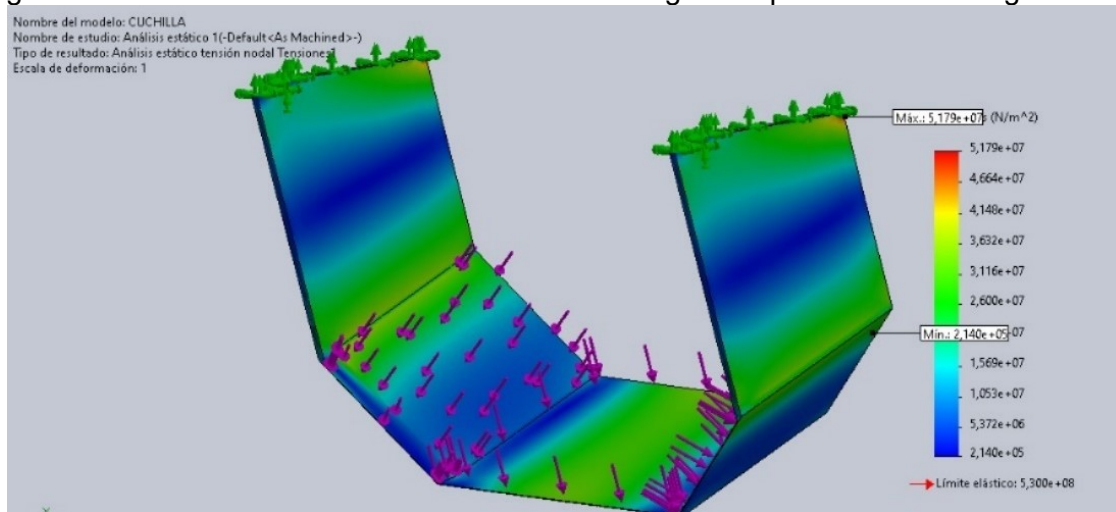
Figura 4-15: Malla aplicada a la cuchilla para la aplicación del estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Ahora, se procede a ejecutar el estudio y se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 4-16, en donde se puede evidenciar las tensiones de Von Mises mínima de $2,140 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$ y máxima de $5,179 \times 10^7 \frac{N}{m^2}$, inferiores al límite elástico del material $5,3 \times 10^8 \frac{N}{m^2}$.

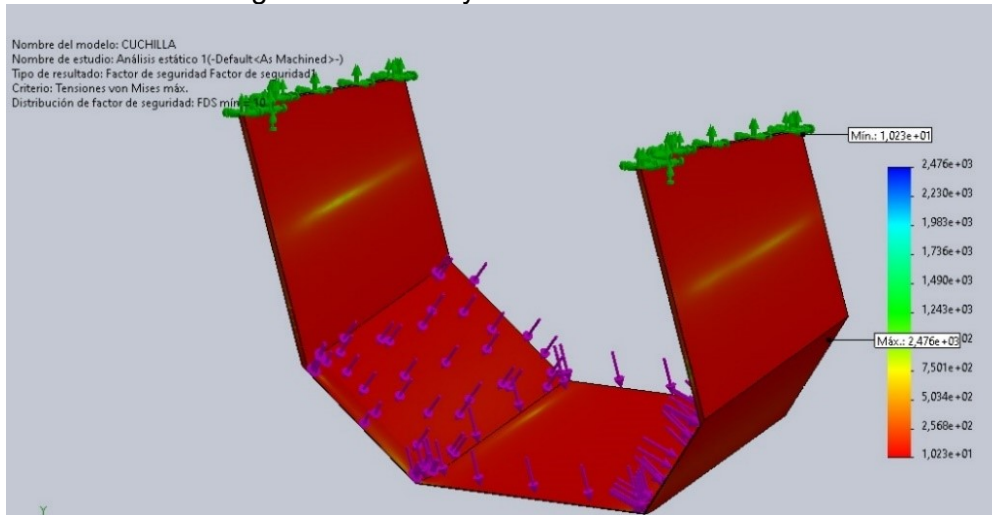
Figura 4-16: Tensiones de Von Mises alcanzadas según la aplicación de la carga.



Fuente: Elaboración propia.

El factor de seguridad se calcula basado en la resistencia del material AISI 1045 estirado en frío (Figura 4-17), cuyo valor mínimo es 1.

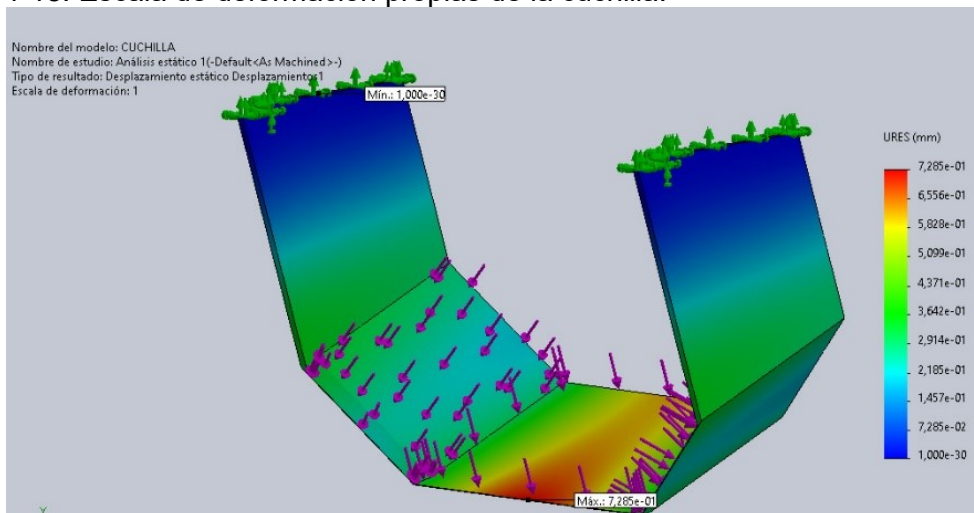
Figura 4-17: Factor de seguridad mínimo y máximo obtenido.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las deformaciones que sufre la cuchilla debido a la fuerza de corte, el valor máximo hallado es de 0,7285 mm (Figura 4-18), un valor despreciable que no afecta el rendimiento de la pieza

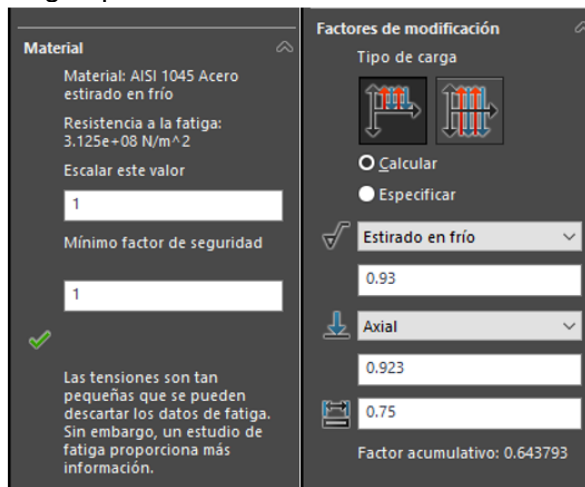
Figura 4-18: Escala de deformación propias de la cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

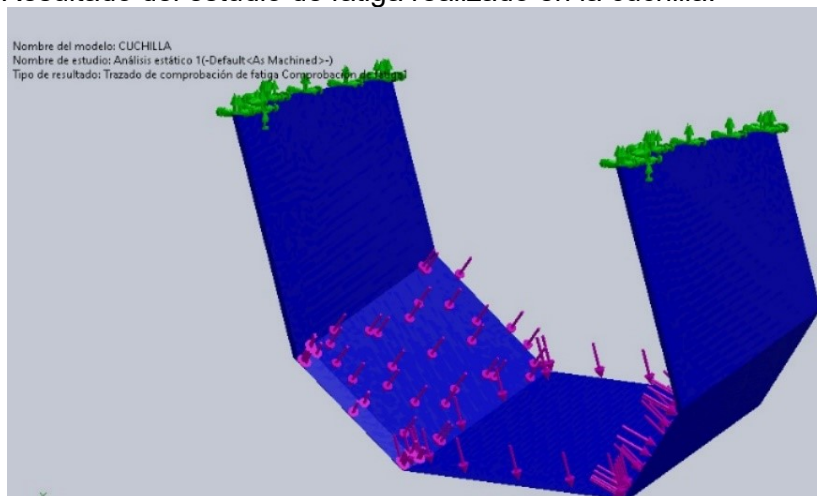
Se hizo una comprobación de fatiga con una variación de carga del valor máximo a cero (Figura 4-19), donde los valores de tensiones arrojados fueron insignificantes (Figura 4-20), por lo que se concluye que la cuchilla no fallará por cargas cíclicas.

