



Diseño y simulación de un prototipo de silla salvaescaleras de bajo costo para viviendas de personas con movilidad reducida

Santiago Perilla Vergara

20451813198

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2021

Diseño y simulación de un prototipo de silla salvaescaleras de bajo costo para viviendas de personas con movilidad reducida

Santiago Perilla Vergara

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

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ingeniero Karel Arencibia Ávila

Línea de Investigación:

El tema del proyecto se encuentra enmarcado en la línea de investigación de Diseño e Ingeniería de rehabilitación y discapacidad

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
“Diseño y simulación de un prototipo de silla
salvaescaleras de bajo costo para viviendas de
personas con movilidad reducida”,

Cumple con los requisitos para optar
el título de Ingeniero Mecánico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

	Págs.
Lista de Figuras.....	9
Lista de tablas.....	12
Resumen.....	12
Abstract.....	13
Introducción	14
Planteamiento del problema	17
Objetivos	19
Justificación.....	20
Metodología	21
1. Capítulo 1: Marco conceptual	24
1.1. Sistema salvaescaleras.....	24
1.2. Ventajas del sistema salvaescaleras	24
1.3. Tipos de salvaescaleras	25
1.3.1. Silla salvaescaleras	25
1.3.2. Plataforma salvaescaleras	26
1.3.3. Salvaescaleras vertical.....	27
1.4. Uso de silla salvaescaleras para el hogar	28

1.4.1. Especificaciones básicas de las sillas salvaescaleras.....	29
1.4.2. Componentes de la silla salvaescaleras	30
1.4.2.1. Sistema silla	30
1.4.2.2. Sistema de desplazamiento	37
1.4.2.3. Sistema de transmisión	41
1.4.2.4. Sistema de seguridad.....	42
Capítulo 2: Diseño del prototipo.....	44
2.1. Cálculos del sistema de transmisión.....	44
2.2. Especificaciones de diseño: primer prototipo	47
2.3. Especificaciones de diseño: segundo prototipo.....	55
3. Capítulo 3: Simulaciones del prototipo.....	64
3.1. Simulaciones primer prototipo	64
3.2. Simulaciones segundo prototipo	73
3.3. Simulaciones de costos del prototipo	85
4. Conclusiones y recomendaciones.....	87
4.1. Conclusiones	87
4.2. Recomendaciones.....	91
Referencias Bibliográficas.....	92
Anexos	95
a. Anexo 1: Planos de diseño del primer prototipo.....	95
b. Anexo 2: Planos de diseño del segundo prototipo	99

Lista de Figuras

Figura 1. Silla Salvaescalera	15
Figura 2. Modelo silla salvaescaleras	26
Figura 3. Modelo plataforma salvaescalera	27
Figura 4. Modelo salvaescaleras vertical	28
Figura 5. Soporte de estructura de silla.....	31
Figura 6. Estructura de la silla salvaescalera	31
Figura 7. Soporte-estructura asiento.	32
Figura 8. Asiento de la silla.	33
Figura 9. Soporte reposabrazos y reposabrazos.....	33
Figura 10. Soporte para piernas.	34
Figura 11. Soporte de reposapiés.	35
Figura 12. Reposapiés con resorte	35
Figura 13. Cinturones de seguridad.	35
Figura 14. Caja trasmisora	36
Figura 15. Dimensiones de una silla salvaescaleras en mm	37
Figura 16. Sistema piñón-cremallera	38
Figura 17. Riel de desplazamiento.....	38
Figura 18. Patas de apoyo.	39
Figura 19. Carro para desplazamiento de silla.....	40
Figura 20. Cremallera de sistema piñón-cremallera	40

Figura 21. Motor trifásico.....	41
Figura 22. Sistema de engranaje.....	42
Figura 23. Esquemático silla salvaescaleras.....	45
Figura 24. Ensamblaje de caja de transmisión prototipo 1.....	50
Figura 25. Ensamblaje prototipo 1.....	50
Figura 26. Asiento prototipo 2.....	56
Figura 27. Espaldar prototipo 2.....	57
Figura 28. Estructura prototipo 2.....	58
Figura 29. Soporte reposabrazos prototipo 2.....	59
Figura 30. Reposabrazos prototipo 2.....	59
Figura 31. Conexión reposapiés prototipo 2.....	60
Figura 32. Reposapiés prototipo 2.....	61
Figura 33. Alojamiento del motor.....	61
Figura 34. Ensamblaje segundo prototipo.....	62
Figura 35. Número de nodos del mallado prototipo 1.....	65
Figura 36. Configuración de la malla prototipo 1.....	66
Figura 37. Asignación de carga y magnitud prototipo 1.....	67
Figura 38. Diagramación de carga y magnitud prototipo 1.....	68
Figura 39. Análisis de Von Mises prototipo 1.....	70
Figura 40. Análisis de seguridad prototipo 1.....	72
Figura 41. Análisis de desplazamiento prototipo 1.....	73
Figura 42. Malla prototipo 2.....	75
Figura 43. Restricciones para el ensamblaje prototipo 2.....	76

Figura 44. Dirección fuerza sobre la pieza asiento.	77
Figura 45. Asignación de carga y dirección para asiento.	78
Figura 46. Dirección fuerza sobre reposapiés.	78
Figura 47. Asignación de carga y dirección para reposapiés.	79
Figura 48. Análisis del coeficiente de seguridad prototipo 2.	84

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de especificaciones y modelos en el mercado de sillas salvaescaleras.....	18
Tabla 2. Metodología del proyecto.	22
Tabla 3. Especificaciones de diseño básicas para el desarrollo de sillas salvaescaleras....	29
Tabla 4. Piezas del primer prototipo.	49
Tabla 5. Características piezas primer prototipo.....	52
Tabla 6. Especificaciones de los engranajes.	54
Tabla 7. Resumen de resultados simulaciones prototipo 1.	68
Tabla 8. Propiedades mecánicas el acero AISI 1018 209 RT.....	75
Tabla 9. Propiedades mecánicas del plástico ABS	76
Tabla 10. Resumen de la simulación realizada para la región del reposapiés para una persona de 75 Kg.	80
Tabla 11. Resumen de la simulación realizada para la región del asiento para una persona de 75 kg.....	81
Tabla 12. Estimación de costos generales.....	85

(Dedicatoria)

“Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

Agradecimientos

El presente proyecto de grado es la consecuencia de mi esfuerzo y dedicación junto con la cooperación recibida por las diferentes personas involucradas y por la institución universitaria correspondiente. Con esto en mente, se da un enorme agradecimiento a mi asesor de tesis Karel Arencibia Ávila, a la facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB), y a todo el personal académico y administrativo de la Universidad Antonio Nariño (UAN), ya que con su sabiduría y enseñanza han contribuido a mi formación académica como Ingeniero Mecánico. Por último, dedico este trabajo en especial a mis padres, por haberme proporcionado la mejoreducación y muchas lecciones a lo largo de mi vida, las cuales actualmente reflejan mis acciones como persona.

Resumen

En Colombia, aproximadamente el 12% de la población tiene alguna condición de discapacidad. En el departamento del Huila, se registran un promedio de 72 mil personas diagnosticadas. Estas personas, tienen limitación de movilidad especialmente en los hogares, debido a que estos no se ajustan a sus necesidades físicas, pero sobre todo porque no existen en el mercado actual sillas salvaescaleras, de bajo costo.

El propósito de este trabajo es diseñar y simular un prototipo de silla salvaescaleras de bajo costo, dirigido a colombianos y principalmente a opitas que se encuentran en condiciones de discapacidad. La metodología utilizada para la investigación comprendió el estudio en la literatura de las principales características de funcionamiento, componentes y aportes existentes en este tipo de tecnología. Seguidamente, se desarrolló el proceso de diseño utilizando los softwares Inventor y Fusion 360. Por último, se realizaron diferentes simulaciones entre las cuales están: análisis de carga, tensión de Von Mises, análisis de seguridad y análisis de desplazamiento, obteniéndose una silla salvaescaleras que soporta las cargas y tensiones máximas establecidas, así como un producto sencillo, seguro, resistente y de bajo costo.

Palabras clave: silla salvaescaleras, bajo costo, motor trifásico, CAD 3D, piñón-cremallera.

Abstract

In Colombia, approximately 12% of the population has a disability condition. In the department of Huila, an average of 72 thousand diagnosed people are registered. These people have limited mobility especially in homes because they do not adjust to their physical needs, but above all because there are no low-cost stairlifts in the current market.

The purpose of this work is to design and simulate a low-cost stairlift prototype, aimed at Colombians and mainly “opitas” who are in conditions of disability. The methodology used for the research included the study in the literature of the main operating characteristics, components, and existing contributions in this type of technology. Next, the design process was developed using the Inventor and Fusion 360 software. Finally, different simulations were carried out, among which are: load analysis, Von Mises stress, safety analysis and displacement analysis, obtaining a stairlift that it supports the maximum loads and voltages established, as well as a simple, safe, resistant, and low-cost product.

Keywords: chair stairlift, low cost, three-phase motor, 3D CAD, rack and pinion.

Introducción

La movilidad reducida es la restricción que tienen algunas personas para el desplazamiento debido a una discapacidad o limitación de relacionarse con el entorno, al tener que realizar actividades tales como acceder o moverse dentro de un espacio, subir o bajar escaleras, alcanzar objetos en alturas normales, etc (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013).

En términos estadísticos, un 15% de la población mundial vive con algún tipo de discapacidad (OMS, 2011), y las personas con mayor probabilidad de presentar estos problemas son los adultos mayores, en donde actualmente, a nivel mundial, un 60.3 % de estos tiene algún problema de movilidad limitada (Tural, Lu & Cole, 2020). A nivel de Colombia, aproximadamente el 12% de la población tiene alguna condición de discapacidad y las cifras aumentan cuando se trata de problemas de movilidad limitada general, como el uso de bastón o altos dolores en las articulaciones (Vásquez, s.f).

Asimismo, en el departamento del Huila, han sido incluidas más de 72 mil personas (aproximadamente el 7% de la población) con discapacidad en el registro de localización y caracterización, en donde 7.700 aproximadamente pertenecen a la ciudad de Neiva (Castaño, Parga & Viveros, 2005). Con esto se puede evidenciar, que el porcentaje poblacional de personas con problemas de discapacidad no es tan alto siendo en Colombia del 12%, en el Huila del 7% y en Neiva del 2%. Sin embargo, es una situación que las entidades públicas han abandonado, convirtiendo a los discapacitados en una población discriminada, que necesita una mejora en su calidad de vida.

Ahora bien, todas las situaciones mencionadas anteriormente se vuelven aún más complicadas en la actividad cotidiana dentro del hogar. La mayoría de los hogares no se ajustan a

las necesidades físicas de los discapacitados, ya que, muchas veces las construcciones de casas están conformadas por dos pisos, en donde las escaleras se convierten en un gran obstáculo para la independencia y también están asociadas con una de las causas más comunes de caídas y muertes en adultos mayores y discapacitados (Collins & Smith, 2003).

Por esta razón, las personas con discapacidad tienden a depender de terceros para poder disfrutar de todos los rincones del hogar, o simplemente deben instalarse en un primer piso (Tural, Lu & Cole, 2020). Para solucionar este problema, actualmente existen varios productos en el mercado, entre los cuales se encuentran las sillas salvaescaleras. Las sillas salvaescaleras (figura 1) proporcionan un medio adecuado para ir de un piso a otro con seguridad para las personas con discapacidad, sin necesidad de ayuda de un tercero.

Entonces, estas sillas se convierten en un medio apropiado para transformar el hogar del usuario y su independencia dentro de él (Collins & Smith, 2003). Sin embargo, estos productos presentes en el mercado colombiano poseen actualmente precios bastante elevados debido a todo el proceso de diseño e instalación que contienen, lo cual los hace poco accesibles a los usuarios.



Figura 1. Silla Salvaescalera
(Elevadores centroamericanos INT, 2018).

A partir de lo anterior, el propósito de este trabajo se basa en diseñar y simular un prototipo de una silla salvaescaleras de bajo costo, dirigido a colombianos y principalmente opitas, que requieran de este dispositivo en sus viviendas debido a que presentan una limitación de movilidad. Entre sus características se encuentran el desarrollo de una silla salvaescalera con ergonomía cómoda y sencilla, además de ser una silla accesible al ser de bajo costo, fácil de usar y de instalación rápida.

Planteamiento del problema

Las sillas salvaescaleras presentes en el mercado tienen precios que van desde los 40 millones hasta los 100 millones de pesos debido a sus diferentes características. A manera de ejemplo, se encuentra la empresa Stannah que es una de las más reconocidas en ventas de sillas salvaescaleras a nivel mundial (Stannah, 2019). Esta empresa diseña dos tipos de sillas salvaescaleras: de tramos rectos y de tramos curvos.

La capacidad de carga que tienen estas sillas es de 130 kg a 160 kg para tramos rectos y de 120 kg a 135 kg para tramos curvos. Generalmente son pegadas al peldaño de la escalera y se componen de una batería de 24V. Además, trabajan a una velocidad de 0,1m/s. Adicional a esto, están compuestas de una cantidad de accesorios tecnológicos que aumentan los costos, entre los cuales están: sensores de seguridad para detección en caso de obstrucción, carril retráctil, reposapiés eléctrico plegable, cinturones de seguridad avanzados de forma retráctil y con sistema inmovilizador, controles para mover la silla, bloqueo con llave para evitar el uso no autorizado, y asientos hidráulicos con características y acabados personalizados al gusto del cliente (Stannah, 2019).

Todas las características tecnológicas mencionadas, generan precios de fabricación, venta e instalación bastante elevados de las sillas salvaescaleras, y esto ocurre con la mayoría de las empresas presentes en el mercado colombiano actualmente.

Por ejemplo, en la siguiente tabla (Tabla 1) se muestra la cotización realizada por dos empresas de venta de sillas salvaescaleras en Colombia: **Stannah y Protor Mobility**.

Tabla 1. Comparación de especificaciones y modelos en el mercado de sillas salvaescaleras.

	Stannah	Protor
Tipo de escalera	Curva	Curva
Presupuesto desde	39'000.000 COP	10779 USD
Fabricación	Ensamblada en Colombia	Importada
Peso máximo	100kg	137kg
Alimentación	Batería 24V	Batería 24V
Garantía	12 meses	12 meses

Ahora bien, la mayoría de la población discapacitada en Colombia no tiene la capacidad monetaria para gastar una alta cantidad de dinero en una silla salvaescaleras como las mencionadas (únicamente las personas que viven en estratos altos pueden acceder a estos productos). Esto debido a que según estadísticas hechas por la fundación Saldarriaga Concha, el 55.6% de las personas con discapacidad en Colombia ni siquiera asiste a servicios de rehabilitación debido a problemas fundamentalmente de tipo económico (Correa & Castro, 2016). A partir de lo descrito, la problemática del proyecto se resume en que las sillas salvaescaleras fabricadas y vendidas por diferentes empresas en el mercado colombiano, poseen precios de venta que sobrepasan los 40 millones de pesos, a causa de los diferentes accesorios tecnológicos que contienen y al complejo proceso de instalación. Es por ello que se considera necesario diseñar un prototipo de silla salvaescaleras que sea de bajo costo y fácil instalación, siendo este el **problema de investigación** identificado por el autor de esta tesis.

Objetivos

A partir del planteamiento del problema descrito, se mencionan los objetivos propuestos para el siguiente proyecto de grado.

Objetivo general

Diseñar y simular un prototipo de una silla salvaescaleras de bajo costo para uso en viviendas de personas en condiciones de discapacidad de movilidad.

Objetivos específicos

- ✓ Estudiar y caracterizar el funcionamiento y los componentes de las sillas salvaescaleras
- ✓ Determinar los parámetros del diseño del prototipo, definiendo las cargas dinámicas y calculando los requerimientos de potencia del sistema.
- ✓ Diseñar el prototipo mediante los softwares Inventor y Fusion 360, mostrando las piezas 3D y planos que componen el sistema.
- ✓ Validar el funcionamiento del prototipo mediante simulaciones en los softwares mencionados, para analizar la resistencia de cargas estáticas y dinámicas, verificando el correcto funcionamiento de los mecanismos y su vida útil.

Justificación

Es amplia la variedad de diseño y tecnologías que poseen las empresas con presencia nacional e internacional en venta de sillas salvaescaleras en Colombia, sin embargo, la mayoría de las personas con discapacidad no poseen los ingresos para adquirir estos productos. Actualmente, distintas universidades de Colombia han realizado proyectos de investigación con el objetivo de desarrollar un sistema salvaescaleras de bajo costo para la población. Dentro de estos proyectos se encuentran estudiantes de la Universidad EAFIT (Blandón, 2010), Universidad del Norte (García & Villareal, 2017) y Universidad de Caldas (Dussan & Grajales, 2019).

Por ejemplo, la Universidad EAFIT realizó un proyecto de investigación cuyo objetivo era desarrollar un dispositivo que permitiera a las personas con discapacidad física o movilidad reducida, acceder de forma autónoma, rápida y segura a establecimientos y edificaciones con disponibilidad de espacio para instalar el dispositivo mediante herramientas y metodologías del diseño, ofreciendo a los usuarios posibilidad económica para comprar el producto y funcionalidad cumpliendo con la legislación básica del desarrollo de salvaescaleras (Blandón, 2010).

No obstante, tanto el proyecto de la Universidad EAFIT como el de otras universidades, se han enfocado en el desarrollo de plataformas salvaescaleras para uso público en edificaciones inadecuadas para personas con discapacidad física. Pero han dejado a un lado la necesidad de movilidad dentro de las viviendas de las personas en condiciones de discapacidad. Debido a esto, este proyecto desarrollado a continuación tiene una gran relevancia al desarrollar un producto colombiano enfocado en las necesidades del hogar, con el objetivo de llevar a los usuarios (población colombiana y especialmente opita) a una solución más económica para su facilidad y libertad de movilidad en sus viviendas.