Figura 4-19: Estudio de fatiga aplicado sobre la cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-20: Resultado del estudio de fatiga realizado en la cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la carga máxima que va a resistir la rejilla, nuevamente se emplea la ecuación 4-1 y al reemplazar las medidas de la cuchilla, se logra el resultado mostrado:

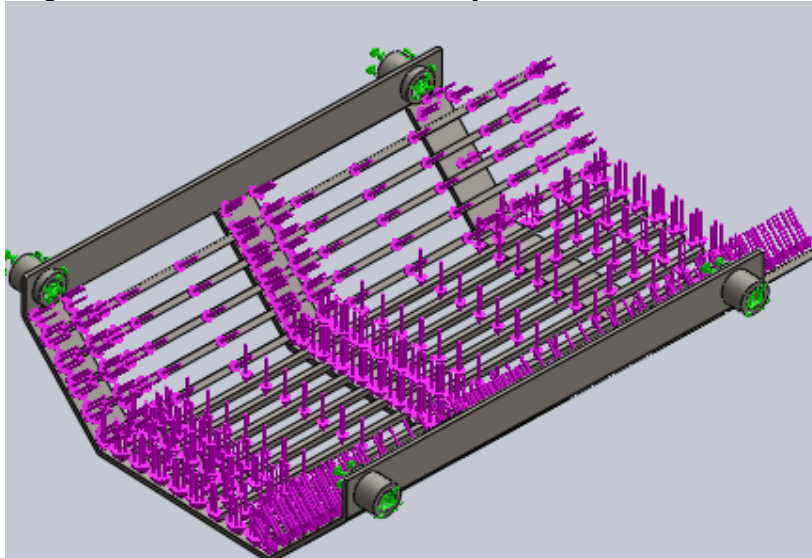
$$F = 40 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{dm}^2} \right] * 6,5[\text{dm}] * 4,48[\text{dm}] = 1164,8 [\text{kgf}] * \frac{9,81 [\text{N}]}{1 [\text{kgf}]} = 11426,68 \text{ N}$$

Para la comprobación de que esta carga no afectará la integridad ni el rendimiento de la rejilla, se agrega la fuerza calculada distribuida sobre la cara superior de la rejilla (Figura 4-21), y se le agregan las dos sujeciones fijas, puesto que el elemento va soldado a la estructura principal.

Igual que en el caso anterior, se selecciona una malla fina para garantizar que los resultados logrados por el programa sean más cercanos a la realidad.

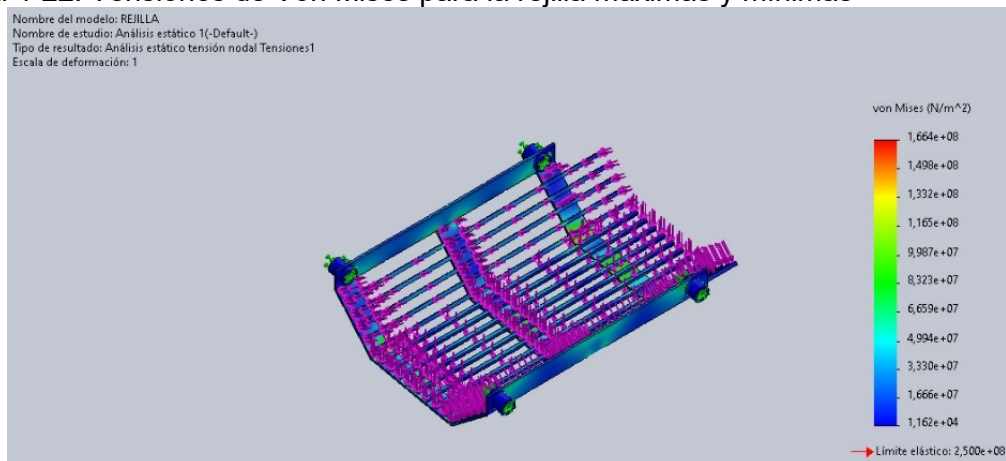
Las tensiones mínimas y máximas de Von Mises son $1,162 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ y $1,664 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ respectivamente (Figura 4-22), las cuales están por debajo del límite elástico del material, que corresponde a $2,5 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Figura 4-21: Carga máxima distribuida sobre la rejilla.



Fuente: Elaboración propia.

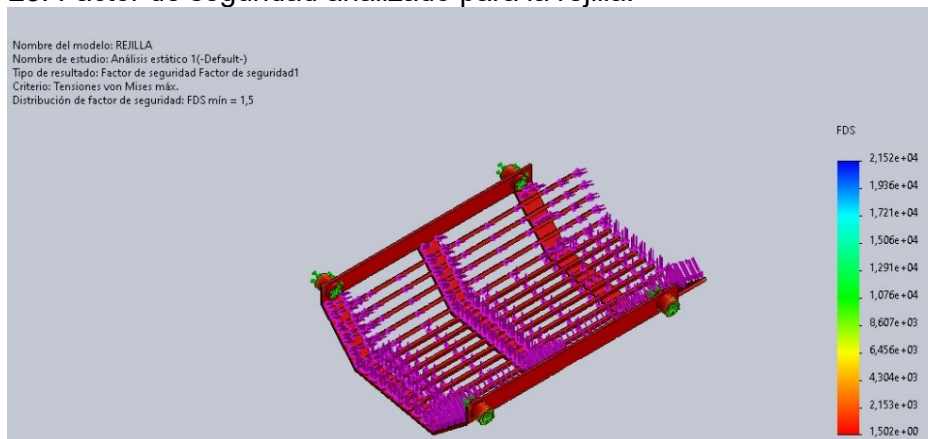
Figura 4-22: Tensiones de Von Mises para la rejilla máximas y mínimas



Fuente: Elaboración propia.

El factor de seguridad mínimo para la rejilla es de 1,5 (Figura 4-23), es decir, puede cargar 1,5 veces la carga operativa sin fallar.

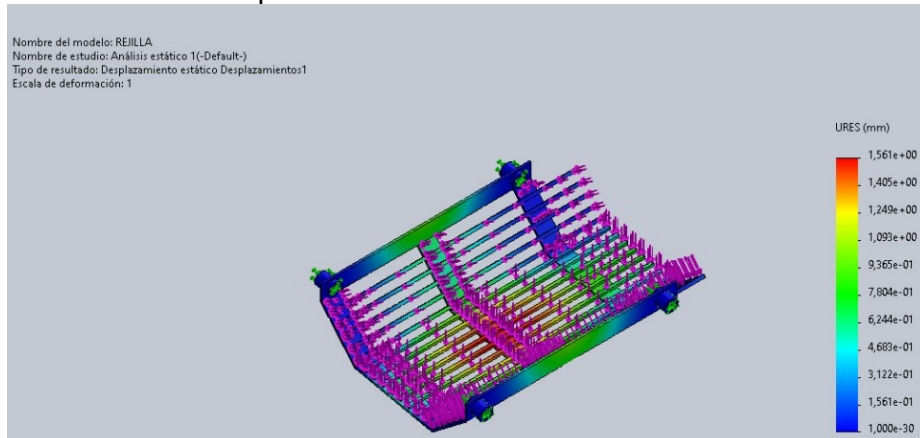
Figura 4-23: Factor de seguridad analizado para la rejilla.



Fuente: Elaboración propia.

Para las deformaciones de la cuchilla el valor máximo es de 1,561 mm (Figura 4-24).

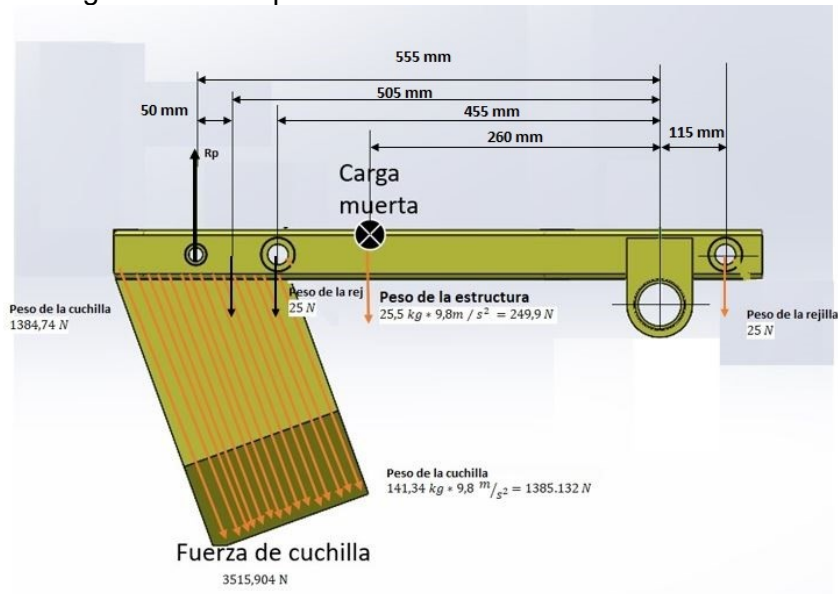
Figura 4-24: Deformaciones presentadas en la cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta el diagrama de cuerpo libre de la estructura teniendo en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre ella.

Figura 4-25: Diagrama de cuerpo libre del chasis.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los cálculos de los pernos, se procede a determinar la reacción en él cuando las cargas son máximas y mínimas.

Aplicando la sumatoria de momentos en las ruedas (Ecuación 4-2), se tiene que:

$$\sum M_{rueda} + U = 0 \quad (4-2)$$

$$-25 \cdot 0,15 + 250 \cdot 0,26 + 25 \cdot 0,455 - R_p \cdot 0,555 + 3515 \cdot 0,505 + 1384,74 \cdot 0,55 = 0$$

Despejando R_p , se obtiene que la carga máxima será:

$$R_p = 4090,6 \text{ N}$$

Ahora, se utiliza la sumatoria de momentos en las ruedas para hallar la carga mínima cuando la fuerza de la cuchilla es cero.

$$-25 \cdot 0,15 + 250 \cdot 0,26 + 25 \cdot 0,455 - R_p \cdot 0,555 + 1384,74 \cdot 0,55 = 0$$

La carga mínima es:

$$R_p = 1523,59 \text{ N}$$

Ahora bien, para el diseño del perno, se parte de estas cargas máximas y mínimas de reacción del perno. Cabe resaltar que se parte del supuesto de que el perno está sometido a esfuerzos cortantes, carga estática y dinámica.

$$\sigma_{AP} = \frac{V}{A} \Rightarrow \sigma_{perm} = 0,58S_y = 0,58 \cdot 1100 = 630 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{perm} = 630 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{aplicado} = \frac{4090,6 \text{ N}}{3,53 \text{ cm}^2 \frac{1 \text{ m}^2}{100^2 \text{ cm}^2}} = 11,58 \text{ MPa}$$

$$N = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{aplicado}} = \frac{630 \text{ MPa}}{11,58 \text{ MPa}} = 54,4$$

$$N = 54,4$$

Ahora bien, para el diseño del perno, partimos de las cargas máxima y mínima de reacción del perno.

Perno sometido a carga constante:

Cálculo de esfuerzo σ_p en función de $R_p L$ (ecuación 4-3).

$$\sigma_p = \frac{R_p L * D}{2I} \quad \therefore \quad I = \frac{\pi}{4} r^4 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{2}\right)^4 = \frac{\pi}{64} D^4 \quad (4-3)$$

$$\sigma_p = \frac{32R_p L}{\pi D^3} \quad \therefore \quad R_p = [R_{min}, R_{max}] \quad \therefore \quad R_{min} = 1525 \text{ N y } R_{max} = 4095 \text{ N}$$

$$R_{pm} = \frac{1525 \text{ N} + 4095 \text{ N}}{2} = 2810 \text{ N}$$

$$R_{pa} = 4095 \text{ N} - 2810 \text{ N} = 1285 \text{ N}$$

Como no hay torsión, entonces

$$T_a = T_m = 0$$

Por lo tanto, no hay cambio de geometría a lo largo del perno, la concentración de los hilos es despreciable, por ello $K_f = 1$.

Para el cálculo de fatiga del perno, se toma como referencia la información indicada en la Figura 4-26 y partiendo de los siguientes supuestos:

Figura 4-26: Especificación SAE para pernos de acero.

Grado SAE núm.	Intervalo de tamaños, inclusive, pulg	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
1	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Acero de bajo o medio carbono	
2	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	55	74	57	Acero de bajo o medio carbono	
		33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Acero de medio carbono, estirado en frío	
5	$1\frac{1}{8}$ a $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Acero de medio carbono, T y R	
		74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ a 1	85	120	92	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
7	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Acero de aleación de medio carbono, T y R	
8	$\frac{1}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Acero de aleación de medio carbono T y R	
8.2	$\frac{1}{4}$ a 1	120	150	130	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

1. Suposición
 - a. Perno grado 7 $S_{ut} = 133\text{Kpsi}$
 - b. El perno se maquinará en un torno.
 - c. Trabaja a temperatura ambiente.
 - d. Vida infinita
 - e. Confiabilidad 99.99%

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga (Se') (Ecuación 4-4) se utiliza la información relacionada en la Figura 4-27.

$$Se' = 0.5S_{ut} \quad (4-4)$$

$$Se' = 0.5 \cdot 133 \text{ kpsi} = 66,5 \text{ kpsi}$$

Figura 4-27:

$$\begin{array}{l}
 \text{aceros:} \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_e' \cong 0.5 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ S_e' \cong 100 \text{ kpsi (700 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \end{array} \right\} \\
 \\
 \text{hierros:} \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_e' \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \\ S_e' \cong 24 \text{ kpsi (160 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \end{array} \right\} \\
 \\
 \text{aluminios:} \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{f@5E8}' \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \\ S_{f@5E8}' \cong 19 \text{ kpsi (130 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \end{array} \right\} \\
 \\
 \text{aleaciones} \\
 \text{de cobre:} \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{f@5E8}' \cong 0.4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \\ S_{f@5E8}' \cong 14 \text{ kpsi (100 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \end{array} \right\}
 \end{array}$$

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

Para calcular los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, se evalúa lo siguiente:

Factor de superficie (K_a), para un acero maquinado o laminado en frío es el que se muestra en la Figura 4-28 y se calcula de acuerdo con la ecuación 4-5.

Figura 4-28: Factor de superficie de materiales con diferentes acabados superficiales.

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (4-5)$$

Reemplazando los respectivos valores, se tiene que:

$$k_a = 2.7 \cdot 133^{-0.265}$$

$$k_a = 0.74$$

En el caso del factor de carga, k_c se toma como referencia los valores de la Figura 4-29.

Figura 4-29: Factores de carga teniendo en cuenta los esfuerzos a los que se encuentra sometido el elemento.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

En cuanto al factor de temperatura, k_d , se escoge la temperatura a la cual estará trabajando el elemento, dada en la Figura 4-30

Figura 4-30: Efectos de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

Para el factor de tamaño, k_b se toma a consideración la información suministrada en la Figura 4-31.

Figura 4-31: Factor de tamaño para elementos sometidos a torsión y flexión.

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual

$$k_b = 1$$

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

Para el factor de confiabilidad, k_e , se toma el valor de confiabilidad del 99,99% Figura 4-32, de acuerdo con las suposiciones realizadas.