Metodología

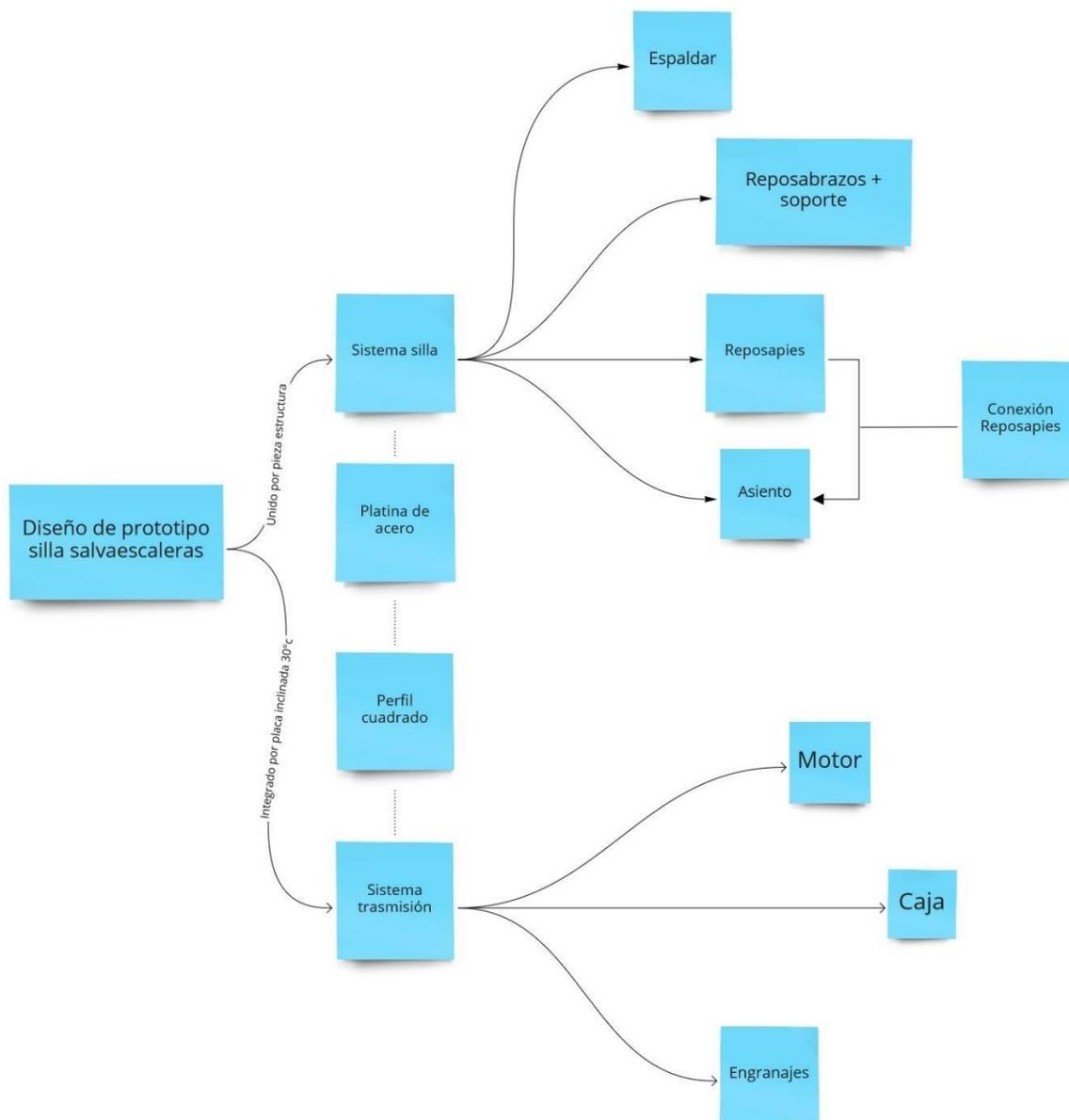
La metodología llevada a cabo se basó en los pasos del pensamiento de diseño (Hasso Plattner. s.f). Estos pasos se resumen en cinco fases (Tabla 2). La primera fase consistió en desarrollar empatía hacia el usuario, comprendiendo sus verdaderas motivaciones y haciéndolas propias. Luego, de todas las necesidades obtenidas del usuario, se escogió una principal que fuera de alto impacto y se profundizó el contexto de esta. Para ello, se comprendió el entendimiento del producto, analizando las características principales de los componentes de las sillas salvaescaleras: sistema silla, sistema de transmisión, sistema de desplazamiento y sistema de seguridad. Después, se llevó a cabo el proceso de ideación, realizando un diseño conceptual del prototipo propuesto mediante brainstorming, sketches e ideas. Posteriormente, se pasó a la materialización de las ideas de diseño desarrollando los diferentes prototipos, para finalmente llegar a un resultado que se evaluó mediante simulaciones en los softwares Inventor y Fusion 360.

Tabla 2. Metodología del proyecto.

Empatía	Problemática y contexto	Ideación	Prototipado	Evaluación
<ol style="list-style-type: none"> 1. Apropiación del contexto 2. Estudio de conceptos y problemáticas de la población discapacitada en Colombia 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar problemática: sillas salvaescaleras costosas para los hogares 2. Características de las sillas salvaescaleras e investigaciones relacionadas. 3. Identificar expectativas del producto final 4. Desarrollo de Benchmarking 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Brainstorming de conceptos esenciales para el diseño 2. Elaboración de sketches e ideas de diseño 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificación de especificaciones (cálculos, medidas, materiales, planos) 2. Desarrollo del modelo CAD del diseño 3. Refinamiento del diseño elaborado 4. Uso de software para diseño: Inventor y Fusion 360 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificaciones de simulaciones mecánicas 2. Evaluación de simulaciones y resultados 3. Conclusiones con respecto a los resultados obtenidos

Concretamente, se diseñó el espaldar, el asiento, los reposabrazos junto con el soporte para reposabrazos y los reposapiés junto con la conexión de reposapiés. Estas piezas anteriores se ensamblan en una pieza llamada estructura, la cual recibe su nombre por ser la base y punto de acople de las demás piezas que componen la silla salvaescalera. Asimismo, se diseñó el sistema de transmisión compuesto por un conjunto de engranajes y un motor trifásico, permitiendo el desplazamiento de la silla salvaescaleras. Ahora bien, para el alojamiento del motor y los engranajes se realizó el diseño de un conjunto de piezas que permitieran su acople al conjunto de la silla salvaescalera. Para esto, se dispuso de una platina de acero, la cual va anclada a la parte inferior de la estructura y permite la unión de un perfil cuadrado a 90° . Seguidamente, se tiene una placa con una inclinación a 30° , que se une al perfil cuadrado en la parte inferior. Por último,

esta placa se encuentra unida a una estructura de esqueleto de la caja donde se posicionará el sistema de transmisión. La unión entre las piezas diseñadas se muestra en el siguiente esquema:



1. Capítulo 1: Marco conceptual

En este primer capítulo del documento se hace una revisión de los conceptos más relevantes asociados con el desarrollo del presente trabajo, tales como la definición del sistema salvaescaleras, la clasificación de los sistemas salvaescaleras, las características más importantes y la comprensión del sistema mecánico involucrado.

1.1. Sistema salvaescaleras

Un salvaescaleras es un sistema mecánico diseñado para subir o bajar personas que tienen movilidad reducida y se les dificulta el uso de las escaleras. Este sistema se compone principalmente de carriles motorizados ajustados a una silla ergonómica, que se unen de forma paralela a una escalera ascendente o descendente. De esta manera, las personas con movilidad reducida se pueden desplazar con facilidad de una planta a otra (Rojas & Untuña, 2016).

1.2. Ventajas del sistema salvaescaleras

El sistema salvaescaleras puede brindar muchas ventajas a sus usuarios. Entre estas están (Rojas & Untuña, 2016):

- Aumentar la autonomía de la persona con movilidad reducida, permitiendo desplazarse de manera independiente de una a planta a otra dentro de un lugar.
- Mejorar la calidad de vida de las personas con problemas de movilidad reducida y discapacidad física, haciendo posible el desarrollo de actividades que no podían hacer antes sin ayuda.

- Generar tranquilidad y seguridad a la familia y cercanos del usuario, por medio de un sistema mecánico seguro que permite el desplazamiento libre de la persona con discapacidad física.
- Evitar accidentes o caídas por parte del usuario, teniendo un sistema de desplazamiento seguro y evadiendo el uso de las escaleras.
- Generar una mayor accesibilidad a diferentes espacios dentro de las viviendas para las personas con movilidad reducida o con alguna condición de discapacidad física.

1.3. Tipos de salvaescaleras

Adicional a lo anterior, es importante mencionar los diferentes tipos de salvaescaleras que existen. Cada clasificación de salvaescalera es igual de beneficiosa y útil, de acuerdo con la necesidad que tenga cada usuario (Rojas & Untuña, 2016).

1.3.1. Silla salvaescaleras

Las sillas salvaescaleras son dispositivos en forma de silla que van fijados a la pared o al peldaño de la escalera, y funcionan por medio de un motor que permite el desplazamiento hacia arriba o hacia abajo de las escaleras mediante un riel. Este riel puede ir instalado en un trayecto curvo, recto o en forma de caracol. Adicionalmente, su uso se basa en desplazar personas con problemas de discapacidad física o movilidad limitada, y suelen instalarse en los hogares con el fin de permitir el acceso de los usuarios a todas las estancias de su domicilio (Rojas & Untuña, 2016).



Figura 2. Modelo silla salvaescaleras
(Ortopedia MIMAS, 2020).

1.3.2. Plataforma salvaescaleras

Las plataformas salvaescaleras ofrecen la misma función que las sillas mencionadas anteriormente. La diferencia radica en que disponen de una plataforma grande para subir y bajar escaleras, ya sea de pie o en una silla de ruedas. Al igual que las sillas salvaescaleras, funcionan con un motor que permite el desplazamiento por medio de un riel que está sujeto a las escaleras. De igual importancia, su uso principal es para personas que tienen que estar en silla de ruedas todo el tiempo debido a una discapacidad física y que se les dificulta moverse en todos los lugares que están compuestos por más de dos pisos (Rojas & Untuña, 2016).



Figura 3. Modelo plataforma salvaescalera
(ArchiExpo, 2021).

1.3.3. Salvaescaleras vertical

Las salvaescaleras verticales son dispositivos que funcionan mediante un riel que se desplaza únicamente de manera vertical, permitiendo subir y bajar personas en pequeñas distancias. Principalmente sirven para transportar personas en sillas de ruedas o para llevar pequeñas cargas (Rojas & Untuña, 2016).



Figura 4. Modelo salvaescaleras vertical
(Ascensores y más, 2021).

1.4. Uso de silla salvaescaleras para el hogar

Considerando lo anterior, existen diferentes modelos de sistemas salvaescaleras que permiten desplazar a las personas con discapacidad física y movilidad limitada. Sin embargo, de todos estos modelos, el más adecuado para utilizar en el hogar son las sillas salvaescaleras ya que pueden adecuarse a espacios pequeños. Por el contrario, las plataformas salvaescaleras requieren la ocupación de espacios grandes, y muchas veces las arquitecturas de los hogares presentan esta limitación en el diseño de las escaleras. Con esto en mente, a continuación, se darán a conocer las características y componentes básicos que debería tener una silla salvaescaleras con la característica de ser de bajo costo. Esto con el objetivo de aprender los conceptos teóricos necesarios, para llevar a cabo el diseño del prototipo de silla salvaescaleras propuesto en el presente trabajo de grado.

1.4.1. Especificaciones básicas de las sillas salvaescaleras

En la siguiente tabla, se muestran las especificaciones de diseño básicas que debería tener una silla salvaescaleras. Estas especificaciones están compuestas de ciertas características básicas obligatorias, y de otras que se podrían tomar como deseos (D) que se pueden cumplir, en la medida en que las condiciones técnicas y económicas lo permitan (Hüseyin et. al, 2018).

Tabla 3. Especificaciones de diseño básicas para el desarrollo de sillas salvaescaleras

Número	Requerimientos
1	El peso del sistema debe estar entre 150 y 200 kg.
2	Capacidad de carga: Plataforma 225 kg, asiento 160 kg.
3	El sistema debe ser lo más pequeño posible (D).
4	La inclinación al escalar debe ser $\leq 30^\circ$.
5	Se debe tener una velocidad constante (0,15 m / s).
6	Los materiales utilizados deberían ser respetuosos con el medio ambiente y aptos para su uso en interiores / al aire libre (D).
7	El usuario debe tener el control con botones de emergencia y estaciones de llamada.
8	Debe cumplir con la norma NTC 2769-5 (requisitos de seguridad para la construcción, fabricación, mantenimiento y desmontaje de sistemas salvaescaleras).
9	Debería desmontarse parcialmente (D).
10	Siempre que sea posible, deben utilizarse piezas estándar.
11	El costo del sistema debe ser bajo.
12	La silla debe ser ergonómica (debe tener espaldar, asiento, reposabrazos y reposapiés con dimensiones amplias para un adulto normal).
13	Debe tener unidad de potencia adicional (batería de 24VCC).

14	Se debe garantizar la seguridad del usuario (cinturón de seguridad, parada de emergencia, etc.).
15	El control y el uso deben ser fáciles / simples.
16	Podría apagarse y bloquearse cuando no esté en uso (D).

1.4.2. Componentes de la silla salvaescaleras

Posteriormente, se mencionan a continuación los requerimientos y partes esenciales que componen a las sillas salvaescaleras (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013). Esto es indispensable ya que el entendimiento de todas las partes del sistema de silla salvaescaleras permite tener más claridad de su funcionamiento, y con esto, se puede desarrollar un prototipo más robusto.

1.4.2.1. Sistema silla

El sistema silla está compuesto por cada una de las piezas que hacen parte del diseño y conjunto de la silla salvaescalera.

- Soporte estructura

Este soporte es donde se van a montar todas las partes de la silla salvaescaleras. Entre sus características principales se encuentra que debe resistir los esfuerzos a los que será sometido (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

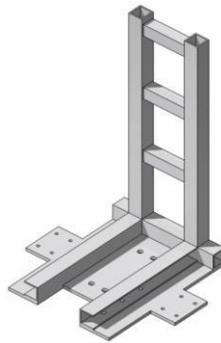


Figura 5. Soporte de estructura de silla.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Estructura

Al soporte anterior se une la estructura, que es en donde se van a apoyar todos los elementos de la silla salvaescaleras (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 6. Estructura de la silla salvaescalera.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Soporte estructura asiento

La función principal de este soporte es servir de alojamiento para el asiento de la silla y permitir el plegamiento. Este soporte va fijado al soporte estructura por medio de un tornillo (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

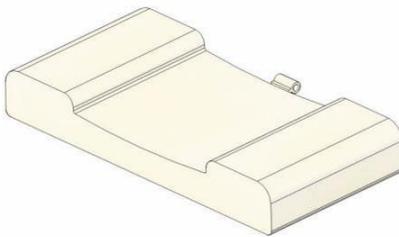


Figura 7. Soporte-estructura asiento.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Asiento

El asiento permite que la persona se pueda sentar de manera cómoda en la silla salvaescaleras. Este va unido al soporte-estructura del asiento mediante una bisagra que pueda permitir la capacidad de plegarse aproximadamente hasta 80-85°C, con el fin de reducir espacio cuando la silla no esté en uso. Este asiento generalmente está hecho de materiales de plástico junto con un cojín para generar comodidad. Asimismo, está compuesto de dos partes: una parte inferior donde la persona se sienta y una parte superior donde la persona puede apoyar su espalda (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 8. Asiento de la silla.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Reposabrazos

Tal como lo dice el nombre, esta parte de la silla permitirá que la persona repose sus brazos y que tenga facilidad de sentarse y levantarse de la silla. Ahora bien, está compuesto por dos partes: un soporte plegable y los reposabrazos. El soporte debe permitir que los reposabrazos se puedan recoger y plegar para reducir el espacio que ocupa la silla cuando no se utiliza (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

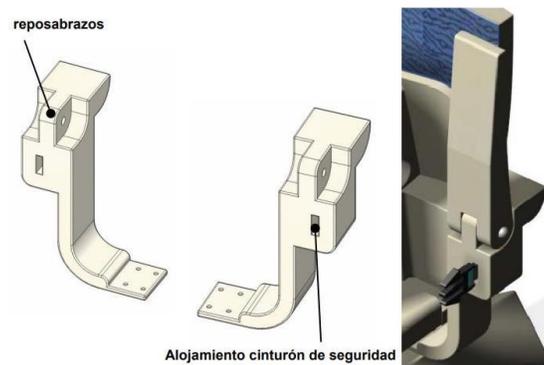


Figura 9. Soporte reposabrazos y reposabrazos.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Soporte piernas

Este soporte funciona principalmente para apoyar las piernas y para fijar el reposapiés al conjunto de la silla (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

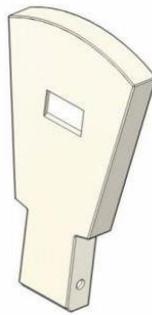


Figura 10. Soporte para piernas.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Reposapiés

El reposapiés está conformado por unos soportes y por el reposapiés plegable. Los soportes de reposapiés permiten que el asiento y el soporte de piernas se plieguen contra el respaldo. Entonces, tirando del soporte de reposapiés, se despliega el asiento, el soporte de piernas y el reposapiés. Ahora bien, el reposapiés cumple la función de permitir reposar los pies, por lo que es importante tener tapizada esta pieza para que los usuarios no se resbalen con el plástico. Por otro lado, este reposapiés se puede plegar hacia arriba por medio de un resorte interno que tiene (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

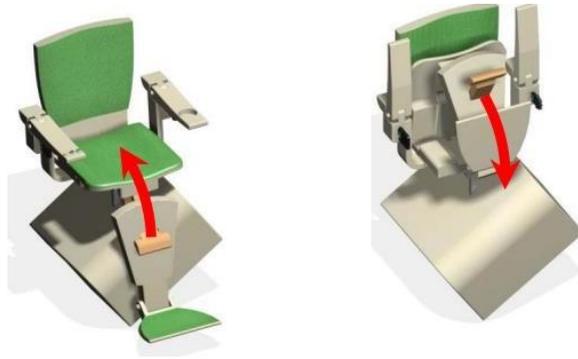


Figura 11. Soporte de reposapiés.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 12. Reposapiés con resorte.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Cinturón de seguridad

Los cinturones de seguridad son esenciales para evitar el movimiento del usuario y permitir un dispositivo seguro (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 13. Cinturones de seguridad.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Control de la silla

El control de la silla estará conformado por una serie de botones que se colocan generalmente en el reposabrazos. Estos botones serán los encargados de controlar el movimiento de la silla, permitiendo la dirección del desplazamiento (hacia arriba o hacia abajo), así como la velocidad. Es en este punto donde se pueden agregar diferentes opciones tecnológicas en el control. Asimismo, se puede tener la opción de tener un control remoto inalámbrico para el manejo de la silla (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Caja transmisora

Esta caja permitirá cubrir el motor con el que funciona la silla salvaescaleras. Su estructura por dentro debe estar hecha de un material rígido y por fuera debe estar hecho de plástico, así como todas las piezas externas (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 14. Caja trasmisora.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Medidas generales de una silla salvaescaleras

El estudio de (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013) muestra unas dimensiones generales en el diseño de una silla salvaescaleras, las cuales se pueden extrapolar y usar para el desarrollo del presente trabajo. Asimismo, es importante mencionar que las sillas salvaescaleras normalmente

se pueden instalar en una escalera de un ancho mínimo de 850 mm (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

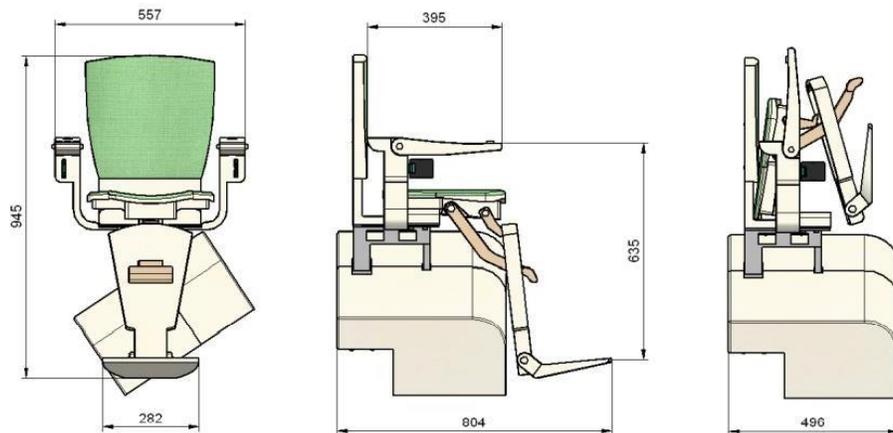


Figura 15. Dimensiones de una silla salvaescaleras en mm.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

1.4.2.2. Sistema de desplazamiento

El sistema de desplazamiento está compuesto por las diferentes piezas encargadas de que la silla pueda cumplir la función de moverse y desplazarse hacia arriba o hacia abajo de las escaleras. El sistema más utilizado es el de **piñón-cremallera**, en donde específicamente un piñón movido por un motor se engrana sobre una cremallera que sigue el trayecto de las escaleras. Ahora bien, el piñón forma parte de una caja reductora de velocidad y transmite la potencia necesaria para movilizar la silla salvaescaleras por la cremallera (Rojas & Untuña, 2016).