Figura 4-32: Factor de confiabilidad correspondiente a ocho desviaciones estándar porcentuales al límite de resistencia a la fatiga.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_σ	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

Nota: se desprecian los concentradores de esfuerzos en los hilos del perno.

$$\therefore A_{transv} \approx Cte$$

$$Se = Se' * 0,52$$

$$Se = 34,58 \text{ kpsi}$$

$$Se = 238 * 10^6 Pa$$

Resumiendo, los coeficientes escogidos:

$$k_a = 0,74, k_b = 1, k_c = 1, k_d = 1, k_e = 0,702$$

$$\rightarrow K = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e = 0,52$$

Se aplicó ecuación de ED-Goodman mostrada en la Figura 4-33, para esfuerzos medios y alternantes.

Figura 4-33: Ecuación de ED-Goodman

ED-Goodman

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\}$$

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

En esta ecuación se busca obtener el diámetro adecuado para el perno, así:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = \left[\frac{16n}{\pi} \left(\frac{2Ma}{S_e} + \frac{2Mm}{sut} \right) \right]^{1/3} \quad \therefore L = 127mm$$

$$M_a = 1287N * 127mm = 163,2 * 10^3 N \cdot mm$$

$$M_m = 2810N * 127mm = 356,9 * 10^3 N \cdot mm$$

$$n = 1,5 \rightarrow d = \left[\frac{24}{\pi} * 10^3 \left(\frac{2 * 163,2N \cdot mm}{237,9Mpa} + \frac{2 * 357N \cdot mm}{917Mpa} \right) \right]^{1/3} = 25,4$$

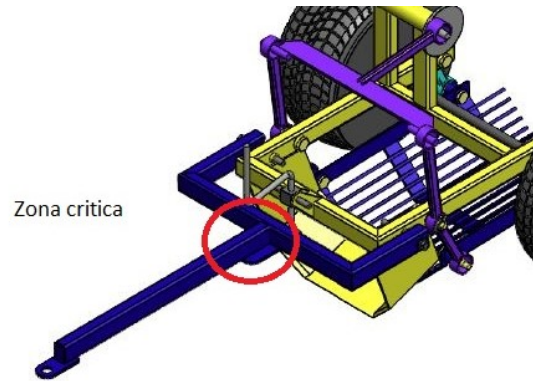
Tabla 4-6: Características del perno adecuado para el prototipo.

Perno grado	7
S_{ut} (kpsi)	133
Se'	66,5
$K = 0.702 \cdot K_a$	0,518
$Se = Kse$	34,5
d [mm]	1"

Fuente: Elaboración propia.

La zona crítica del prototipo sometida a esfuerzos de tracción es la señalada en la Figura 4-34, por lo tanto, se debe calcular la altura del cordón de modo que no se vea afectado al ser aplicadas las cargas.

Figura 4-34: Zona crítica del prototipo sometida a esfuerzos debido a soldadura.



Fuente: Elaboración propia.

La carga máxima es $V = 4090,6 N = 919,56 lb$

Figura 4-35: Propiedades torsionales de las soldaduras de filete.

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento polar unitario del área
	$A = 0.707 hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
	$A = 1.41 hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$A = 0.707H(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b+d)}$	$J_u = \frac{(b+d)^4 - 6b^2d^2}{12(b+d)}$
	$A = 0.707H(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b+d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b+d}$
	$A = 1.414H(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b+d)^3}{6}$
	$A = 1.414 \pi r$		$J_u = 2\pi r^3$

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

Entonces, el área de garganta es:

$$A = 1,414 h(2 + 2) = 5,626h$$

El esfuerzo cortante primario es viene dado por la ecuación 4-6:

$$\tau' = \frac{V}{A_s} \quad (4-6)$$

$$\tau'_y = \frac{919,56 \text{ lb}}{5,626h}$$

$$\tau'_y = \frac{163,44}{h}$$

$$M = 919.56 * 11,53$$

$$M = 10602,52 \text{ lb. in}$$

$$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d) \Rightarrow I_u = \frac{2^2}{6}(3(2) + 2) = 5,33 \text{ in}^2$$

$$I = 0,707h \text{ in} = 0,707h (5,33)$$

$$I = 3,77h$$

$$\tau''_x = \frac{M_{ry}}{I}$$

$$\tau''_y = \frac{M_{rx}}{I}$$

$$\tau''_x = \frac{10602,52 * 1 \text{ lb. in}}{3,77 h}$$

$$\tau''_x = \tau''_y = \frac{2812,39}{h}$$

$$\tau_e = \sqrt{(\tau'_y + \tau''_y)^2 + (\tau''_x)^2} = \sqrt{\left(\frac{163,44}{h} + \frac{2812,39}{h}\right)^2 + \left(\frac{2812,3}{h}\right)^2} = \frac{4094,45}{h}$$

Para la carga mínima, $V = 1525 \text{ N} = 342,83 \text{ lb}$

$$A = 1,414 h(2 + 2) = 5,626h$$

$$\tau'_y = \frac{342,83 \text{ lb}}{5,626h} =$$

$$\tau'_y = \frac{60,93}{h}$$

$$M = 342,83 \text{ lb} * 11,53 \text{ in}$$

$$M = 3952,83 \text{ lb.in}$$

$$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d) \Rightarrow I_u = \frac{2^2}{6}(3(2) + 2) = 5,33 \text{ in}^2$$

$$I = 0,707h \text{ in} = 0,707h (5,33)$$

$$I = 3,77h$$

$$\tau''_x = \frac{M_{ry}}{I}$$

$$\tau''_y = \frac{M_{rx}}{I}$$

$$\tau''_x = \frac{3952,83 * 1 \text{ lb.in}}{3,77 h}$$

$$\tau''_x = \tau''_y = \frac{1048,5}{h}$$

$$\tau_e = \sqrt{(\tau'_y + \tau''_y)^2 + (\tau''_x)^2} = \sqrt{\left(\frac{60,93}{h} + \frac{1048,5}{h}\right)^2 + \left(\frac{1048,5}{h}\right)^2} = \frac{1526,5}{h}$$

Figura 4-36. Propiedades de los electrodos usados para la unión de elementos.

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

*Sistema de numeración del código de especificaciones de la American Welding Society (AWS) para electrodos. En este sistema se usa como prefijo la letra E, en un sistema de numeración de cuatro o cinco dígitos en el cual los primeros dos o tres números designan la resistencia aproximada a la tensión. El último dígito incluye variables en la técnica de soldadura, como la fuente de corriente. El penúltimo dígito indica la posición de la soldadura, por ejemplo, plana, vertical o sobre la cabeza. El conjunto completo de especificaciones se puede obtener solicitándolo a la AWS.

Fuente: Budynas, Richard y Nisbett, Keith.

En este caso particular, el electrodo a utilizar es el E70XXX.

Estático

$$N = \frac{S_{sy}}{\tau} \Rightarrow N = \frac{0,588 S_y}{\tau} = \frac{0,588 * 57 \times 10^3 \text{psi}}{4094,45 \text{psi}} = 3$$

$$h = 0,36 \text{ in}$$

Ahora, se calcula el valor modificado por fatiga con la ecuación 4-7.

$$S_{se} = C_{carga} * C_{tamaño} * C_{superf} * C_{confiab} * C_{temperatura} * S_{e'} \quad (4-7)$$

$$S_{e'} = 0,5 * 482 \text{ Mpa} = 241 \text{ Mpa}$$

$$C_{tamaño} = 1$$

$$C_{carga} = 1$$

$$C_{superficie} = 272 * 582^{-0.995} = 0.48$$

$$C_{confiabilidad} = 0,659 \text{ a } 99,99$$

Reemplazando:

$$S_{se} = 1 * 1 * 0,48 * 0,659 * 1 * 241 \text{ MPa} = 76,23 \text{ MPa}$$

Luego, se hallan los esfuerzos máximo y mínimo:

$$\tau_{max} = 4094,45$$

$$\tau_{min} = \frac{2818,39}{\frac{5,62}{100}} = 5$$

Se calcula el esfuerzo alternante y medio:

$$\tau_{alterno} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = \frac{4094,45 - 5}{2} = 2044,7MPa$$

$$\tau_{medio} = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} = \frac{4094,45 + 5}{2} = 2049,7MPa$$

Se halla el factor de seguridad por fatiga (ecuación 4-8):

$$h = \frac{S_{Se} * S_{Su}}{\tau_{alt} * S_{Su} + \tau_{med} * S_{Se}} \quad (4-8)$$

Teniendo en cuenta que $S_{su} = 0.67S_{ut}$ para soldadura, se tiene:

$$S_{su} = 0,67S_{ut} = 0,67(60) = 40,2$$

Luego, reemplazando:

$$h = \frac{36.77 * 40.2}{2044.7 * 40.2 + 2049.7 * 36.7} = 3$$

$$3 = \frac{36.77x10^3 * 40.2x10^3}{\frac{2044.7}{h} * 40.2x10^3 + \frac{2049.7}{h} * 36.77x10^3}$$

$$h = 0,46 \text{ in}$$

La altura del cordón de soldadura debe ser de 0,46 in.