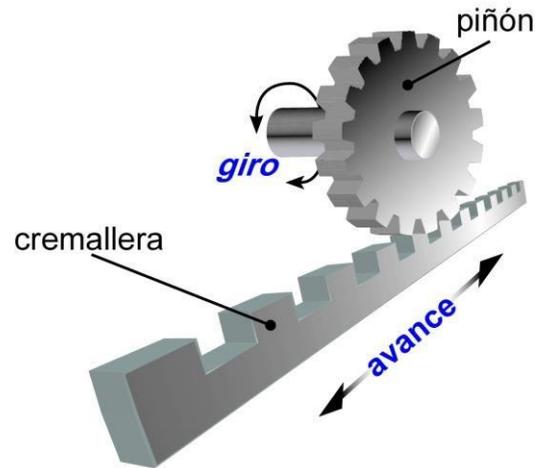


Figura 16. Sistema piñón-cremallera.

(Torres, 2014).

- Riel

Esta es la pieza sobre la cual recae todo el peso de la silla y de la persona que la utiliza, por esta razón su diseño deberá soportar estas cargas. El riel va apoyado en unos soportes pegados al suelo y va pegado a un lado de la escalera. Su diseño se basa en un perfil hueco de sección cuadrada que tiene dos carriles paralelos encima para permitir el desplazamiento de la silla salvaescaleras (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).



Figura 17. Riel de desplazamiento.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Patas de apoyo

Estas piezas son las encargadas de soportar y fijar el riel. Se caracterizan por estar compuestas de dos partes: una fija anclada al suelo y otra regulable que se fija al riel y por medio de pasadores se varía la altura de las patas (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

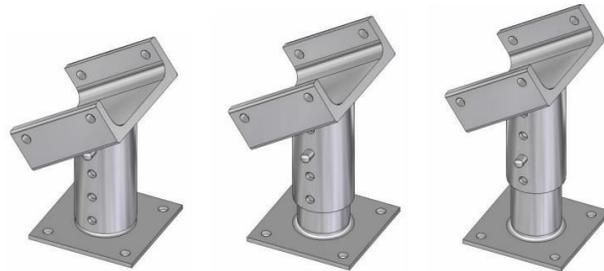


Figura 18. Patas de apoyo.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Carro o patín

Con el fin de que la silla salvaescaleras pueda ejecutar su recorrido a lo largo del riel, se utilizan normalmente cuatro patines para proporcionar un deslizamiento suave, silencioso, económico y resistente. Estos patines deben soportar la carga de la silla y permitir oscilaciones de movimiento. Adicionalmente, estas piezas tienen un sistema de freno integrado que ayuda a que la silla salvaescaleras se detenga cuando sea necesario (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

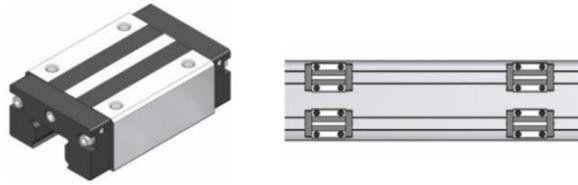


Figura 19. Carro para desplazamiento de silla.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Cremallera

Esta es la otra pieza que compone el sistema de piñón-cremallera. La cremallera va fijada a un lado del riel por medio de tornillos, y con esto, se transforma el movimiento giratorio del piñón en un movimiento lineal en contacto con la cremallera (Sanango & Sango, 2015).

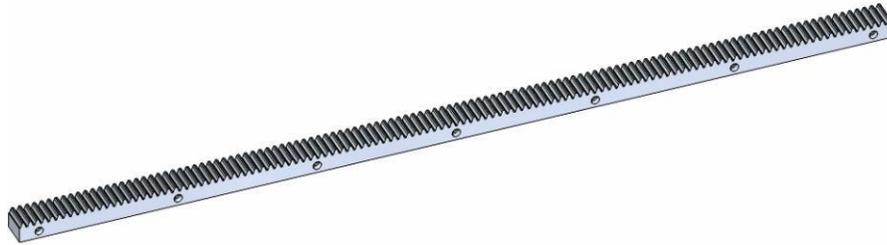


Figura 20. Cremallera de sistema piñón-cremallera.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Batería

La batería es la pieza encargada de suministrar la energía necesaria para que la silla salvaescaleras funcione. Generalmente, se usan baterías de 24VCC para el funcionamiento de la silla.

1.4.2.3. Sistema de transmisión

- Motor

El motor es la pieza encargada de generar la fuerza para trasladar el peso total de la silla salvaescaleras más el peso del usuario (Rojas & Untuña, 2016). Específicamente, se utiliza un motor trifásico para los sistemas salvaescaleras, el cual funciona transformando energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Ahora bien, estos motores generan cierta potencia mecánica que se refleja como potencia eléctrica y es la que le debe suministrar la instalación eléctrica (Farina, 2018).



Figura 21. Motor trifásico.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

- Velocidad y sistema de engranaje

Las velocidades de subida y bajada de la silla salvaescaleras se obtienen mediante un sistema de engranaje y mediante la opción que posee el motor trifásico de invertir el sentido del giro. Con esto en mente, se utilizan generalmente dos sistemas de engranaje, para las dos

velocidades necesarias (subida y bajada). Para desarrollar estos sistemas de engranaje se requieren de ejes conductores, ejes reductores y diferentes piñones que en contacto con la cremallera generan el movimiento de la silla. Ahora bien, es importante realizar los cálculos respectivos para definir a qué revoluciones por minuto deben girar los ejes para obtener las velocidades deseadas del sistema (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

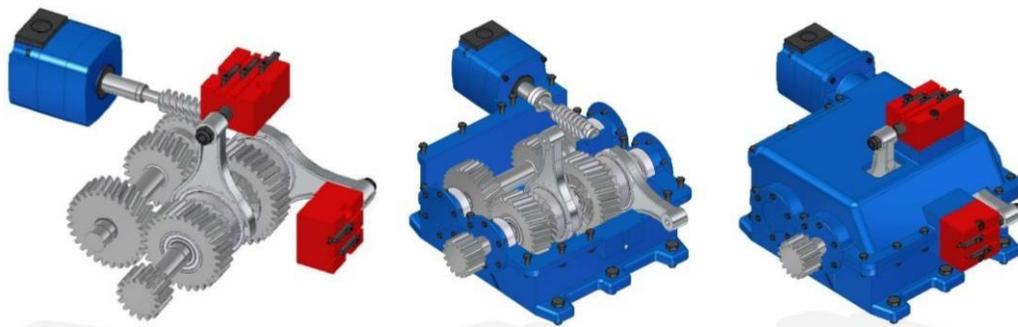


Figura 22. Sistema de engranaje.

(Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

1.4.2.4. Sistema de seguridad

El sistema de seguridad de la silla salvaescaleras es uno de los factores más importantes a la hora de diseñar el dispositivo deseado. Dentro del sistema de seguridad de la silla se encuentran características y piezas ya mencionadas anteriormente, entre las cuales están el sistema de freno y bloqueo, el tapizado del reposapiés para evitar deslizamiento del usuario y el cinturón de seguridad para evitar caídas. Adicionalmente, hay otros accesorios que se pueden agregar para seguridad del sistema, tales como un botón de parada de emergencia que de manera automática apaga el sistema

si algo no funciona correctamente, o detectores de proximidad en el reposapiés que detienen la silla si se encuentra algún obstáculo (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013).

El sistema de seguridad es indispensable para evitar cualquier accidente del trabajador que construya el dispositivo y del usuario que lo utilice. Para esto, es necesario tener en cuenta las normas que rigen el desarrollo y uso de sistemas salvaescaleras, **establecidas en la norma técnica colombiana 2769 – 5** (Icontec, 2012). Dentro de esta, se establecen las reglas de seguridad para la construcción e instalación de máquinas, seguridad de las maquinas, casos de emergencia (parada o palanca de emergencia) y principios para el diseño (Icontec, 2012).

Por otro lado, también se encuentran las normas establecidas en **la norma técnica colombiana 6047**, en cual se establecen las reglas de los espacios de servicio al ciudadano en la administración pública. Dentro de esta norma se exponen las dimensiones generales necesarias para el desarrollo de una plataforma vertical o inclinada. Estas dimensiones deben ser de 900 mm x 1400mm. Ahora bien, estas dimensiones pueden servir de guía para el diseño de sillas salvaescaleras, ya que generan seguridad de acuerdo con las normas (Icontec, 2013).

Capítulo 2: Diseño del prototipo

En este capítulo se muestra el diseño llevado a cabo del prototipo de silla salvaescaleras propuesto. Para esto, se desarrolló un primer prototipo de silla sencillo, cuyo objetivo principal era enfocarse en el diseño de la caja de transmisión. No obstante, se realizó una mejora de este primer prototipo, con respecto al diseño de las partes diferenciadas que componen la silla.

Ahora bien, para ambos casos se elaboraron múltiples piezas correspondientes a las partes que componen el sistema de silla salvaescaleras. Lo descrito anteriormente se realizó en el software Inventor para el primer prototipo y en el software Fusion 360 para el segundo prototipo. Las medidas utilizadas para hacer dichas piezas se especifican en los planos que se presentan en la sección de anexos.

2.1. Cálculos del sistema de transmisión

Los cálculos tenidos en cuenta para que el prototipo de silla salvaescaleras propuesto funcionara de manera correcta, se desarrollaron determinando las especificaciones del motor, la potencia y las velocidades.

Para determinar las especificaciones de la potencia necesaria para alcanzar la velocidad estándar requerida por la silla salvaescaleras (0,15 m/s) según la norma NTC 2769-5, se partió por determinar la capacidad de carga del sistema, compuesta tanto por el peso de la silla como por el aporte de la persona que se sentará en ella. Esto se realiza considerando una altura entre una planta (suelo) y otra (silla salvaescalera) de 2 a 3 m y una inclinación máxima de 30° (esta inclinación está establecida como característica general de las sillas salvaescaleras).

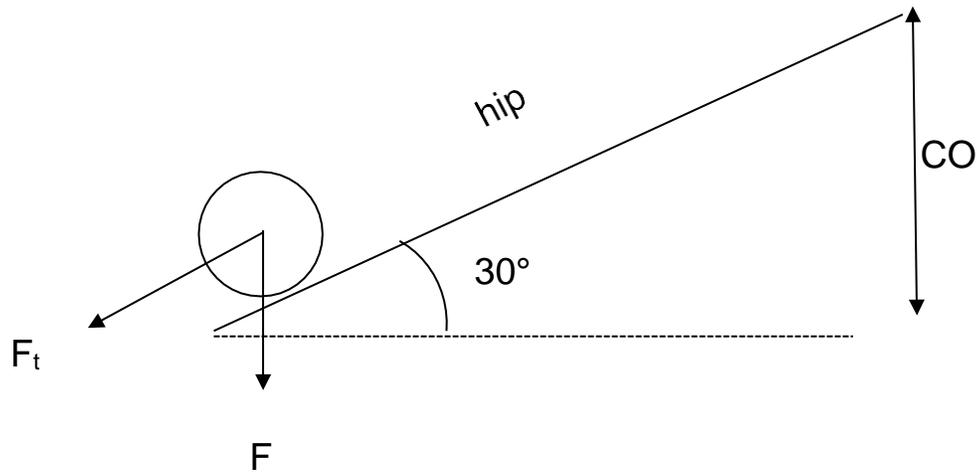


Figura 23. Esquemático silla salvaescaleras.

De acuerdo con el esquema mostrado en la figura 23, se obtiene la capacidad de carga.

$$\text{sen}(30^\circ) = \frac{CO}{hip}$$

$$hip = \frac{CO}{\text{sen}(30^\circ)}$$

$$hip = (2 \text{ o } 3)/0.5 = 4 - 6 \text{ m} \rightarrow \text{Dependiendo de la altura}$$

Para 2m la capacidad de carga del sistema está definida por:

$$F = 150 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 1471.5 \text{ N}$$

Para 3m la capacidad de carga del sistema está definida por:

$$F = 200 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 1962 \text{ N}$$

Entonces, aproximando los valores obtenidos, tenemos un rango para la capacidad de carga de 1475 a 2000 N. Esto teniendo en cuenta que el sistema de silla salvaescaleras debe soportar un peso entre 150kg y 200 kg.

Calculamos la potencia del sistema para el límite inferior (2m):

$$p = \frac{F \cdot \cos(30^\circ) \cdot \text{hip}}{t}$$

$$p = 1475 \text{ N} \cdot \cos(30^\circ) \cdot \frac{\text{hip}}{t} \rightarrow \text{Donde } \frac{\text{hip}}{t} \text{ corresponde a la velocidad de la silla}$$

$$\left(0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ en base a las características generales de una silla salvaescalera}\right)$$

$$p = 1268.5 \text{ N} \cdot 0.15 \text{ m/s}$$

$$p = 190.275 \text{ watts} \rightarrow 0.255 \text{ Hp}$$

Este valor corresponde a la potencia útil, sin embargo, el motor no posee un rendimiento del 100%. Se ha estimado, que su rendimiento puede ser aproximadamente el 85%, por lo que la potencia total será:

$$p_t = p \cdot \mu(\text{eficiencia})$$

$$p_t = 0.255 \cdot 1.15 = 0.2934 \text{ Hp}$$

Ahora, para estimar el intervalo superior de potencia se realiza el mismo cálculo considerando el mayor valor de la capacidad de carga (con 3m):

$$p = \frac{F \cdot \cos(30^\circ) \cdot \text{hip}}{t}$$

$$p = 2000 \text{ N} \cdot \cos(30^\circ) \cdot 0.15 \text{ m/s}$$

$$p = 258 \text{ watts} \rightarrow 0.346 \text{ Hp}$$

$$p_t = 0.346 \cdot 1.15 = 0.398 \text{ Hp}$$

Lo que nos da finalmente un intervalo de potencia de 0.2934 - 0.398 Hp.

Considerando lo anterior, para este proyecto se utilizará un **motor eléctrico trifásico** marca Siemens. Se eligió este tipo de motor, ya que en el marco conceptual se expuso que generalmente es usado para el funcionamiento de las sillas salvaescaleras debido a que es un motor reductor. Entre sus características técnicas de funcionamiento, se encuentra que opera a una velocidad de 900 rpm con una alimentación por batería de 24 VCC, el cual posee una potencia de 0.5 Hp. Asimismo, para este proyecto se diseñó una caja de velocidades constituida por un sistema de engranajes que permite conseguir las velocidades de avance que debe tener la silla salvaescaleras (0,15 m/s según la norma NTC 2769-5). Finalmente, la capacidad de carga del sistema va a estar definida por un intervalo entre 1475N a 2000 N y la potencia del sistema estará entre 0.2934 - 0.398 Hp.

2.2. Especificaciones de diseño: primer prototipo

Para llevar a cabo el primer prototipo se utilizó el software Inventor. El software CAD Inventor® suministra herramientas de calidad profesional para diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos (AutoDesk: Inventor, 2021). Ahora bien, para este proyecto, se obtuvieron las licencias pertinentes de uso para trabajar en el software.

Continuando, el objetivo de este prototipo se basó en el diseño de la caja de transmisión. Por consiguiente, entre las piezas que componen el primer prototipo se encuentra el motor, la caja de

trasmisión, los engranajes, los ejes conductores y reductores, el riel y el diseño de una silla convencional y sencilla.

El criterio de selección del primer prototipo se basó principalmente en aplicar el funcionamiento de la caja de trasmisión descrito en el marco conceptual cumpliendo con las características de diseño mencionadas en la tabla 3. Específicamente, que se tenga un motor trifásico con batería de 24 VCC (sección 2.1.) y un sistema de engranajes que permita reducir la velocidad a 0,15 m/s (velocidad estándar que debe tener una silla salvaescaleras según la norma NTC 2769-5).

Ahora bien, para el diseño de una silla salvaescaleras, es ideal iniciar con el diseño de la caja de trasmisión, teniendo las características esenciales para el funcionamiento del sistema. El diseño sencillo de la silla no incluyó juntas o conexiones entre piezas, debido a que el objetivo de este primer prototipo era permitir una aproximación muy general al diseño de una silla salvaescaleras. Esto implica que sí bien no se modelaron piezas que componen de manera específica la silla, el software Inventor sí consideró todas las partes de silla al momento de realizar la simulación.

- Diseño CAD 3D

A continuación, se observan las piezas diseñadas y ensambladas del primer prototipo desarrollado de silla salvaescaleras:

Tabla 4. Piezas del primer prototipo.

1. MOTOR	2. ENGRANAJE 10 DIENTES	3. ENGRANAJE 11 DIENTES	4. ENGRANAJE 15 DIENTES	5. ENGRANAJE 15 DIENTES
				
6. ENGRANAJE 20 DIENTES	7. CAJA DE TRANSMISIÓN	8. EJE 1	9. EJE 2	10. EJE 3
				
11. EJE 4	12. EJE REDUCTOR 1	13. EJE REDUCTOR 2	14. RIEL CREMALLERA	15. SILLA
				

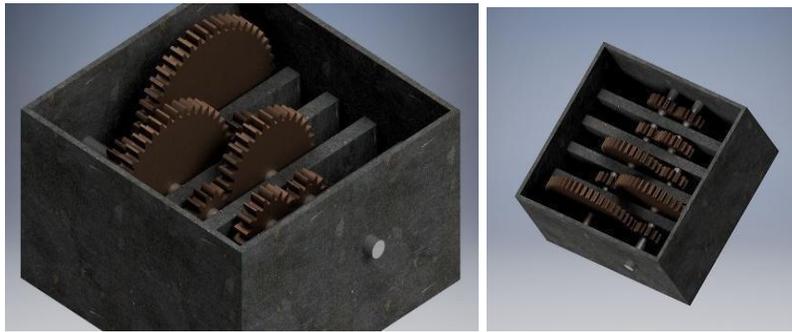


Figura 24. Ensamblaje de caja de transmisión prototipo 1.

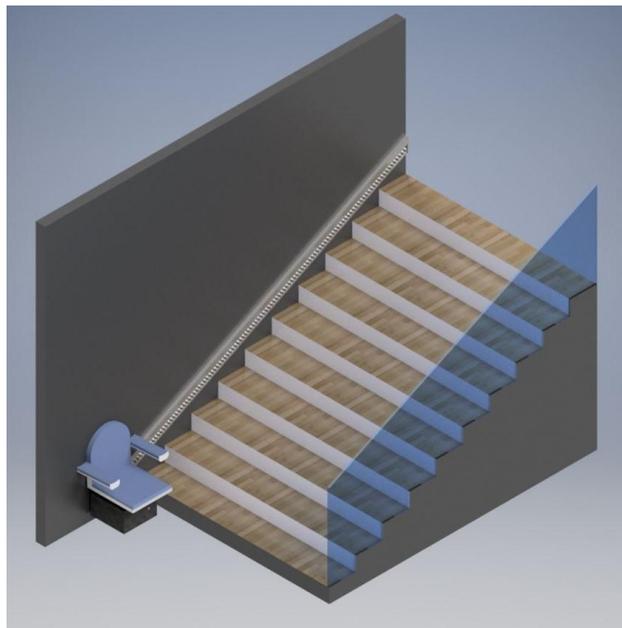


Figura 25. Ensamblaje prototipo 1.

- Características de las piezas

Teniendo en cuenta el diseño de las piezas, se presentan las características de cada pieza diseñada. En términos generales, se escogió bronce fundido y acero estructural AISI 1020 como materiales para las piezas de la caja de transmisión, debido a sus propiedades mecánicas resistentes. Por el contrario, se seleccionó plástico ABS como material para la silla, ya que es el material convencional utilizado para sillas salvaescaleras. Adicionalmente, se optó por usar un motor trifásico con batería de 24VCC, debido a que es el más seguro y comúnmente utilizado al ser motor reductor.

Específicamente, el criterio de selección de los materiales del prototipo 1 se realizó por medio del software Inventor. Dentro de la opción de selección de materiales para la simulación de las piezas, se escogió el bronce fundido, el acero estructural AISI 1020 y el Plástico ABS, ya que estos eran materiales con un límite elástico grande, es decir, que tienen un límite alto de fluencia, soportando altas cargas antes de que se genere una deformación irreversible (Límite elástico acero estructural AISI 1020: 380 MPa, Límite elástico Plástico ABS: 20 MPa y Límite elástico bronce: 150 MPa). Asimismo, estos materiales se seleccionaron teniendo en cuenta los materiales utilizados para el desarrollo de sillas salvaescaleras convencionales. Entonces, todas las sillas presentes en el mercado están diseñadas con plástico ABS ya que posee alta dureza y fluencia a los impactos (Pérez, 2018). Por otro lado, los materiales de la caja de transmisión y los engranajes pueden variar en diferentes tipos de metales (ej: bronce, aluminio, acero, etc). En este caso, se seleccionó el acero estructural AISI 1020 para los ejes debido a su bajo costo, fácil soldabilidad y fluencia alta (Díaz, 2017) y el bronce para los engranajes debido a que es un material resistente a corrosión y con alta dureza, por lo que podría perdurar a largo plazo sin necesidad de cambio (SENA, 1988).

Tabla 5. Características piezas primer prototipo.

Pieza	Característica
Motor	Motor eléctrico trifásico, marca siemens 900 rpm trabaja con batería de 24 VCC
Engranaje 10 dientes	Material Bronce fundido
Engranaje 11 dientes	Material Bronce fundido
Engranaje 15 dientes	Material Bronce fundido
Engranaje 15dientes	Material Bronce fundido
Engranaje 20 dientes	Material Bronce fundido
Eje 1	Material Acero estructural
Eje 2	Material Acero estructural
Eje 3	Material Acero estructural
Eje 4	Material Acero estructural
Eje reductor 1	Material Acero estructural
Eje reductor 2	Material Acero estructural
Caja de transmisión	Diámetro 234 mm x 349 mm x 345 mm Material: Acero estructural
Riel cremallera	Largo de 3275 mm, Ángulo: 116,57°. Material: Acero estructural
Silla	Alto 529,941mm, Largo 477,321mm, Ancho 410 mm.

	Material: Plástico ABS
--	------------------------

- Especificaciones de los engranajes

Las especificaciones puestas en la siguiente tabla se presentan con el fin de mostrar la elaboración de los engranajes. Estos se diseñaron con la proporción ideal entre los diámetros y número de dientes con el fin de obtener una disminución de rpm del motor trifásico para generar una velocidad lineal de 0.15 m/s, la cual es la velocidad estándar para los sistemas salvaescaleras según la norma NTC 2769-5. Para esto, se decidió que el módulo utilizado fuera 3 y el ángulo de presión fuera 20.

El número de dientes se definió por una relación de 1:1 o 1:2 entre los diferentes engranajes. Entonces, para obtener el valor del diámetro primitivo D_p de caja engranaje, se utilizó la fórmula definida de la siguiente manera:

$$D_p = \frac{M_n \times Z}{\cos \beta}$$

M_n : modulo normal

Z : número de dientes

β : ángulo entre dientes

Al tener calculado el diámetro D_p , el valor de éste se multiplicó por π para saber cuántos mm avanzaba cada engranaje por cada vuelta realizada.

$$\frac{mm}{s} = D_p \times \pi$$

Finalmente, este valor se convirtió a metros para saber cuántos m/s avanzaba cada engranaje.

Específicamente, los engranajes tienen dos velocidades. Algunos tienen velocidad 0,15 m/s permitiendo el avance del sistema y otros de 0,10 m/s generando una pequeña reducción.

Tabla 6. Especificaciones de los engranajes.

DATOS PARA ELABORACIÓN DE ENGRANAJES (mm)					
ESPECIFICACIONES	Engranaje 1	Engranaje 2	Engranaje 3	Engranaje 4	Engranaje 5
# DIENTES	10	11	15	15	20
Dp	32	32	48	48	60
h	9	9	9	9	9
PASO CIRCULAR	12,566	12,566	12,566	12,566	12,56
ANCHO HUECO	6,597	6,597	6,597	6,597	6,597
ESPEJOR DIENTE	5,969	5,969	5,969	5,969	5,969
Hc	4	4	4	4	4
Hp	5	5	5	5	5
b	40	40	40	40	40
ADENDUM	4	4	4	4	4
DEDENDUM	5	5	5	5	5
RADIO ENTALLE	1,047	1,047	1,047	1,047	1,047
ÁNGULO ENTRE DIENTES	21,18	21,18	10,58	10,58	7,05

2.3. Especificaciones de diseño: segundo prototipo

Para ejecutar el segundo prototipo, se utilizó el software Fusión 360 en lugar de Inventor. Fusion 360 es un software CAD CAM y de circuitos impresos de modelado 3D que se basa en la nube para el diseño y la manufactura de productos. Se decidió utilizar este software, ya que garantiza de manera más completa los ajustes, la estética, la forma y la función de los elementos mecánicos diseñados (AutoDesk: Fusion 360, 2021).

El objetivo del segundo prototipo consistió en mejorar el diseño de las piezas que componen la silla salvaescaleras, ya que el prototipo 1 no cumplía con una buena ergonomía de silla mencionada en la tabla 3. Este diseño se encuentra basado tanto en la ergonomía y diseño de sillas convencionales de oficina como de otras sillas salvaescaleras comerciales. Las dimensiones utilizadas corresponden a aproximaciones del promedio de sillas salvaescaleras en el mercado y se ajustan a las medidas antropométricas promedio de la población colombiana. Asimismo, se utilizó como guía de comparación las medidas generales descritas en la figura 15 (Blanco, Villalobos & Mendoza, 2013) y las mediciones mencionadas en la NTC 6047.

Adicionalmente, la selección de materiales de este prototipo 2 se basó en el mismo criterio utilizado para el prototipo 1. En este caso, los materiales se seleccionaron por medio del software Fusion 360 en donde se escogió como material de la silla el plástico ABS y como material de la estructura de la silla el Acero “AISI 1018 209 RT”. Estos materiales se escogieron al tener muy buenas propiedades de fluencia y dureza que permiten soportar las cargas de una persona adulta y, asimismo, permiten comodidad al usuario.

El prototipo consta de cuatro piezas principales: asiento, espaldar, reposabrazos y reposapiés. Asimismo, se disponen de otras piezas de soporte (Soporte para unir los reposabrazos), conexiones (Conexión reposapiés, que permite unir el asiento con el reposapiés) entre piezas y una estructura que funciona como base y acople de todas las piezas. Adicionalmente, se presenta un ensamblaje preliminar de la silla salvaescalera donde se muestra el dispositivo listo para usarse y su disposición completamente plegada en condición de no uso. Se aclara que aún se encuentra en diseño el ensamblaje entre el motor, la caja de transmisión realizada en el prototipo 1, la silla diseñada en este segundo prototipo y el acople al riel. Finalmente, el diseño de esta silla se basó en el menor uso de accesorios pequeños como tornillos, por lo que se pensó en un sistema tipo pin de encaje entre las piezas diseñadas.

- Diseño CAD 3D

A continuación, se presentan las piezas que componen el segundo prototipo del dispositivo:

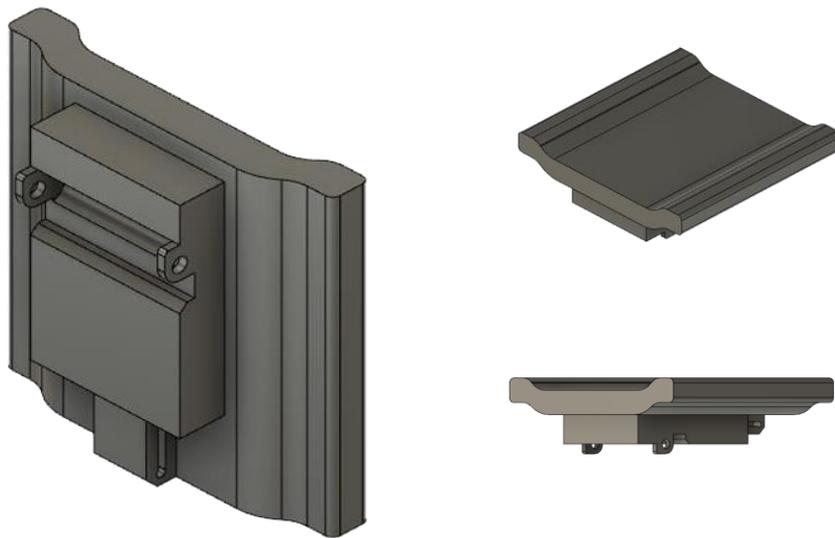


Figura 26. Asiento prototipo 2.

El asiento tiene un diseño que responde a la necesidad de proporcionar mayor comodidad al usuario, así como la posibilidad de ser plegado hasta 90° para reducir el espacio que ocupa la silla salvaescalera cuando no está en uso. Se acopla directamente a la estructura y a él se acopla la conexión del reposapiés. Está hecho en su totalidad por plástico ABS para su fabricación por impresión 3D.

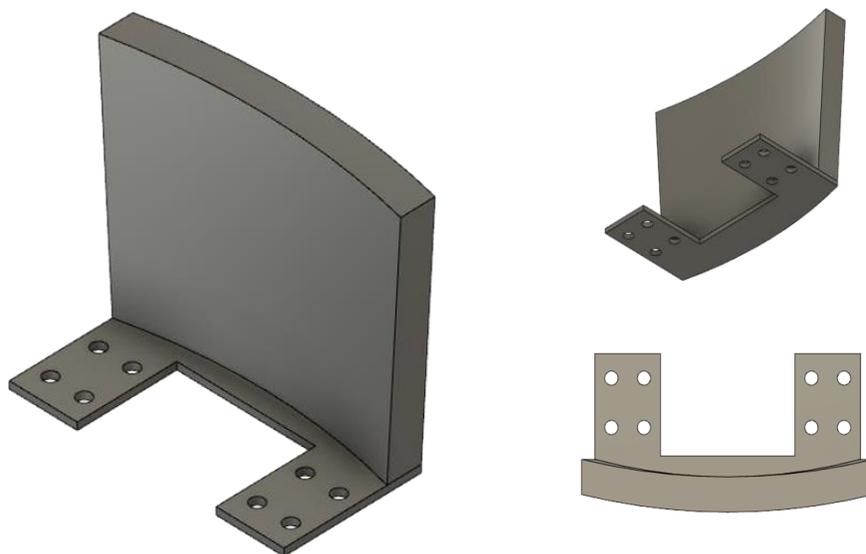


Figura 27. Espaldar prototipo 2.

El espaldar de la silla ofrece un diseño ergonómico que se ajusta a la morfología de la espalda de la persona para proporcionar una mayor sensación de comodidad y seguridad. Este se compone en su totalidad de plástico ABS debido a su rigidez, peso ligero y bajo costo, además de ofrecer la versatilidad de fabricarse por medio de impresión 3D.

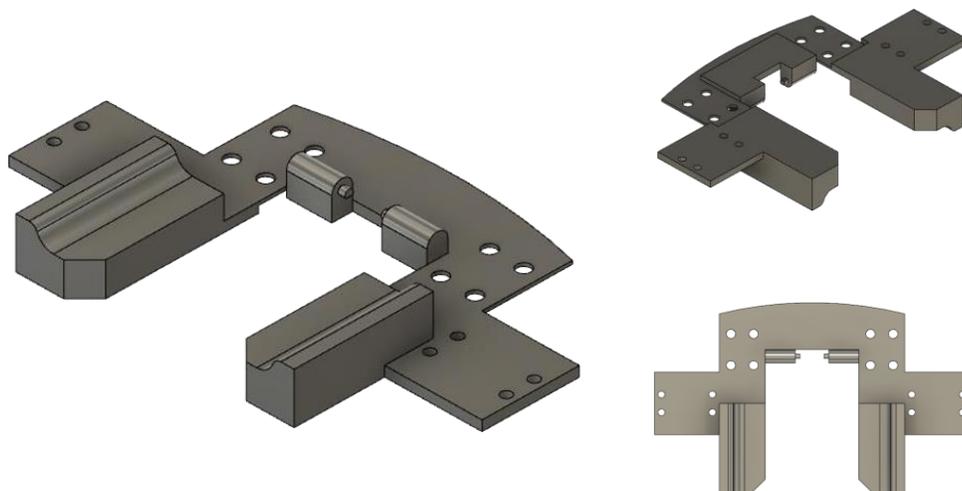


Figura 28. Estructura prototipo 2.

La estructura recibe su nombre por ser la base y punto de acople de las demás piezas que componen la silla salvaescalera. Su diseño responde a la necesidad de encajar todas las piezas tanto cuando el dispositivo se encuentra completamente plegado, como en su disposición útil de funcionamiento. Asimismo, se realizaron los cálculos pertinentes, así como las simulaciones FEM que se presentarán más adelante, que garantizan la resistencia de esta pieza a los esfuerzos a los que será sometida. Se conforma completamente de acero AISI 1018 209 RT debido a que posee un mayor límite de elasticidad y de tracción en comparación con el acero estructural AISI 1020, lo que proporciona una mayor fluencia y por ende, soporta cargas más altas antes de deformarse irreversiblemente.

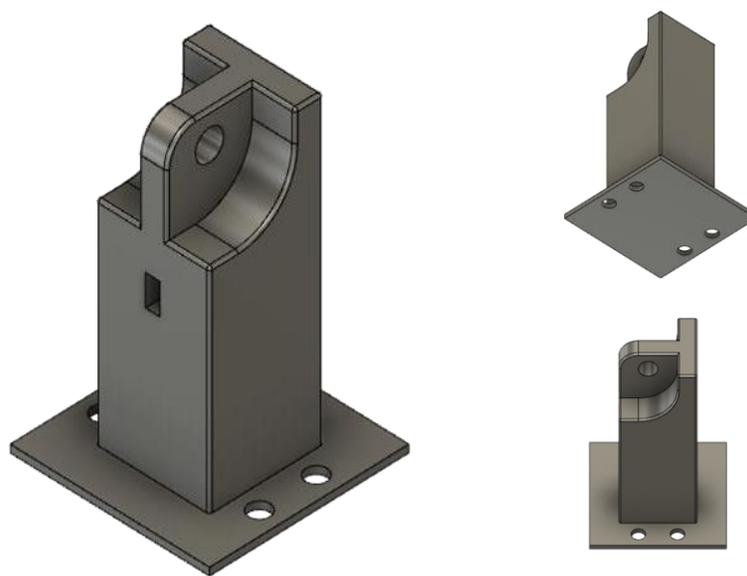


Figura 29. Soporte reposabrazos prototipo 2.