5. Resultados

5.1 Planos para la fabricación del prototipo

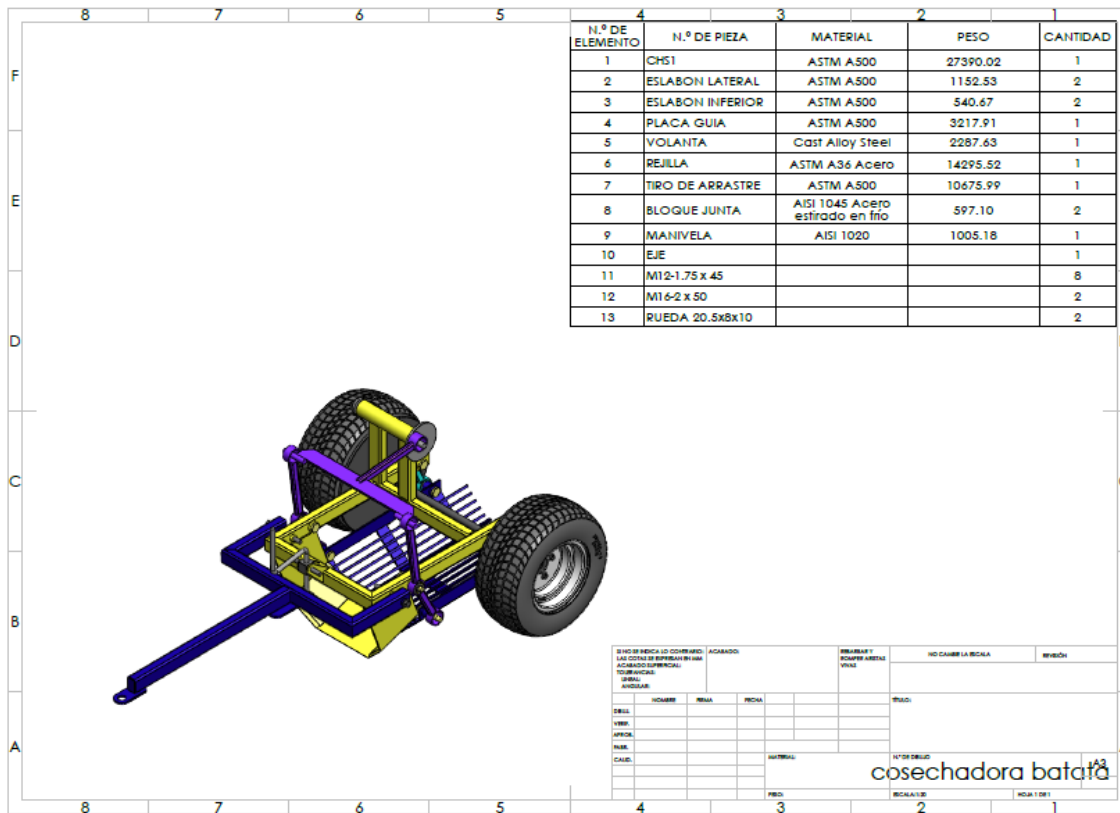
Uno de los resultados tangibles en la realización del proyecto son los planos para la fabricación y ensamble de los elementos que lo componen. Concretamente, un proyecto cuenta con tres clases de planos nombrados por la NTC 5832 [59] como sigue:

- Planos estructurales: Muestran la información básica del proyecto, entre ellas las dimensiones, características y disposición geométrica de los elementos y conexiones estructurales, listados de materiales.
- Planos de montaje: Sirven para el ensamble e instalación de los elementos en la obra, elaborados por el detallador a partir de las especificaciones técnicas, planos estructurales, estrategias y logística del montaje (ensamble).
- Planos de taller: Planos detallados de cada uno de los elementos que conforman la estructura, los cuales se usan para la fabricación de esta. Incluyen los detalles de todos los componentes del conjunto.

Concretamente, el trabajo posee sólo dos de los tipos de planos mencionados, pues los planos de taller contarán con toda la información descrita en el ítem de planos estructurales.

Los planos se desarrollaron en el software SolidWorks y son de la forma que se muestra en la Figura 5-1. Para efectos de no sobrecargar el documento, el lector podrá encontrarlos en la parte de los anexos, sección que lleva por título ...A. Anexo: Planos de taller y de montaje para el prototipo...

Figura 5-1. Plano de montaje del prototipo con listado de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

5.2 Evaluación de los costos asociados con el diseño del prototipo

Con el objeto de corroborar la viabilidad económica del producto diseñado, el equipo de trabajo ha realizado el análisis de precios unitarios (APU) con los precios en dólares estadounidense (USD) actualizados a la fecha de realización del mismo, el cual se resume en la Tabla 5-1.

Esta tabla consta de la descripción del material o servicio asociado con la fabricación del prototipo, cantidades, valor unitario y su valor total.

Tabla 5-1: Análisis de precios unitarios ligado a la fabricación y ensamble del prototipo.

Análisis de precios unitarios			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Lámina 6 mm AISI 1045	141,30 kg	\$ 1,21	\$ 138,30
Tubo estructural redondo de 2"X3 mm	3,38 kg	\$ 0,96	\$ 3,24
Tubo estructural rectangular de 60X40X3 mm	25,50 kg	\$ 0,96	\$ 24,48
Barra corrugada Ø3/8"	7,98 kg	\$ 0,71	\$ 5,66
Varilla lisa Ø5/8"	1,55 kg	\$ 0,71	\$ 1,10
Servicio de doblado de lámina	1 un	\$ 16,44	\$ 16,44
Servicio de soldadura de las piezas	1 un	\$ 54,79	\$ 54,70
Tornillería	12 un	\$ 0,27	\$ 3,24
Cadena	1 un	\$ 13,70	\$ 13,70
Kit de engranajes para la cadena	1 un	\$ 32,87	\$ 32,87
Ruedas de goma con rines	2 un	\$ 54,79	\$ 109,58
Servicio de galvanizado por inmersión en caliente	1 un	\$ 55,61	\$ 55,61
Total			\$ 458,92

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de las cantidades de materiales a usar, se efectúa un despiece del dispositivo, de la siguiente forma (Tabla 5-2):

Tabla 5-2: Despiece de materiales que componen el prototipo.

Tipo de material	Cant.	Long. [m]	Ancho [m]	Espesor [m]	Peso lineal [kg/m]	Peso total [kg]
PTE 60X40X3 mm	1	6,00			4,25	25,50
PTE 2"X3 mm	1	0,80			4,23	3,38
PL 6 mm	1	3,00	1,00	0,006	-	141,30
Barra redonda Ø3/8"	1	2,00			0,57	1,14
Varilla lisa Ø5/8"	1	1,00			1,55	1,55
Varilla corrugada Ø3/8"	2	6,00			0,57	6,84
TOTAL [kg]						179,72

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de material, las dimensiones y cantidades se adquieren del diseño del prototipo, mientras que el peso lineal específico para cada material se obtiene de las tablas del Manual de la construcción en acero del AISC vigente o en su defecto, de los diferentes catálogos de las empresas comercializadoras en Colombia. En el caso de la tubería

estructural, se utiliza el catálogo de Colmena o ACESCO, para las varillas corrugadas se usa el catálogo suministrado por Ternium o Steckerl Aceros S.A.

Respecto al peso de las láminas, la Norma Técnica Colombiana NTC 5832 [59] indica que el peso de las placas se calcula usando las dimensiones del rectángulo mínimo que incluya la misma. La ecuación 5-1 es la empleada para tal fin es:

$$P_m = V \cdot \delta \quad (5-1)$$

Donde P_m representa el peso, V el volumen y δ la densidad del acero, que, según la NTC 5832 es de 7850 kg/m^3 .

Volviendo al resultado del APU, se aprecia que el costo de fabricación aproximado del prototipo se acerca a \$ 458,92 USD, que, al ser comparado con algunos precios de cosechadoras en el mercado representa una disminución de 41,16% respecto de la cosechadora más económica encontrada (Tabla 5-3), justificando económicamente el diseño del modelo.

Tabla 5-3: Comparativo entre los costos del prototipo vs precios de máquinas disponibles en el mercado.

Descripción	Precios
Prototipo diseñado	\$ 458,92
Cosechadora de patatas/batatas marca Zhengzhou Pasen Machinery CO., LTD.*	\$ 780,00
Cosechadora de papas usada marca Standen*	\$ 60.000,00
Cosechadora de papas y raíces tuberosas autopropulsada marca Dewulf*	\$ 350.000,00

*El precio no incluye gastos de envío, impuestos de nacionalización y demás.
Fuente: Elaboración propia.

El precio de las cosechadoras fue tomado en dólares estadounidenses, sin embargo, para comparar y convertir a pesos colombianos (COP), el valor del peso al momento de efectuar este análisis corresponde a \$ 3.830,00 USD.

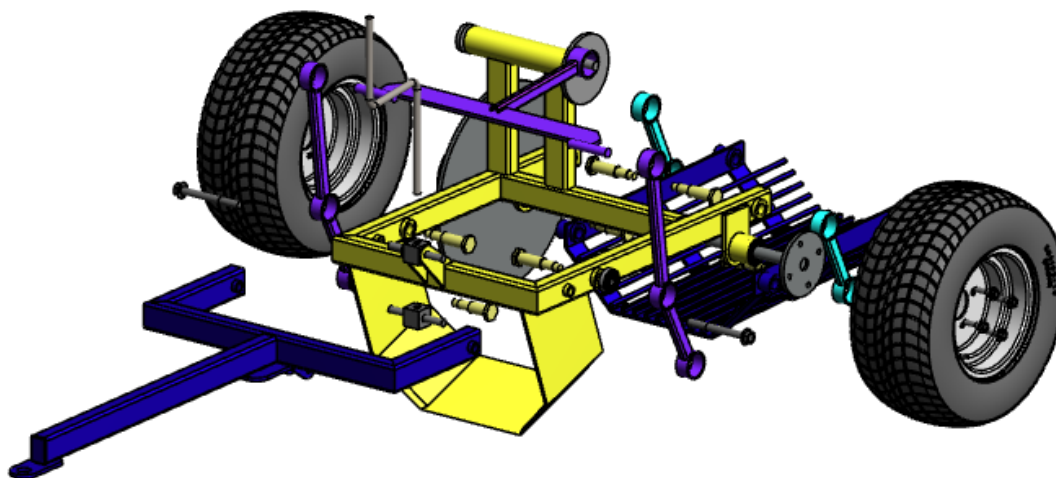
Cabe resaltar que el acabado propuesto por las compañías comercializadoras es pintado, que tiende a ser un poco más económico que el galvanizado por inmersión en caliente, sin embargo, esto requeriría realizar mayores mantenimientos de pintura para evitar que la corrosión deteriore al material.

5.3 Criterios para la implementación del prototipo

5.3.1 Instructivo para el ensamble y mantenimiento del prototipo

En la Figura 2-1 es posible observar el prototipo diseñado con cada uno de los elementos que lo componen. Por medio de esta figura es posible observar cómo irían ensamblados dichos elementos.

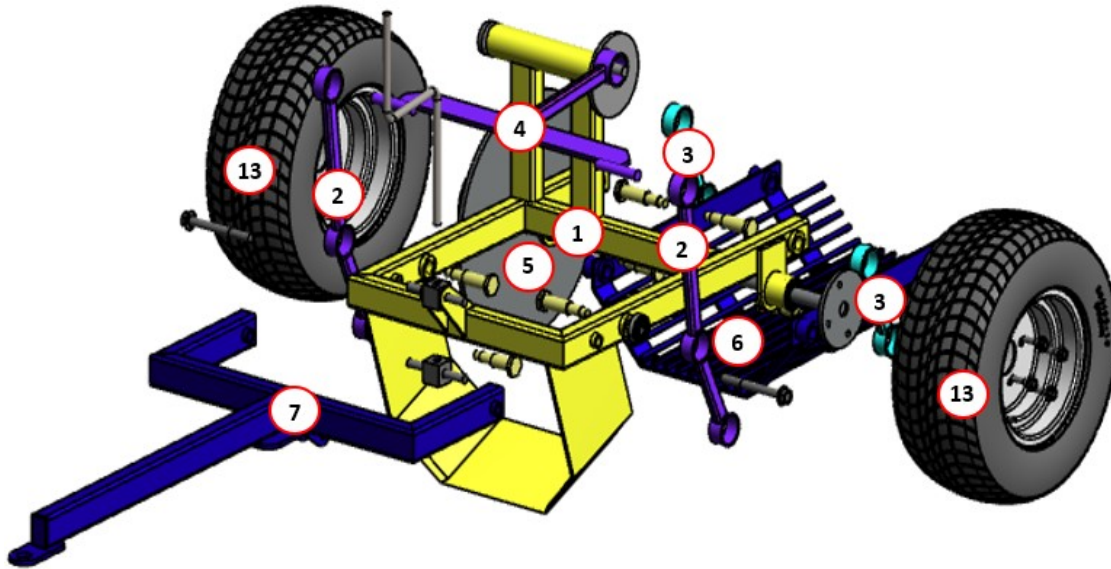
Figura 5-2: Vista explosionada del prototipo diseñado.



Fuente: Elaboración propia.

Para fines de su ensamble, el equipo de trabajo propone aplicar el siguiente instructivo, tomando como referencia la Figura 5-3:

Figura 5-3: Partes enumeradas del prototipo.



Fuente: Elaboración propia.

- Coloque el elemento 1, chasis principal sobre una mesa de montaje estable.
- Instale elemento 6 rejilla con los tornillos M12-1.75 x 45, utilice llave 19 mm para ajustarlos.
- Acople elemento 5 volanta con el elemento 10 eje, luego instale en el elemento 1 chasis principal.
- Acople elemento 2, eslabón lateral con elemento 4, placa guía, luego acople a la volanta utilizando tornillos M12-1.75 x 45.
- Instale el conjunto eslabón-placa guía en chasis y acople con la volanta.
- Acople elemento 3, eslabón inferior al elemento 6 rejillas y luego a volanta.
- Instale elemento 13 ruedas RUEDA 20.5x8x10 y ajuste los pernos.
- Instale elemento 7, tiro de arrastre, utilizando tornillos 1" x 5" y ajuste con llave 1-1/2".
- Instale elemento 9 manivelas.

6. Conclusiones

El trabajo de grado se centró en desarrollar el diseño de un prototipo de recolección de Ipomoea batatas L. de forma que facilitara las labores de cosecha a los pequeños productores. Teniendo en cuenta el objetivo propuesto, es posible concluir que este se cumplió a cabalidad, ya que, el equipo de trabajo diseñó tal prototipo cumpliendo las especificaciones y requerimientos señalados en la metodología seleccionada.

El prototipo diseñado posee la capacidad de extraer del suelo la raíz tuberosa de la planta, que se utiliza ampliamente en el mundo por sus valores nutricionales; de la misma manera, limpiar y devolver al suelo dicha planta formando hileras para que así el agricultor pueda recogerla sin realizar mucho esfuerzo físico.