Figura 30. Reposabrazos prototipo 2.

Los reposabrazos son un conjunto compuesto de un soporte (Figura 29), el cual va acoplado a la estructura, y la pieza de los reposabrazos que se aloja en dicho soporte y les permite plegarse de manera independiente. De este modo, se garantiza que el acceso a la silla sea sencillo y sin obstáculos y reduce el espacio que ocupa el dispositivo en su disposición no útil.

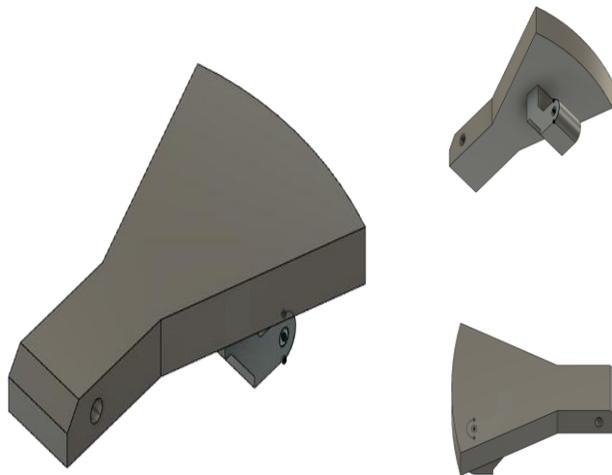


Figura 31. Conexión reposapiés prototipo 2.

La conexión reposapiés es una pieza que permite el movimiento y plegado del reposapiés mediante un acople con el asiento, de modo que permite un giro de hasta 90° . Sirve principalmente para apoyar las piernas y fijar el reposapiés al conjunto silla salvaescalera. Al igual que las anteriores piezas mencionadas se encuentra hecho de plástico ABS.

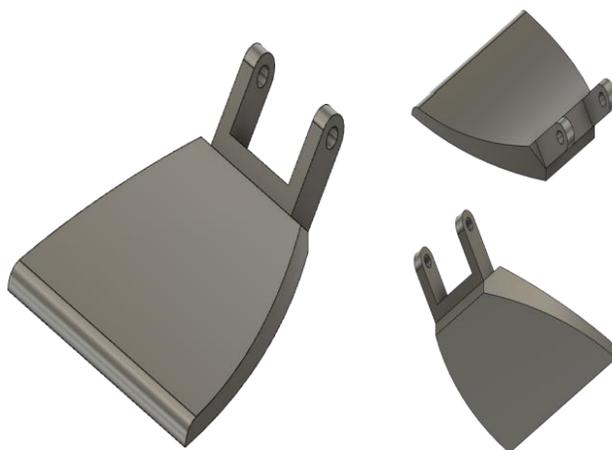


Figura 32. Reposapiés prototipo 2.

El reposapiés está hecho de plástico ABS para su impresión 3D, y permite que el usuario ubique sus pies durante el trayecto de uso de la silla salvaescalera.

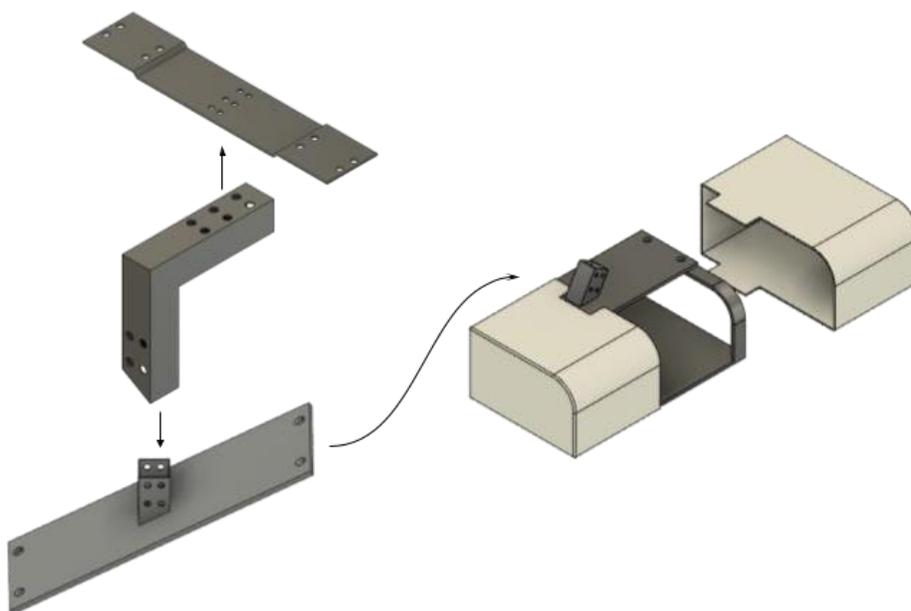


Figura 33. Alojamiento del motor.

Para el alojamiento del motor, se realizó el diseño de un conjunto de piezas que permiten su acople al conjunto silla salvaescalera, así como al riel descrito en el primer prototipo. Para esto, se dispone de una *platina de acero*, la cual irá anclada a la parte inferior de la estructura y permitirá la unión de un *perfil cuadrado* a 90° . Este perfil funcionará como conexión entre la estructura de la silla salvaescalera y la caja de alojamiento del sistema de transmisión. Seguidamente, se tiene una *placa* con una inclinación a 30° , misma que tiene el riel, que se une al perfil en la parte inferior. Esta placa se encuentra unida a una estructura de esqueleto de la caja donde se posicionará el sistema de transmisión, que va cubierto por una *carcasa de Nylon 6/6* de 5 mm de grosor. Este cajón puede ser separado en dos para facilitar el acceso al sistema de transmisión en caso de mantenimiento o reparación.

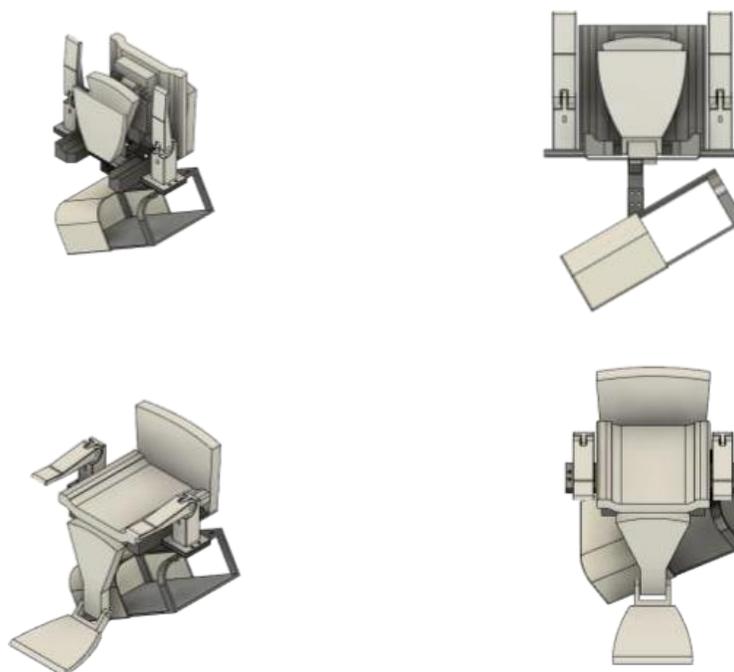


Figura 34. Ensamblaje segundo prototipo.

Finalmente, se tiene todo el conjunto silla salvaescalera y caja de transmisión completamente ensamblado. En la Figura 34, se puede observar el dispositivo completo en sus dos posiciones: completamente plegado (no uso) y su disposición de funcionamiento. A continuación, se muestra una imagen con la vista explosionada del esquema en conjunto con el fin de mostrar cómo interactúan las partes del sistema:

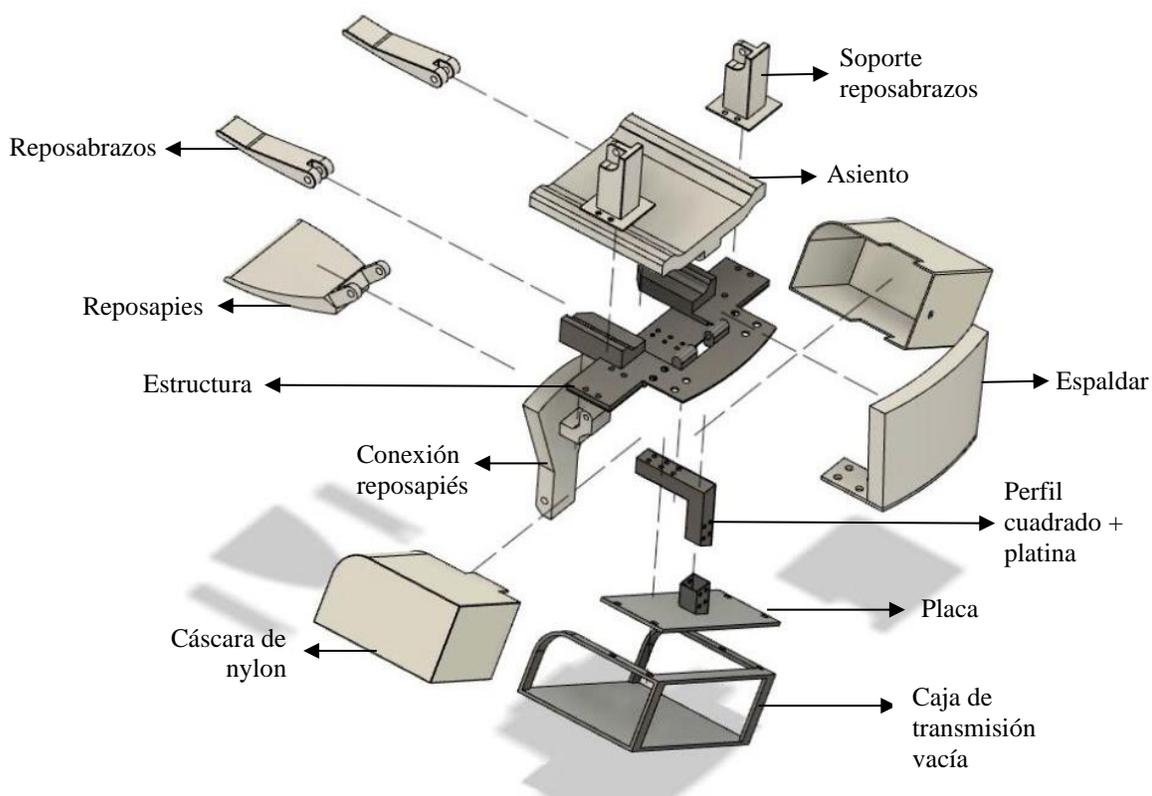


Imagen obtenida del video: https://www.youtube.com/watch?v=5P_oubbj1D8

Ahora bien, es importante mencionar que el sistema de transmisión de este prototipo es el mismo realizado para el prototipo 1. Es decir, este segundo prototipo tiene como finalidad un mejoramiento del diseño de la silla salvaescaleras que se aproxima más a los diseños comerciales con respecto al prototipo 1, manteniendo las especificaciones técnicas del sistema mecánico de transmisión que permiten el funcionamiento del sistema.

3. Capítulo 3: Simulaciones del prototipo

En este capítulo del documento se presentan las diferentes simulaciones desarrolladas de los prototipos, con el fin de evaluar la pertinencia y factibilidad del dispositivo de diseño de silla salvaescalera propuesto.

3.1. Simulaciones primer prototipo

Las simulaciones del primer prototipo se realizaron en el software Inventor. Estas simulaciones se realizaron a partir de un prototipo con un diseño sencillo para dar un primer acercamiento de la funcionalidad y diseño del sistema. Ahora bien, es importante mencionar que no se tuvieron en cuenta los análisis de la silla en movimiento, sin embargo, esto se estableció en la sección de recomendaciones del proyecto, ya que se podría obtener una mayor información del funcionamiento del sistema. Por último, es importante mencionar que el costo computacional de las simulaciones de este primer prototipo se basó en un consumo del 15% de una memoria RAM de 20GB.

- Mallado del diseño CAD

El mallado 3D es una colección de triángulos y vértices que aproximan una superficie diseñada en 3D. Ahora bien, es importante realizar una configuración de la malla en la silla salvaescaleras, ya que a partir de esto se va a realizar un análisis adecuado de la tensión de Von Misses, la deformación y las fuerzas máximas.

Específicamente, se realizó un mallado de tipo adaptativo, debido a que, dependiendo del tamaño de la pieza, se seleccionaba el tamaño de los elementos de la malla. A partir de esto, en la figura 35 se observa que el número de nodos arrojados por el software Inventor que se utilizaron para realizar el mallado del diseño CAD fue de 514671. Posteriormente, se realizó una configuración de la malla 3D utilizada en este prototipo en donde el tamaño medio de cada elemento fue de 0.1mm (figura 36). Se decidió emplear un tamaño de malla pequeño con el fin de obtener una mayor cantidad de elementos y nodos que permitieran conocer cómo se distribuye de mejor manera la fuerza en la región de interés.

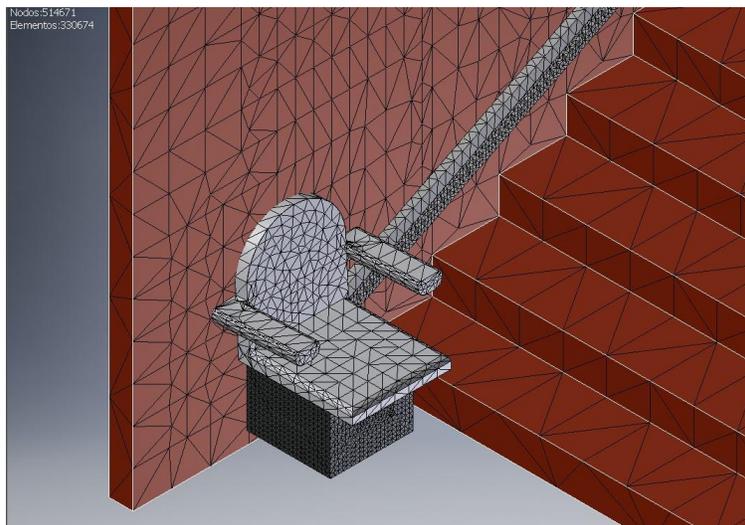


Figura 35. Número de nodos del mallado prototipo 1.

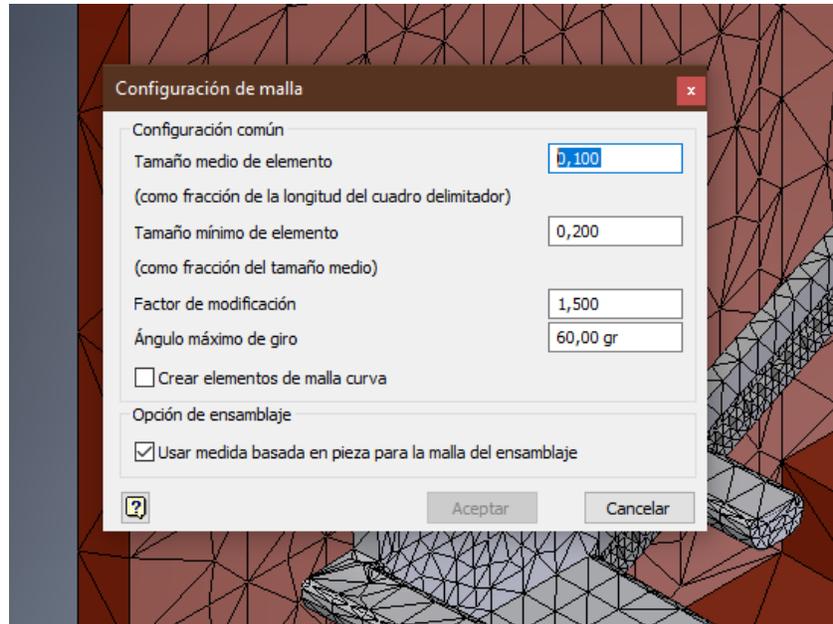


Figura 36. Configuración de la malla prototipo 1.

- **Análisis de carga**

Para realizar la simulación de soporte de carga máxima del sistema, se estableció una carga de 882,6 N sobre la silla (figura 37), los cuales son aproximadamente 900 Kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm²). Estos corresponden al peso de una persona de 90Kg, en donde la carga máxima que puede soportar es de 138 Kg. Adicionalmente, para realizar esta simulación, se establecieron las cargas en posicionamiento, indicando la dirección y la magnitud (figura 38).

La dirección de la carga se encuentra posicionada en el asiento, ya que en esta zona se concentra principalmente la carga de la persona cuando está sentada. Ahora bien, no se utilizaron las cargas calculadas para las potencias, por lo que no se pueden generar conclusiones de soporte de altas cargas del sistema. Es decir, al utilizar una carga de 90 kg, se puede establecer si se soporta o no el peso de un adulto normal, pero no hay datos suficientes para concluir si el sistema soporta altas cargas (150kg a 200kg).

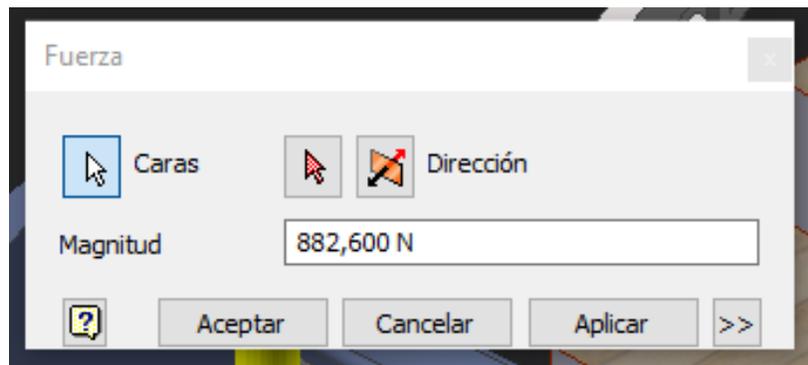


Figura 37. Asignación de carga y magnitud prototipo 1.

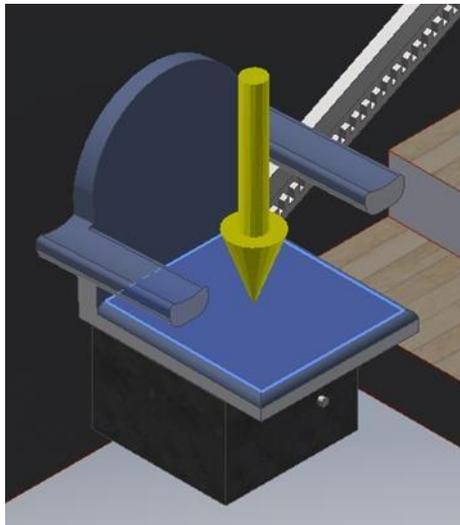


Figura 38. Diagramación de carga y magnitud prototipo 1.