La confiabilidad del equipo se comprobó mediante la aplicación de las teorías y simulaciones relacionadas con los cálculos de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad, al ser selectos materiales y accesorios que no superan los límites de fluencia permisibles, deflexiones que no influyan en su rendimiento, ni los esfuerzos concentrados en las partes críticas como la cuchilla, la rejilla limpiadora del tubérculo y el chasis. Dichos resultados, estuvieron a favor de las elecciones de diseño tomadas por el equipo de trabajo.

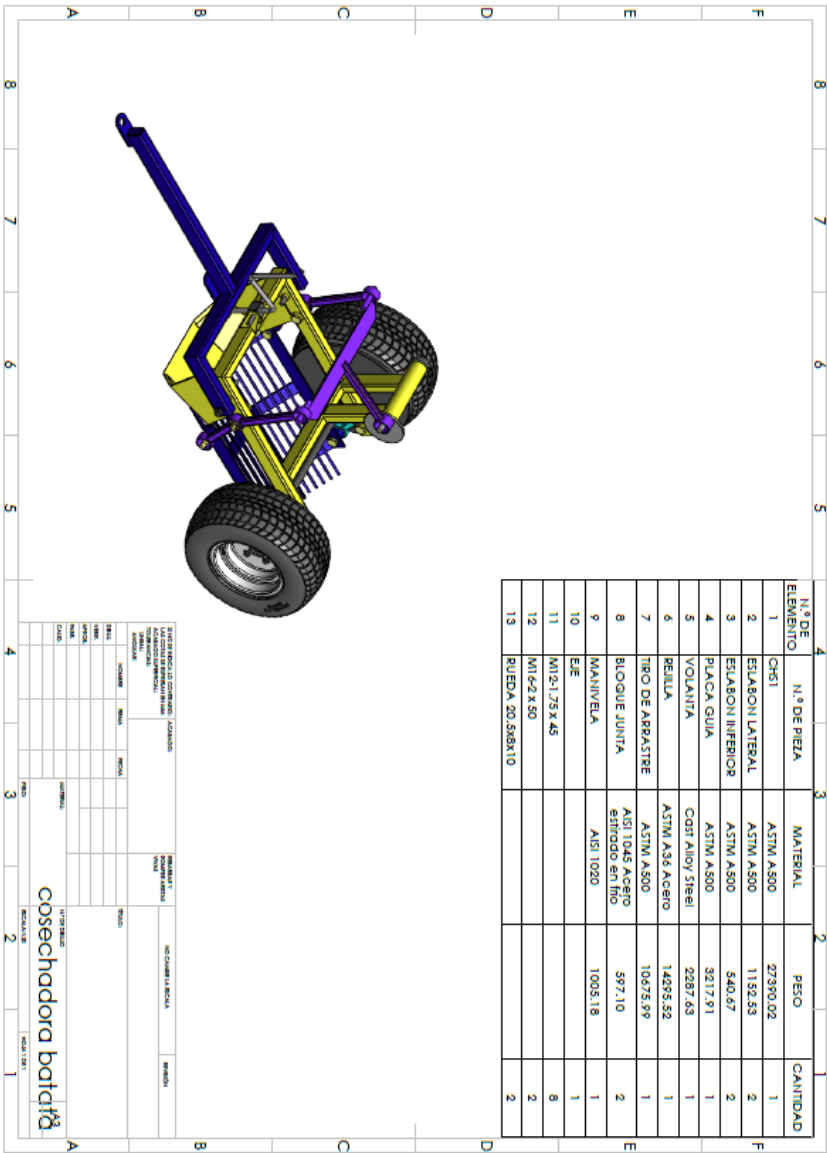
Los costos asociados con la fabricación de la máquina también han sido favorables, puesto que, tanto la materia prima como los procesos de transformación de la misma y sus accesorios son económicamente asequibles y se encuentran normalmente disponibles para ser aprovechados cuando el agricultor decida fabricarla.

Cabe resaltar que dicho trabajo conlleva a la combinación de diferentes líneas de trabajo dentro del programa de Ingeniería Mecánica, las cuales se complementan buscando llegar

al objetivo final. El diseño mecánico resultó ser la línea principal, pues, como bien lo expresa Budynas et.al. [47], el diseño busca formular un plan para la satisfacción de una necesidad específica o resolver un problema y, en el caso puntual de esta propuesta, se desea aumentar la productividad en la recolección de la batata con miras hacia su exportación. Además del diseño, es imperativo conocer las características y formas de fallas de los materiales comúnmente utilizados en la ingeniería para la fabricación de componentes o estructuras. El diseñador analiza si el material puede ser transformado manteniendo las tolerancias dimensionales adecuadas y de igual manera, si es compatible con las otras partes de un ensamble [60]. Por último y no menos importante, los procesos de manufactura que convierten la materia prima en productos terminados. Si bien, es una propuesta visiblemente de diseño, se debe tomar a consideración la geometría de las piezas para visualizar los tipos de procesos de transformación a los que debe someterse la materia prima para lograr el producto final [61].

Sintetizando, el proyecto en sí abre las puertas a la necesidad de seguir diseñando y creando máquinas que maximicen las buenas condiciones de trabajo en pro de los campesinos y agricultores de Colombia, que al no contar con las herramientas no pueden incrementar la productividad y rentabilidad de sus cultivos, se suprime la posibilidad de pensar en la exportación de sus productos y mucho menos, acceder a mayores oportunidades que les permita mejorar su calidad de vida.

A. Anexo: Planos de taller y de montaje para el prototipoⁱ.



Bibliografía

- [1] M. Nedunchezhiyan, G. Byju y S. K. Jata, «Sweet potato agronomy,» *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*, p. 10, 1 November 2012.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations, «FAOSTAT,» Food and Agriculture Organization of the United Nations, 15 Junio 2020. [En línea]. Available: Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Último acceso: Julio 2020].
- [3] International Potato Center, «Datos y difras del camote,» CIP, 15 diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://cipotato.org/es/programas-de-investigacion/camote/datosycifrasdelcamote/>. [Último acceso: Julio 2020].
- [4] L. M. Arrieta y K. M. Jiménez, «Caracterización de cuatro variedades de batata (*Ipomoea Batatas* Lam), cultivadas en la Costa Caribe Colombiana para su producción agroindustrial,» Univeresidad de Sucre, Sincelejo, 2017.
- [5] Sociedad de agricultores de Colombia, «Batata o papa dulce: una opción exportable para Colombia,» 2020.
- [6] A. Pantoja Guaitarilla, «Diseño y construcción de un prototipo de máquina cosechadora de papa en el municipio de Yacuanquer,» *Corporación Universitaria Autónoma de Nariño*, p. 6, 2018.
- [7] M. Á. Espinosa, «Desaparición de cultivos, una alerta en el campo de Colombia,» 15 julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/situacion-del-campo-en-colombia-millones-de-hectareas-sin-cultivar-387276>. [Último acceso: julio 2020].
- [8] Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, «Boletín Técnico. Encuesta Nacional Agropecuaria 2019,» 30 junio 2020. [En línea]. Available:

- dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/enda/ena/2019/boletin_ena_2019.pdf. [Último acceso: agosto 2020].
- [9] K. Vargas, «La agricultura colombiana en el contexto de la globalización,» *El campesino.co*, 7 marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/>. [Último acceso: julio 2020].
- [10] J. Cárdenas Pinzón y L. Vallejo Zamudio, «Agricultura y desarrollo rural en Colombia 2011-2013: una aproximación,» *Apuntes del CENES*, vol. 35, nº 62, p. 38, 2016.
- [11] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Desarrollo sostenible,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development.html>. [Último acceso: 26 septiembre 2020].
- [12] D. Prieto Poveda, «La tecnificación como herramienta para incrementar la actividad agropecuaria en Colombia,» Fundación Universidad de América, Bogotá, 2019.
- [13] E. Llatas Castro y J. Rodrigo Delgado, «Diseño de un complemento agrícola para la cosecha de papas del tipo monosurco para el motocultor DF-15L en el caserío Radiopampa-Cutervo,» Universidad Señor de Sipán, Pimentel, 2020.
- [14] Á. Quevedo Ríos, «Análisis y diseño de un apero cosechador de papas para el motocultor YTO DF-15L-MAGAP,» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2016.
- [15] E. Alciega Quinga, «Diseño y construcción de un apero para cosechar papas en campos agrícolas,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2017.
- [16] D. Olmos Puerto y L. Villamil Martínez, «Desarrollo de un artefacto que aumenta la productividad en procesos de siembra y/o cosecha de cultivos de papa en Chiquinquirá, Boyacá,» Universidad de la Salle, Bogotá, 2019.
- [17] A. Kakahy, D. Ahmad, M. D. Akhir, A. Ishak y S. Sulaiman, «Design and development of an Integrated Slasher (Pulverizer) for Sweet Potato Harvester: A Review,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2012.
- [18] L. Bao, Z. Dongxing y L. Jing, «Design on MZPH-820 Single-row Potato Harvester,» *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2009.
- [19] H. Lianglong, T. Lijia, H. Zhichao, J. Fulai, W. Bing y M. Biao, «Research design and test of 4GS-1500 type wide sweet potato harvester,» *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013.