Ahora bien, en la tabla 7 se observa de manera resumida los resultados obtenidos de esta simulación de soporte de carga. En este caso, no se establecieron límites de contorno ni restricciones, ya que la silla se modeló como una sola pieza en conjunto sin conexiones ni juntas, por lo que no había caras que necesitaran condición de contorno.

Entonces, estos resultados muestran la información de las tensiones obtenidas en los diferentes ejes aplicando la carga establecida (90 kg). Asimismo, en estos resultados se observa el límite de desplazamiento generado por la carga y el coeficiente de seguridad establecido. Los resultados se explican de forma más detallada a continuación:

Tabla 7. Resumen de resultados simulaciones prototipo 1.

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de Von Mises	0 MPa	26,9071 MPa
Primera tensión principal	-2,58823 MPa	25,6294 MPa
Tercera tensión principal	-16,0814 MPa	2,59951 MPa

Desplazamiento	0 mm	0,912785 mm
Coefficiente de seguridad	11,8508 su	15 su
Tensión XX	-7,56194 MPa	4,19785 MPa
Tensión XY	-3,25939 MPa	4,39344 MPa
Tensión XZ	-10,3917 MPa	3,39817 MPa
Tensión YY	-5,7126 MPa	6,95294 MPa
Tensión YZ	-9,63789 MPa	9,50207 MPa
Tensión ZZ	-9,15267 MPa	19,2176 MPa
Desplazamiento X	-0,0399551 mm	0,108195 mm
Desplazamiento Y	-0,182609 mm	0,678292 mm
Desplazamiento Z	-0,0596759 mm	0,602233 mm
Deformación equivalente	0 su	0,000243841 su

- Tensión Von Mises

La tensión de Von Mises es una magnitud física que evalúa la energía de distorsión y deformación de un elemento. Esta magnitud está definida por la siguiente fórmula, en donde se consideran las tensiones y torques en cada punto de los tres ejes x, y, z.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Esta magnitud se estableció en la dirección del asiento (flecha amarilla observada en la figura 39), simulando la carga de una persona al estar sentada en la silla. Con un rango establecido de 0 a 26.91 MPa según lo obtenido en la tabla 7, se logra vivenciar en la figura 39 que no existe un mínimo desplazamiento en la pieza y esta logra soportar el peso calculado anteriormente. Esto debido a que se observa un color azul en toda la pieza de diseño del prototipo. Sin embargo, se debería simular con una carga máxima para observar el comportamiento del prototipo.

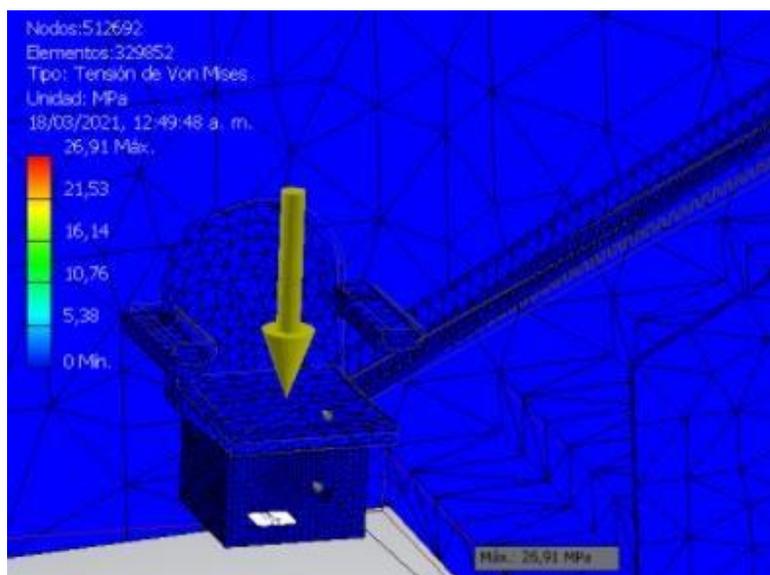


Figura 39. Análisis de Von Mises prototipo 1.

- Análisis de seguridad

El coeficiente de seguridad permite indicar las áreas del modelo que es probable que fallen bajo la carga. En la figura 40 se demuestra que no existe la posibilidad de falla y en tal caso de existir es tan mínima que no se percata en los colores de la gráfica, ya que se presentaron valores altos para el coeficiente de seguridad (11,8 us – 15us). Esto debido a que en todo el prototipo se obtiene un color azul, indicando que se soportan altas cargas sin que se generen fallas. Esto indica que el prototipo es seguro al estar una persona sentada en la silla. Sin embargo, en este prototipo se estableció una carga de 90kg y en la tabla 3 se muestra que debe soportar entre 150 kg y 200kg. Por lo tanto, los resultados de esta simulación no aseguran que la silla funcione y sea segura.

Además, al tener una silla no ergonómica que puede incomodar al usuario, se puede generar inseguridad. Esta silla del prototipo 1 no es ergonómica porque no tiene un buen asiento y espaldar diferenciado, y no se tiene un reposapiés estable. Por último, no se tuvo en cuenta el cinturón de seguridad para evitar caídas. En conclusión, esta simulación establece que el prototipo es seguro con 90kg de carga, sin embargo, es necesario agregar más carga para comprobar si funciona de manera adecuada, y asimismo, es necesario mejorar el diseño a una silla más ergonómica.

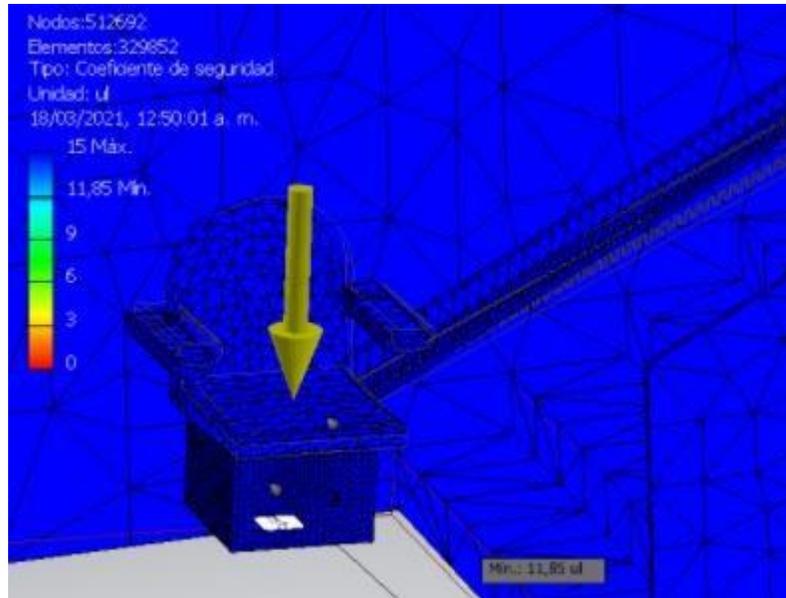


Figura 40. Análisis de seguridad prototipo 1.

- Análisis de desplazamiento

El análisis de desplazamiento permite indicar si se presenta algún desplazamiento mecánico de la pieza diseñada al establecer cierta carga sobre esta. Ahora bien, según lo mostrado en la figura 41, no se percibe ningún desplazamiento ejercido por el peso total que debe resistir (rangos de desplazamiento muy bajo: 0 a 0,9 mm). Esto indica que, según la simulación estática, este modelo bajo sus especificaciones de diseño no tendra ningún problema en soportar el peso de una persona promedio. Sin embargo, debera agregarse más carga (150kg a 200kg) para observar el comportamiento.

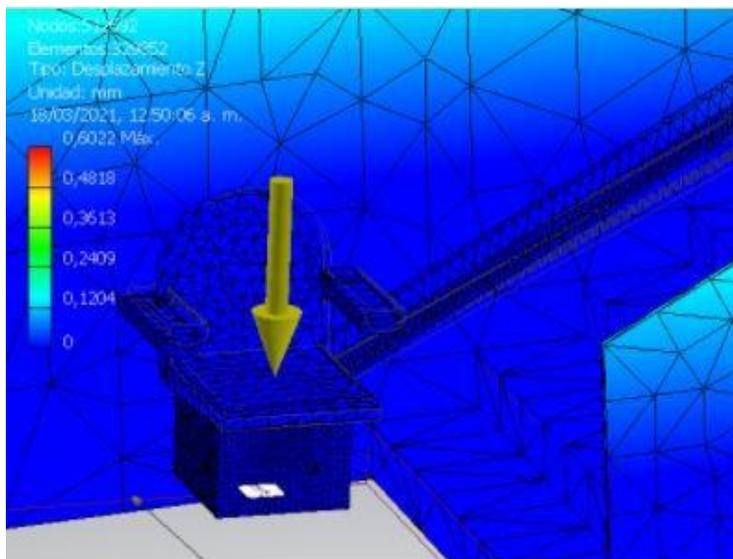


Figura 41. Análisis de desplazamiento prototipo 1.

3.2. Simulaciones segundo prototipo

En segundo lugar, se procedió a realizar las simulaciones del segundo prototipo, el cual es un prototipo más completo. Específicamente, se hizo un análisis por elementos finitos (FEA) con el fin de evaluar la pertinencia y factibilidad del prototipo de diseño de silla salvaescaleras propuesto. Para dicho fin se utilizó el software Fusión 360, en donde el costo computacional de simulación fue de un consumo del 40% de una memoria RAM de 20GB.

En primer lugar, se llevó a cabo la creación de la malla. Adicionalmente, la malla debía ajustarse al tamaño de las piezas por lo que se estableció un mallado adaptativo. Esto quiere decir, que entre más pequeña fuera alguna de las piezas presentes en el ensamblaje de la silla salvaescalera, los tamaños de los elementos en esta parte de la malla iban a ser menores en comparación a piezas que fueran de mayor dimensión.

De esta forma, se garantiza hacer una diferenciación de las partes pequeñas, como lo son los soportes para brazos y algunos componentes de la conexión con el reposapiés. Por último, es importante mencionar que no se realizaron simulaciones en movimiento, sin embargo, estas serán tenidas en cuenta a futuro, ya que son importantes para confirmar si el sistema en movimiento soporta las cargas establecidas.

- Mallado del diseño CAD

Ahora, haciendo énfasis en las características de la malla adaptativa, se utilizaron elementos tetraédricos (C3D4) en su construcción. El tamaño de los elementos de malla utilizados para las partes más grandes de la silla (como lo son el espaldar, el asiento y el reposapiés) tienen una magnitud de 4 mm. El motivo por el cual se les asignó un tamaño específico a estas piezas fue para realizar un análisis adecuado y lo más detallado posible de la tensión de Von Mises, la deformación y las fuerzas de máximo y mínimo principal. Una vez concluido el proceso de elaboración de la malla, el software Fusion 360 arrojó una malla que se encuentra conformada por 918591 nodos y 546935 elementos de malla (figura 42). Estos nodos y elementos son necesarios para analizar de manera adecuada cómo se distribuye la fuerza en la región de interés.



Figura 42. Malla prototipo 2.

En segundo lugar, se asignaron los respectivos materiales a las piezas que conforman el ensamblaje de la silla salvaescalera. Se consideraron únicamente dos materiales. Para la pieza denominada *estructura, platina, perfil, placa, esqueleto de caja y caja* se le asignó como material el acero AISI 1018 209 RT en lugar del acero AISI 1020, ya que este último tenía un límite de elasticidad menor, y por ende era menos fluente. Mientras tanto, el resto del ensamblaje se le estableció como material el plástico ABS, ya que es el material convencional utilizado para el desarrollo de sillas salvaescaleras y tiene muy buena resistencia a altas cargas. Las propiedades mecánicas de los materiales escogidos se presentan en las tablas 8 y 9. Todas estas propiedades, se tuvieron en cuenta para llevar a cabo las simulaciones desarrolladas.

Tabla 8. Propiedades mecánicas el acero AISI 1018 209 RT.

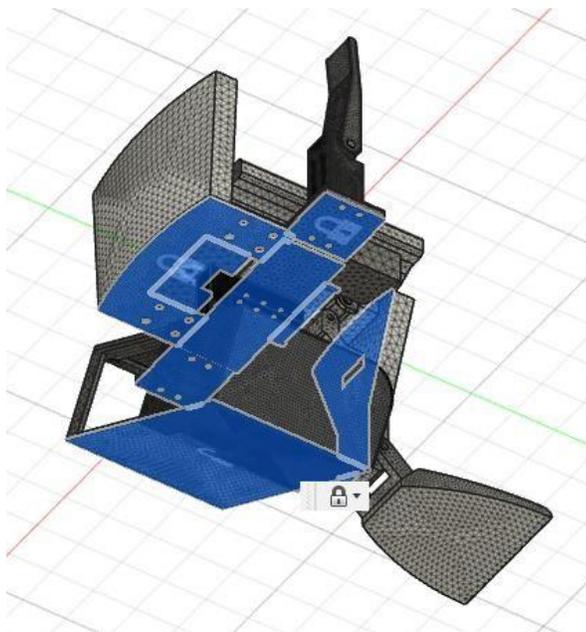
Densidad	7.87E-06 kg / mm ³
Módulo de Young	207000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Límite de elasticidad	572 MPa
Resistencia máxima a tracción	696 MPa

Tabla 9. Propiedades mecánicas del plástico ABS.

Densidad	1.06E-06 kg / mm ³
Módulo de Young	2240 MPa
Coefficiente de Poisson	0.38
Límite de elasticidad	20 MPa
Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa

- Análisis de carga

En tercer lugar, se colocaron las condiciones de contorno y carga para realizarla simulación. Con respecto a las condiciones de contorno, se seleccionaron 8 caras del ensamblaje, donde no se debería producir ningún tipo de movimiento puesto que, de acuerdo con el diseño planteado, estas partes estarán ancladas y sujetas al motor que permite el desplazamiento de la silla salvaescalera. Por tal motivo, se les restringieron los movimientos a las caras seleccionadas (caras de color azul en la figura 43) en los tres ejes de coordenadas (x, y, z) tal como se puede observar en la figura 43.

**Figura 43.** Restricciones para el ensamblaje prototipo 2.

En el caso de las condiciones de carga, se seleccionaron dos zonas en específico para la distribución de las cargas en posicionamiento. Estas regiones fueron el asiento y el reposapiés. Se seleccionó un peso de una persona equivalente a 75 kg para realizar las simulaciones de carga en el diseño propuesto de silla salvaescalera.

De acuerdo con la información encontrada en literatura, una persona al sentarse en una silla producirá una fuerza igual al 80% de su peso corporal en el asiento, la cual es constante (Figura 44 y 45). Este valor corresponde al 80% del peso de una persona equivalente a 75kg.

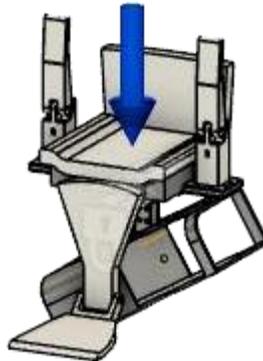


Figura 44. Dirección fuerza sobre la pieza asiento.

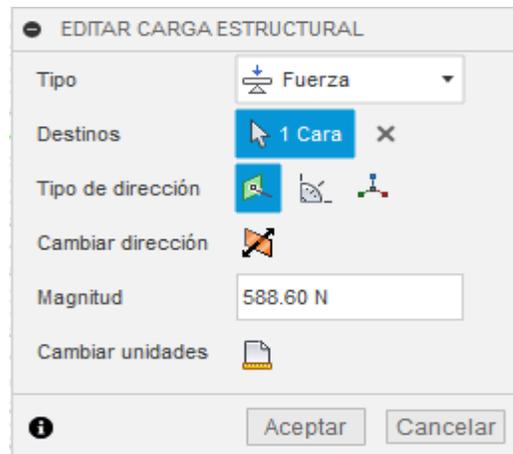


Figura 45. Asignación de carga y dirección para asiento.

Por otra parte, la fuerza que recibe el piso mientras una persona está sentada es equivalente al 20% de su peso corporal (Figura 46 y 47). Esta fuerza es correspondiente a la carga de las piernas y los pies de una persona de 75kg.

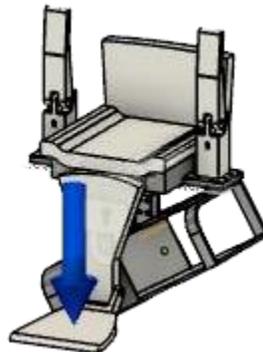


Figura 46. Dirección fuerza sobre reposapiés.

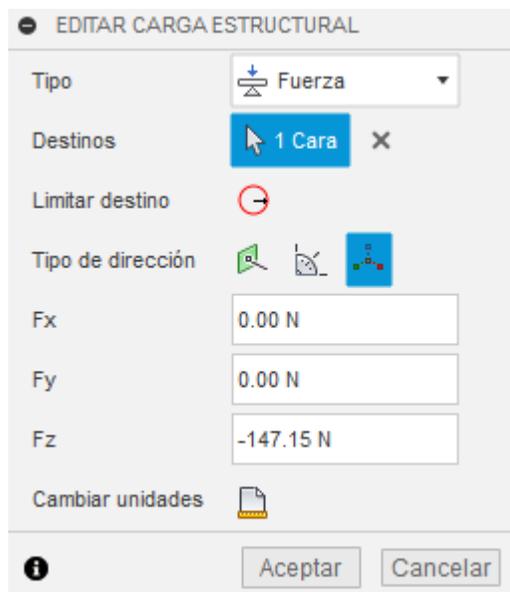


Figura 47. Asignación de carga y dirección para reposapiés.

Ahora bien, para este prototipo tampoco se utilizaron las cargas calculadas para las potencias, por lo que no se pueden generar conclusiones de soporte de altas cargas del sistema. Es decir, al utilizar una carga de 75 kg, se puede establecer si se soporta o no el peso de un adulto promedio, pero no hay datos suficientes para concluir si el sistema soporta altas cargas que se requieren comprobar (150kg a 200 kg). Estas cargas están establecidas en las características esenciales de una silla salvaescalera. Con esto en mente, es probable que el sistema sea funcional, sin embargo, estaría trabajando con esfuerzos al límite sin tener un soporte alto de cargas para evitar cualquier ruptura o accidente con el prototipo.

Los resultados obtenidos para la simulación realizada se pueden observar en la tabla 10 y 11. Estos resultados arrojan la información de las tensiones obtenidas en los diferentes ejes aplicando la carga establecida (75 kg). Asimismo, en estos resultados se observa el límite de desplazamiento generado por la carga y el coeficiente de seguridad establecido.

Tabla 10. Resumen de la simulación realizada para la región del reposapiés para una persona de 75 Kg.

Nombre	Mínimo	Máximo
Coeficiente de seguridad		
Coeficiente de seguridad (por cuerpo)	1.274	15
Tensión		
Von Mises	0 MPa	15.7 MPa
Primera principal	-5.053 MPa	9.577 MPa
Tercera principal	-21.71 MPa	2.352 MPa
Normal XX	-7.316 MPa	4.603 MPa
Normal YY	-21.38 MPa	5.216 MPa
Normal ZZ	-6.43 MPa	5.312 MPa
Corte XY	-1.406 MPa	3.787 MPa
Corte YZ	-3.414 MPa	4.655 MPa
Corte ZX	-2.397 MPa	1.6 MPa
Desplazamiento		
Total	0 mm	3.798 mm
X	-0.3833 mm	0.7679 mm
Y	-0.5831 mm	0.558 mm
Z	-3.717 mm	0.03519 mm
Fuerza de reacción		
Total	0 N	51.69 N
X	-14.71 N	6.34 N
Y	-50.29 N	27.05 N
Z	-24.6 N	18.55 N
Deformación		
Equivalente	0	0.008018
Primera principal	-1.231E-11	0.00713
Tercera principal	-0.008583	2.11E-16
Normal XX	-0.001603	0.003387
Normal YY	-0.007211	0.001237
Normal ZZ	-0.001178	0.001997
Corte XY	-0.001732	0.004667
Corte YZ	-0.004207	0.005735
Corte ZX	-0.002954	0.001972

Tabla 11. Resumen de la simulación realizada para la región del asiento para una persona de 75 kg.

Nombre	Mínimo	Máximo
Coeficiente de seguridad		
Coeficiente de seguridad (por cuerpo)	15	15
Tensión		
Von Mises	0 MPa	2.15 MPa
Primera principal	-0.3497 MPa	2.141 MPa
Tercera principal	-0.9694 MPa	0.3016 MPa
Normal XX	-0.9626 MPa	1.061 MPa
Normal YY	-0.3522 MPa	0.4018 MPa
Normal ZZ	-0.5201 MPa	2.135 MPa
Corte XY	-0.189 MPa	0.2005 MPa
Corte YZ	-0.2343 MPa	0.382 MPa
Corte ZX	-0.2605 MPa	0.357 MPa
Desplazamiento		
Total	0 mm	0.006329 mm
X	-0.001346 mm	0.001305 mm
Y	-6.667E-04 mm	8.019E-04 mm
Z	-0.006198 mm	7.574E-06 mm
Fuerza de reacción		
Total	0 N	26.18 N
X	-3.009 N	3.377 N
Y	-12 N	11.53 N
Z	-26.18 N	24.05 N
Deformación		
Equivalente	0	1.681E-04
Primera principal	-1.634E-07	1.598E-04
Tercera principal	-1.399E-04	1.407E-12
Normal XX	-2.121E-05	4.708E-05
Normal YY	-2.802E-05	3.008E-05
Normal ZZ	-1.025E-04	5.612E-05
Corte XY	-3.392E-05	3.223E-05
Corte YZ	-3.462E-05	1.4E-04
Corte ZX	-8.405E-05	8.171E-05

- Tensión Von Mises

Recordando la definición, la tensión de Von Mises es una magnitud física que evalúa la energía de distorsión y deformación de un elemento. Esta magnitud está definida por la siguiente formula, en donde se consideran las deformaciones y tensiones en los ejes x, y, z.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Ahora bien, de acuerdo con los resultados de la tabla 10 y 11, es posible afirmar que la fuerza aplicada en las dos zonas de interés para el diseño de silla salvaescalera no tiene ningún riesgo de ruptura del material. En el caso de la región del reposapiés, una vez concluida la simulación, se alcanza una tensión máxima de Von mises de 15.7 MPa. A partir de lo mencionado anteriormente y la información reportada en la tabla 9, la magnitud para la tensión de Von mises es inferior al límite elástico del plástico ABS, lo cual significa que no se presenta un riesgo considerable de ruptura del material por el pesosoportado. Esto a su vez es consistente con los resultados obtenidos para el coeficiente de seguridad.

Por otra parte, para la región del asiento, se alcanza una tensión máxima de Von mises igual a 2.15 MPa. De igual forma como ocurre en la región del reposapiés, dicha tensión no supera la magnitud del límite elástico del material. Por tal motivo, el material no tiene probabilidad de sufrir una ruptura por el peso soportado. En conclusión, es posible afirmar que los materiales seleccionados para las piezas de interés son capaces de soportar las cargas aplicadas y son pertinentes para el diseño de la silla. Sin embargo, sería ideal evaluar con cargas más altas.

- Análisis de seguridad

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 10 y 11 junto con la figura 48 es posible afirmar que el coeficiente de seguridad del diseño propuesto de silla salvaescalera es elevado en la mayor parte de sus estructuras y por ende la silla es pertinente de utilizar. Entonces, tanto para el reposapiés como para el asiento, el coeficiente de seguridad llega al máximo valor (15 us). Sin embargo, el coeficiente mínimo de seguridad reportado se ubica en el reposapiés y este es igual a 1.274 us. Esto quiere decir que el material seleccionado es capaz de soportar un máximo de 187.46N antes de que exista la posibilidad de una deformación o en el peor de los escenarios una ruptura del material.

Dicho riesgo se puede solucionar cambiando el material propuesto para esta pieza, por uno que posea un mayor módulo de Young o agregándole un tapizado a los reposapiés, que permita una mayor seguridad a los usuarios. Otra posible alternativa sería optimizar el diseño de esta pieza para permitir una mejor distribución de la carga. Asimismo, es importante añadir el cinturón de seguridad para evitar caídas en el usuario. Por último, sería ideal añadir más carga en el prototipo para observar su comportamiento de mejor manera (de 150kg a 200kg).

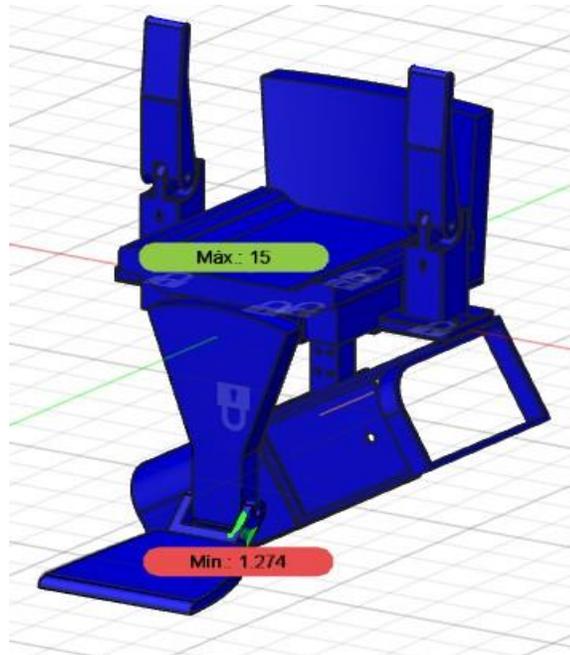


Figura 48. Análisis del coeficiente de seguridad prototipo 2.

- Análisis de desplazamiento

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 10 y 11, la deformación que se produce en el reposapiés es igual a 3.798 mm, mientras tanto, en el asiento es igual a 0.006 mm luego de concluida la simulación. La deformación de la pieza en ambas regiones de interés es insignificante. Es posible afirmar que no se presentan riesgos de ruptura en las zonas de estudio, puesto que la deformación obtenida no es cercana al 2% del tamaño inicial de la pieza del asiento y del reposapiés. Por ende, no se supera el límite elástico del material. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el coeficiente de curiosidad. Sin embargo, es importante realizar simulaciones que soporten mayor carga para observar los resultados y comportamientos obtenidos.

3.3. Simulaciones de costos del prototipo

Con el fin de estimar la viabilidad económica del proyecto, se muestra a continuación una tabla general de materiales y costos del proceso de manufactura de los elementos requeridos en el diseño del prototipo 2 ya que es el más completo. Esto con el fin de considerar un punto de referencia para el costo estimado que tendría el prototipo en el mercado colombiano.

Específicamente, se realizaron cotizaciones del costo del acero AISI 1018 209 RT, del plástico ABS y del motor trifásico. El motor trifásico vendido como pieza completa tiene un costo de \$1.700.000 pesos colombianos (información dada por el SENA). Por otro lado, para las piezas de acero AISI 1018 209 RT diseñadas se estimó un costo general de acuerdo con lo establecido en el mercado, teniendo como guía la medición en metros de cada estructura diseñada. Como ejemplo, un eje de acero AISI 1018 de 1 metro de longitud y 4 mm de radio cuesta \$22.000 pesos colombianos en el mercado. Con esto en mente, se hizo una aproximación a los ejes y demás piezas de acero diseñadas según sus mediciones (planos en Anexos), así como a las piezas diseñadas en plástico ABS y en bronce.

Tabla 12. Estimación de costos generales.

Pieza	Cantidad	Costo unitario manufactura	Total
Riel (Acero)	1 (6 metros de longitud)	\$100.000	\$100.000
Motor	1	\$1.700.000	\$1.700.000
Silla (Plástico ABS)	1	\$450.000	\$450.000
Engranajes (Bronce)	5	\$100.000	\$500.000

Ejes (Acero)	6 (1/2 metro de longitud cada uno)	\$18.000	\$108.000
Estructura silla (Acero)	1	\$200.000	\$200.00
Platina (Acero)	1	\$50.000	\$50.000
Placa (Acero)	1	\$100.000	\$100.000
Caja de transmisión (Nylon)	1	\$200.000	\$200.000
TOTAL			\$3.408.000

Ahora bien, también es importante tener en cuenta el costo de instalación de la pieza que estaría alrededor de \$1.000.000 pesos colombianos. Con esto en mente, el costo total de la pieza incluyendo la ganancia que se tendría del 20%, sería de \$5.089.000 pesos colombianos aproximadamente (\$3.408.000 manufactura + \$1.000.000 instalación + \$681.600 ganancia).

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Se diseñó y simuló un prototipo de silla salvaescaleras de bajo costo para los hogares de las personas con discapacidad de movilidad. Los materiales seleccionados fueron: ABS plástico para el diseño de la silla y acero AISI 1018 para los ejes, bronce para los engranajes y Nylon para la caja de transmisión. Estos materiales se escogieron debido a que se encuentran fácil en el mercado, su proceso de manufactura no es complicado, tienen un límite elástico alto permitiendo soportar altas cargas antes de deformarse y el costo de producción no es elevado por lo que se logra cumplir el propósito de diseño de bajo costo. Ahora bien, se estima que la silla tenga un costo de \$4.400.000 pesos colombianos en el mercado, los cuales fueron obtenidos del análisis general de costos realizado.

El diseño del prototipo, se basó en el estudio y caracterización del funcionamiento y los componentes de las sillas salvaescaleras que aparecen en el mercado colombiano, resultado que indica que estas sillas precisan de energía eléctrica para su funcionamiento, incluyen motor reductor (trifásico), y sistema de piñones y rieles que permiten que circule un sistema aproximadamente a una velocidad de 0.15 m/s, según lo estipulado en el estudio de Hüseyin et. al, 2018 y en la norma **NTC 2769-5**. Asimismo, se encontró que las piezas principales que componen la silla son: la estructura, el espaldar, el asiento, los reposabrazos y el reposapiés. Estas son esenciales para establecer una silla ergonómica que genere comodidad en el usuario. Con esto en mente, se concluye que la investigación de marco teórico relacionado con las sillas salvaescaleras fue esencial para comprender su funcionamiento y para establecer las bases del prototipo propuesto en este trabajo de grado.

A partir de lo anterior, se diseñó un prototipo de silla salvaescaleras que se compone de espaldar, asiento, reposabrazos junto con el soporte para reposabrazos y reposapiés junto con la conexión de reposapiés. Estas piezas anteriores se ensamblan en una pieza llamada estructura, la cual recibe su nombre por ser la base y punto de acople de las demás piezas que componen la silla salvaescalera. Adicionalmente, se suma a lo anterior, unas piezas que permiten la unión de la caja de transmisión con la silla (platina, placa, perfil cuadrado). Comparando este diseño con lo mencionado en la tabla 3 de las características estándares que debe tener una silla salvaescalera, se logró diseñar una silla ergonómica, cómoda y de bajo costo para los usuarios.

Por otra parte, en las simulaciones realizadas se determinó el análisis de tensión por medio la metodología Von Mises resultando que la silla soporta el peso de un adulto promedio (75 kg), alcanzando una tensión máxima de 15.7 MPa para los reposapiés y de 2.15 MPa para el asiento, lo cual no sobrepasa el límite elástico del plástico ABS, por lo que soporta las cargas establecidas. Por otra parte, el cálculo de seguridad mostró un valor máximo de 15us tanto para el reposapiés como para el asiento. Sin embargo, tuvo un límite mínimo de seguridad en el reposapiés de 1.274us, llegando a la conclusión de que se necesita mejorar el diseño de esta última pieza. Teniendo esto en cuenta, se puede garantizar de manera parcial que el sistema soporta las cargas de un adulto normal sin que se provoquen fallas notorias en su funcionamiento. Por último, el análisis de desplazamiento indica que la silla es capaz de soportar el peso de una persona promedio sin generar desplazamiento del prototipo. No obstante, se pudieron haber realizado simulaciones de la silla en movimiento para observar si el sistema no se veía afectado al estar en funcionamiento (subiendo o bajando escaleras) y se deberían agregar cargas más altas en las simulaciones, para asegurar que el sistema funcione sin ningún riesgo de deformación.

Según las características establecidas en **la tabla 3** y en la norma **NTC 6047**, se debieron tomar en cuenta cargas más altas para verificar el funcionamiento del sistema, ya que un sistema de plataforma debe soportar entre 150 kg y 200kg en su totalidad, lo cual se puede extrapolar a

una silla salvaescalera al tener el mismo funcionamiento de una plataforma. Asimismo, no se agregó el cinturón de seguridad en el diseño, y este es esencial para evitar caídas en el usuario según lo estipulado en la norma **NTC 2769-5**, por lo que en este aspecto el diseño necesita mejorar.

Finalmente, el motor seleccionado para el funcionamiento del sistema fue uno trifásico debido a que todas las sillas salvaescaleras en el mercado están diseñadas con este motor reductor. Este funciona de manera estándar a 24 VCC con una potencia de 0.5 Hp, el cual garantiza el desempeño adecuado del sistema operando a una velocidad de 900 rpm.

Ahora bien, el diseño del prototipo utilizando los softwares Inventor y Fusion 360, permitió la obtención de las piezas y planos en formato 3D que componen el sistema garantizando, así como los ajustes, la estética, la forma y la función de los elementos mecánicos diseñados. Por medio de los mismos softwares, se obtuvo el análisis de carga, tensión de Von Mises, análisis de seguridad y análisis de desplazamiento resultando en todos los casos que no se presentaran rupturas para las cargas establecidas y los materiales seleccionados. Sin embargo, los resultados de este proyecto de grado pueden funcionar para una aproximación de un prototipo de silla salvaescalera, ya que requiere mejorar en los aspectos mencionados anteriormente. Es importante realizar más pruebas y añadir características de diseño que no se incorporaron para generar mayor seguridad en el prototipo diseñado. Dentro de esto se encuentra que se debe agregar más carga a las simulaciones, para verificar que el sistema soporte cargas de 150 kg a 200 kg (mencionado en la tabla 3).

Asimismo, se debe agregar al diseño un cinturón de seguridad y un botón de parada de emergencia, para mejorar y asegurar el sistema de seguridad.

Con esto en mente, se puede concluir que el método utilizado y el proceso llevado a cabo para el diseño fue efectivo de manera general para generar una aproximación, esto debido a que con el primer prototipo se llegó a un acercamiento del sistema, y con el segundo prototipo se establecieron las mejoras necesarias para que se llegara a un prototipo más funcional. Sin embargo, se considera pertinente realizar más pruebas y evaluar de mejor manera el diseño de la silla. Ahora bien, con el método establecido en este trabajo se espera que otra persona pueda desarrollar este mismo prototipo, ya sea en los softwares Inventor y Fusion 360, o en cualquier otro software utilizado para diseño CAD 3D y simulaciones, y que, con esto, también se le permita mejorar los resultados obtenidos.

4.2. Recomendaciones

Según lo mencionado en las conclusiones, a continuación, se establecen diferentes recomendaciones que a futuro se pueden llevar a cabo para que el proyecto tenga un mayor alcance.

1. Se recomienda realizar el ensamblaje del diseño de la silla salvaescaleras según el prototipo 2 junto con el sistema de transmisión y el riel, para generar el sistema completo de piñón-cremallera.
2. Se recomienda realizar simulaciones con altas cargas soportando el sistema (150kg – 200 kg) para observar si el prototipo soporta estas cargas generando una mayor seguridad al usuario.
3. Se recomienda realizar simulaciones del prototipo 2 en movimiento para evaluar el sistema al estar en funcionamiento.
4. Se recomienda desarrollar este prototipo a escala real para realizar los ajustes necesarios, así como generar las condiciones para su fabricación nacional.