-
- [20] J. Colgrave , «Potato harvester». Estados Unidos Patente US490596A, 24 enero 1893.
- [21] F. J. Parr, «Potato harvester». Estados Unidos Patente US2277450A, 1941.
- [22] N. J. Peturis, «Assembly line potato harvester». Estados Unidos Patente US4971155A, 1987.
- [23] E. Royneberg, «Potato harvester and method». Estados Unidos Patente USOO5083978A, 28 enero 1992.
- [24] K. Kalverkamp, «Potato harvester». Estados Unidos Patente US7958942B2, 14 junio 2011.
- [25] D. L. Johnson, M. Rizo, J. R. Schmidt, B. Stott y Z. Wesley Unrau, «Combine harvester and associate method for gathering grain». Estados Unidos Patente US9615511B2, 11 abril 2017.
- [26] John Deere, «Cosechadoras,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.deere.es/es/cosechadoras/>. [Último acceso: julio 2020].
- [27] Case IH, «Cosechadoras,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.caseih.com/emea/es-es/productos/harvesting>. [Último acceso: julio 2020].
- [28] Valtra, «Cosechadoras axiales serie 500C, simplicidad y capacidad de trabajo,» Agco, 2020. [En línea]. Available: <http://www.valtra.com.ar/index.php?q=cosechadoras-challenger>. [Último acceso: julio 2020].
- [29] New Holland, «Cosechadoras,» 2020. [En línea]. Available: <https://agriculture.newholland.com/lar/es-ar/equipos-maquinas/productos/cosechadoras/cr/modelos>. [Último acceso: julio 2020].
- [30] Dewulf, «Dewulf. Enjoy growing,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dewulfgroup.com/es/acerca-de-dewulf/>. [Último acceso: noviembre 2020].
- [31] Standen, «British engineered since 1846. Standen,» 2020. [En línea]. Available: <https://standen.co.uk/about-standen>. [Último acceso: noviembre 2020].
- [32] Real Academia Española, «Diseño,» Real Academia Española, 2020. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/dise%C3%B1o>. [Último acceso: septiembre 2020].

- [33] Real Academia Española, «Prototipo,» Real Academia Española, 2020. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/prototipo>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [34] T.-H. Mu y J. Singh, Sweet potato. Chemistry, processing and nutrition, Elsevier Inc., 2019.
- [35] Real Academia Española, «Parámetro,» Real Academia Española, 2020. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/par%C3%A1metro>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [36] Real Academia Española, «Máquina,» Real Academia Española, 2020. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/m%C3%A1quina?m=form>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [37] F. Beer, E. R. Johnston, J. DeWolf y D. Mazurek, Mecánica de Materiales, Ciudad de México: McGraw Hill.
- [38] Defensoría del pueblo. Colombia, «Derechos de los campesinos colombianos. Delegadas para asuntos agrarios y tierras,» 21 abril 2016. [En línea]. Available: https://www.defensoria.gov.co/public/pdf/Cartilla_derechos_de_los_campesinos.pdf. [Último acceso: septiembre 2020].
- [39] Presidencia de la República de Colombia, «Constitución Política de Colombia,» 1991. [En línea]. Available: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Documents/Constitucion-Politica-Colombia.pdf>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [40] Congreso de Colombia, «Ley 29 de febrero de 1990,» 29 febrero 1990. [En línea]. Available: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20183/ley_29_1990.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: septiembre 2020].
- [41] Ministerio de Agricultura. Colombia, «Ley 160 de 1994,» 5 agosto 1994. [En línea]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Leyes/Ley%20160%20de%201994.pdf>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [42] ISO/TC 23/SC 7 Equipment for harvesting and conservation, «ISO 8210:1989 Equipment for harvesting — Combine harvesters — Test procedure,» octubre 1989. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/15305.html>. [Último acceso: septiembre 2020].

-
- [43] Food and Agriculture Organization of United Nations, «FAO: Principios y Prácticas de Prueba y Evaluación de Máquinas y Equipos Agrícolas, Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO, series No. 1 y 2. FAO, Rome, 1984,» 1984. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/y5711s/y5711s0d.htm>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [44] A. Miranda, G. Valdés, C. Iglesias y Y. Lara, «Evaluación de la cosechadora de papas Ariguanabo-70 en las condiciones de la Empresa Cubaquivir,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 24, nº 4, p. 4, 2015.
- [45] C. Bernal, Metodología de la investigación, México, 2006.
- [46] J. Hurtado, Metodología de la investigación holística, Caracas, 2000.
- [47] R. Budynas y K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México D. F.: McGraw Hill, 2012.
- [48] Pro dintec, «Diseño para la fabricación y el ensamblaje,» [En línea]. Available: http://www.prodintec.es/attachments/article/272/fichero_15_4333.pdf. [Último acceso: septiembre 2020].
- [49] A. Bayoumi, Design for manufacture and assembly (DFMA): Concepts, benefits and applications, 2007.
- [50] C. Riba, Diseño concurrente, Barcelona, 2002.
- [51] SolidWorks, «SOLIDWORKS Student Design Kit,» Dassault Systems SolidWorks Corporation, 2020. [En línea]. Available: https://www.solidworks.es/sw/education/SDL_welcome.html. [Último acceso: septiembre 2020].
- [52] Asociación Latinoamericana del Acero, «Características del Acero,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.alacero.org/es/page/el-acero/caracteristicas-del-acero#:~:text=Punto%20de%20ebullici%C3%B3n%3A%20alrededor%20de,0%2C12%20mm%20de%20espesor..> [Último acceso: septiembre 2020].
- [53] Steckerl Hierros y Aceros S.A., *Catálogo de aceros estructurales más comerciales en Colombia*.
- [54] A. Sarceño Carillo, «Adaptabilidad de cultivares de camote (Ipomoea batatas) en Moyuta, Jutiapa,» Universidad Rafael Landívar, Jutiapa, 2015.

- [55] American Galvanizers Association, «Why specify galvanizing?,» American Galvanizers Association, 2020. [En línea]. Available: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/why-specify-galvanizing>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [56] Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), «Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente,» [En línea]. Available: <https://polyuprotec.com/wp-content/uploads/2017/06/Guia-Galvanizado-por-inmersi%C3%B3n-en-caliente.pdf>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [57] AENOR Confía, «ISO 9223:2012,» 27 enero 2012. [En línea]. Available: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/iso?c=053499>. [Último acceso: septiembre 2020].
- [58] L. Lago Castro, El cultivo de la batata: Una oportunidad agroalimentaria para pequeños productores de clima cálido., SENA - SAC, 2019.
- [59] NTC 5832:2012, «Practicas normalizadas para fabricación y montaje de estructuras en acero. Edificios y puentes.,» ICONTEC, 2012.
- [60] D. R. Askeland, Ciencia e ingeniería de los materiales, México: International Thomson Editores, 1998.
- [61] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: Pearson Educación, 2008.

ⁱ Puede consultar los planos originales y vista explosionada en el siguiente enlace <https://drive.google.com/drive/folders/1bZ7BxLJ-LXguwnu2cPLZiXOp0lvG0GuN?usp=sharing>