Referencias Bibliográficas

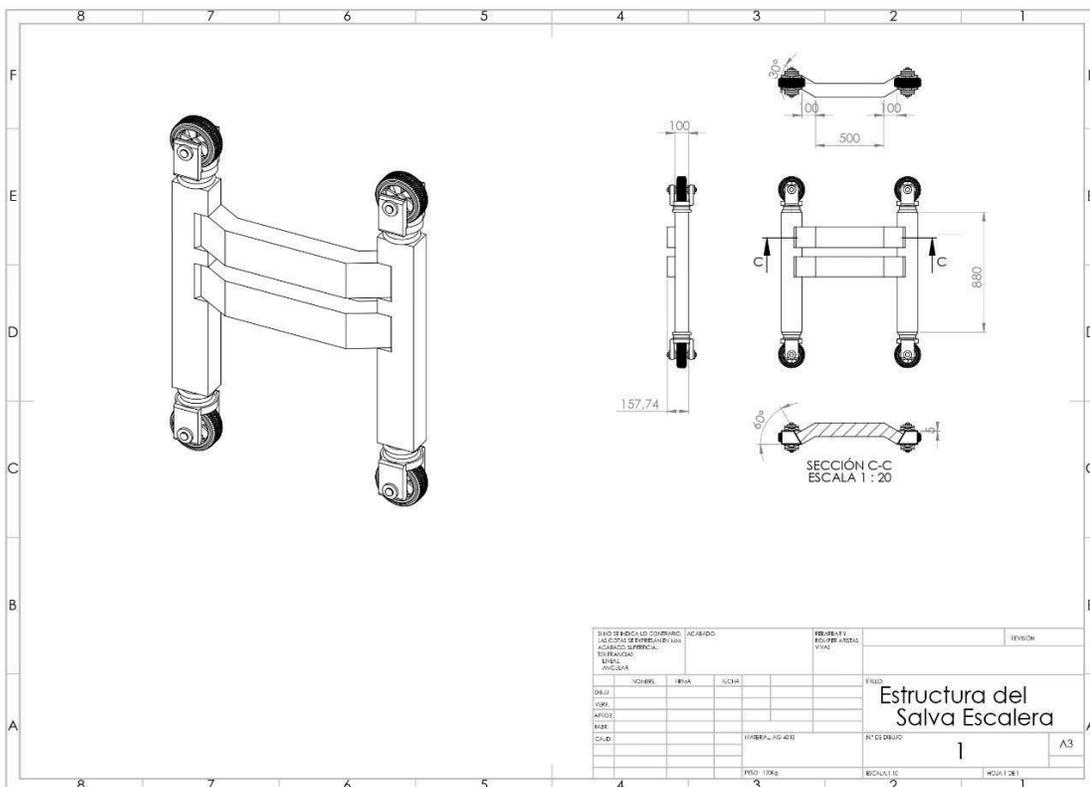
- ArchiExpo. (2021). Plataforma salvaescaleras para discapacitados. Recuperado de <https://www.archiexpo.es/prod/thyssenkrupp-access/product-61349-265757.html>
- Ascensores y más. (2021). Elevadores verticales. Recuperado de <https://ascensoresymas.com/elevadores-verticales-corto-recorrido/>
- AutoDesk: Inventor. (2021). Recuperado de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>
- AutoDesk: Fusion 360. (2021). Recuperado de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
- Blanco, B., Villalobos, F. & Mendoza, A. (2013). Diseño y cálculo de una silla salvaescaleras. I.E.S. LUIS VIVES.
- Blandón, Alejandro. (2010). Diseño de un dispositivo salva desniveles para edificaciones que impiden el acceso a personas en situación de discapacidad. Universidad EAFIT de Colombia. Departamento de Ingeniería de Diseño de Producto.
- Bravo Dussan, Julián & Grajales Arboleda, Jaime. (2019). Modelado de plataforma salvaescaleras móvil para pacientes en condición de discapacidad. Universidad de Caldas.
- Castaño Rodríguez, M., Parga Solano, M., Viveros Gutiérrez, J. (2005). Situación de la población discapacitada en Neiva afiliada a Asodisneiva en relación con la seguridad social en salud durante el año 2005 (Posgrado gerencia de servicios de salud y seguridad social). Universidad Surcolombiana.
- Collins, F., & Smith, K. (2003). *Factors to consider when purchasing a stairlift*. *British Journal of Therapy and Rehabilitation*, 10(9), 417–420. doi:10.12968/bjtr.2003.10.9.13
- Correa Montoya, Lucas y Castro Martínez, Martha Catalina. (2016). Discapacidad e inclusión social en Colombia. Informe alternativo de la Fundación Saldarriaga Concha al Comité de Naciones Unidas sobre los derechos de las personas con discapacidad. Editorial Fundación Saldarriaga Concha. Bogotá D.C., Colombia. 162p. Recuperado de https://www.saldarriagaconcha.org/wp-content/uploads/2019/01/pcd_discapacidad_inclusion_social.pdf

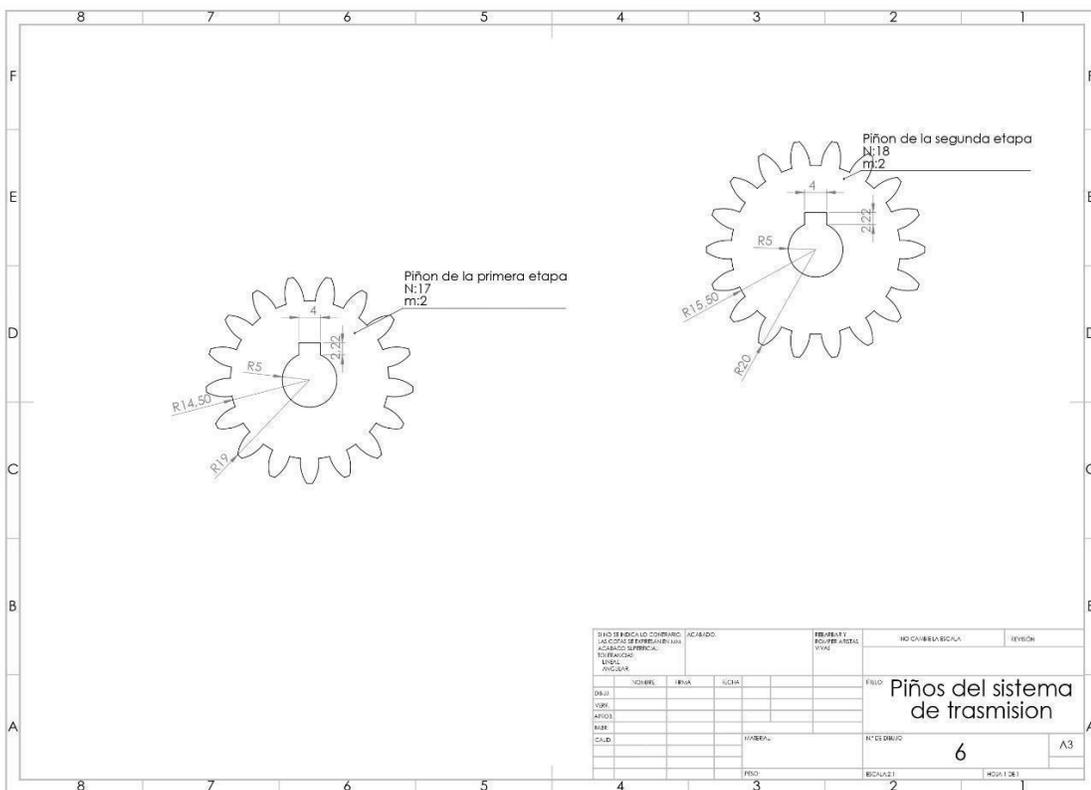
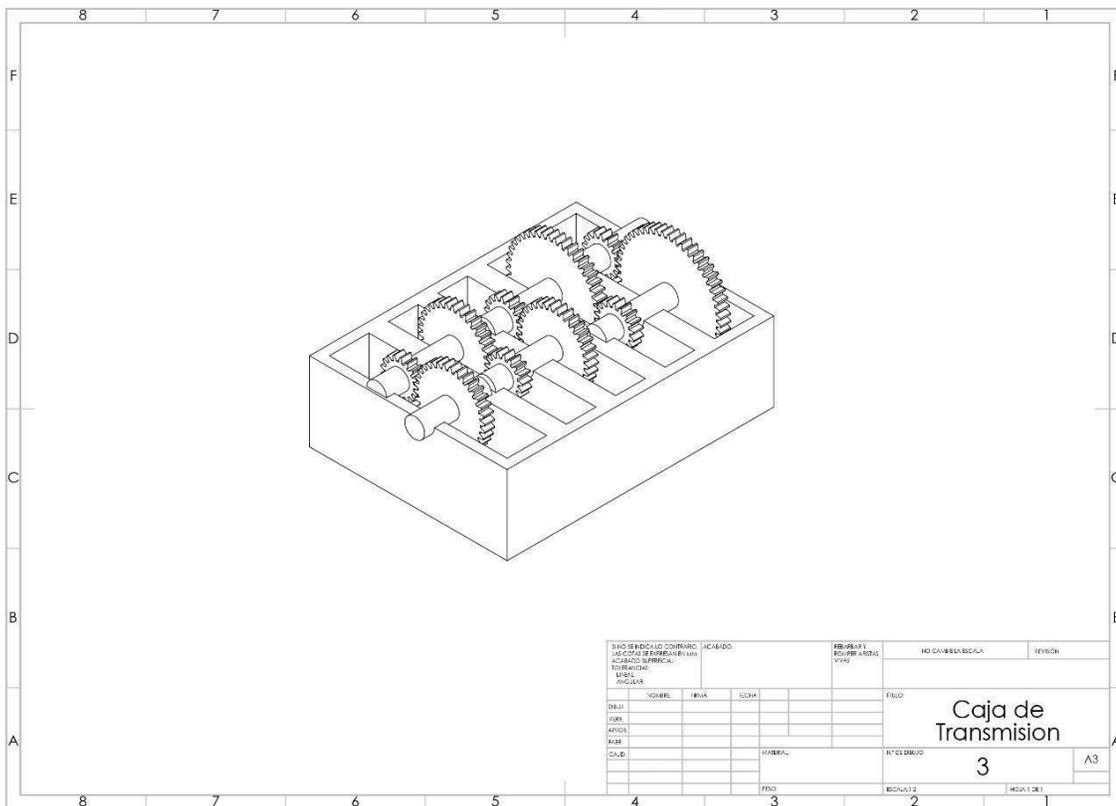
- Díaz Costa, J. (2017). Acero SAE 1020. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/351052774/Acero-SAE-1020>
- Elevadores Centroamericanos INT. (2018). Todo lo que necesitas saber sobre las plataformas o sillas salvaescaleras. Recuperado de <https://www.elevadorescentroamericanos.com/todo-sobre-sillas-salvaescaleras/>
- Farina, A. (2018). Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento. Recuperado de https://editores-srl.com.ar/sites/default/files/ie330_farina_motores_electricos.pdf
- García, M., Pérez, L., & Villareal, S. (2017). Diseño de un salvaescaleras a bajo costo. Abril de 2018, de Universidad del Norte Sitio web: <http://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/7353>
- Hasso Plattner. (s.f.). An introduction to Design Thinking. Process Guide. Institute of Design at Stanford.
- Hüseyin et. al. (2018). A Novel Conceptual Design of a Stairlift for Elderly and Disabled People. Gazi University.
- Icontec. (2012). *Ascensores especiales para el transporte de personas y cargas* (Norma técnica colombiana 2769).
- Icontec. (2013). *Accesibilidad al medio físico. Espacios de servicio al ciudadano en la administración pública. Requisitos* (Norma técnica colombiana 6047).
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). Concepto de movilidad reducida. Dirección General de Riesgos Profesionales. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/Lists/Glosario/DispForm.aspx?ID=40&ContentTypeId=0x0100B5A58125280A70438C125863FF136F22>
- OMS (2011). Informe mundial sobre la discapacidad. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/INTOR/informe-mundial-discapacidad-oms.pdf>
- Ortopedia MIMAS. (2020). Comparativa de las 4 mejores sillas salvaescaleras para comunidades y viviendas. Recuperado de <https://www.ortopediamimas.com/blog-de-ortopedia/mejores-sillas-salvaescaleras-para-comunidades/>
- Pérez Fernández, M. (2018). Nueva generación de materiales plásticos basados en ABS de altas prestaciones técnicas o más sostenibles con el medio ambiente. Universidad autónoma de Barcelona.

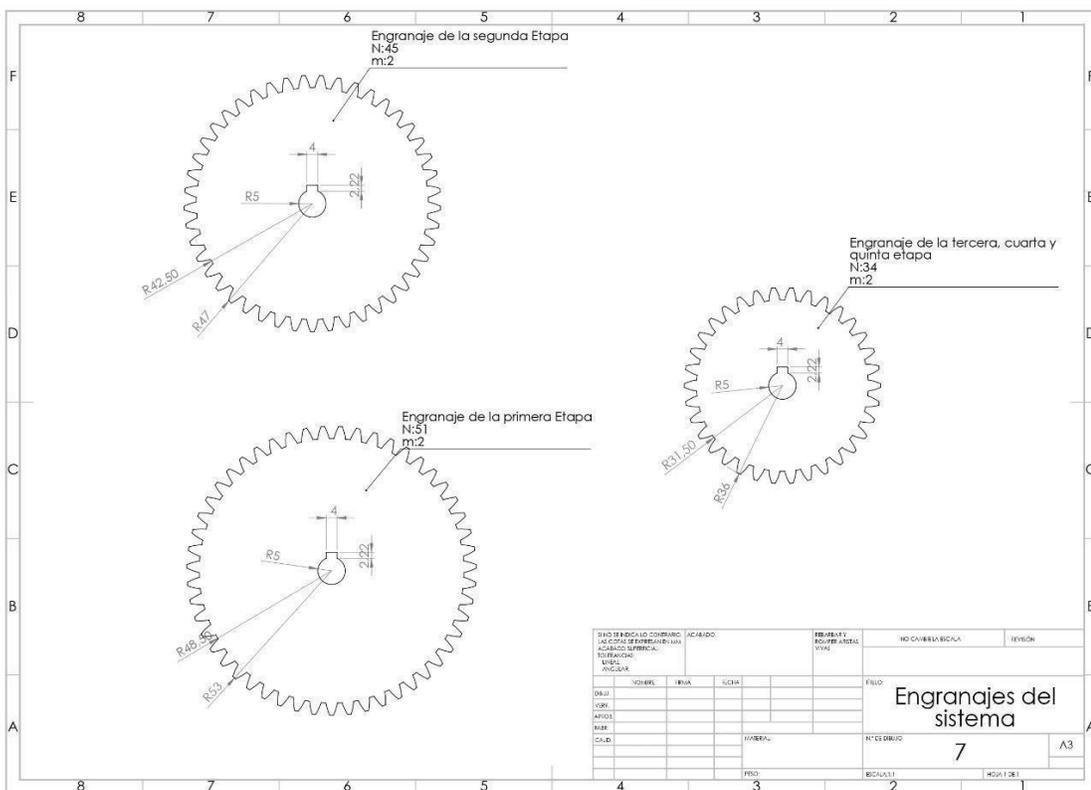
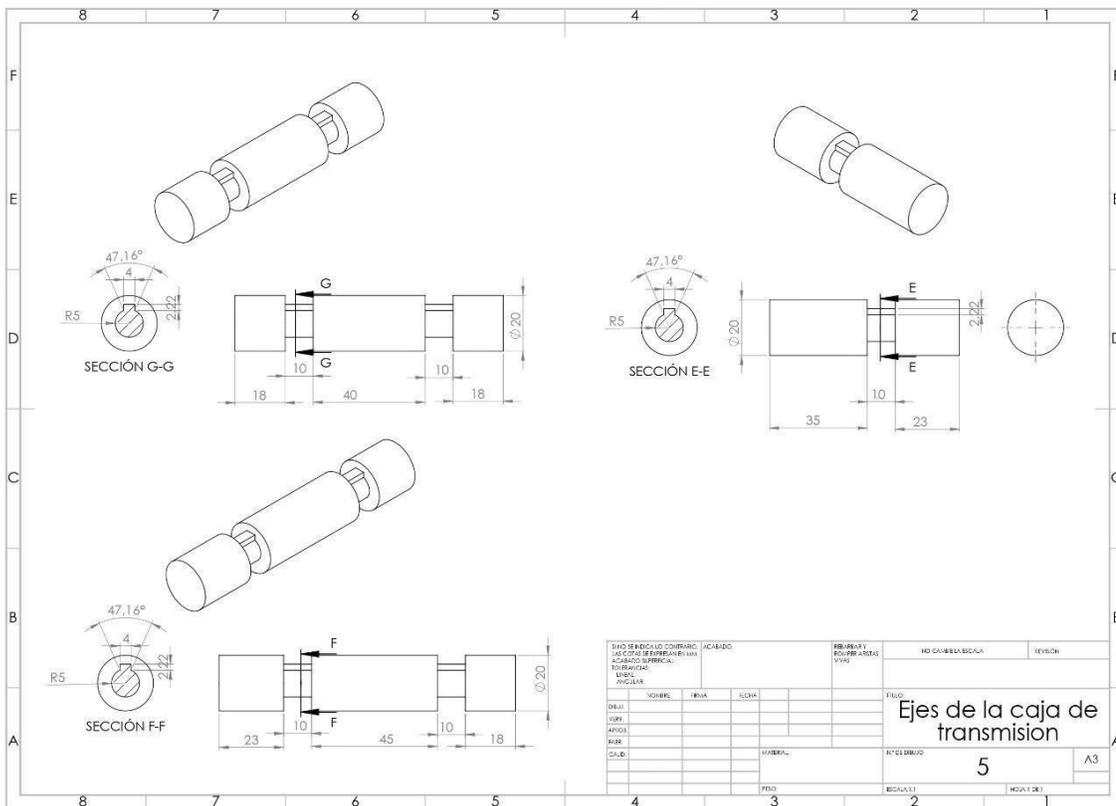
- Rojas Verdezoto, L. A., & Untuña Tandalla, R. C. (2016). Diseño y construcción de un prototipo de plataforma salvaescaleras para personas con capacidades especiales con movilidad reducida. Universidad politécnica salesiana sede Quito.
- Sanango Peña, J. & Sango Narváez, C. (2015). Diseño de un mecanismo de apertura y cierre de una estructura adaptable para la cámara de la pequeña y mediana empresa de pichincha ubicada en el centro de exposiciones de Quito. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela politécnica nacional.
- Stannah. (2019). Salvaescaleras: La Guía completa 2021. <https://www.stannah.es/recursos/salvaescaleras-la-guia-completa/>
- SENA. (1988). Ciencias para la metalmecánica. Cartilla no. 29. Bronces y latones.
- Torres, M. (2014). Mecanismos. Recuperado de <https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/index.html>
- Tural, E., Lu, D. & Cole, D. (2020). Factors predicting older Adults' attitudes toward and intentions to use stair mobility assistive designs at home. Preventive Medicine Reports, Volume 18. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2020.101082>.
- Vásquez, A. (s.f). La discapacidad en América Latina. Pan American Health Organization (PAHO). Recuperado de: <https://www.paho.org/en/search/r?keys=Discapacidad%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina>

Anexos

a. Anexo 1: Planos de diseño del primer prototipo







b. Anexo 2: Planos de diseño del segundo prototipo

