



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA
PLEGABLE IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE CONTROL
AUTOMÁTICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: ANDY DARIO GUTAMA FAREZ
CARLOS ANDRÉS CHANGOLUISA YUNDA
TUTOR: ING. JOHN IGNACIO CALLE SIGUENCIA PhD.
CO-TUTOR: ING. ANA CECILIA VILLA PARRA PhD.

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Andy Dario Gutama Farez con documento de identificación N° 0107291346 y Carlos Andrés Changoluisa Yunda con documento de identificación N° 1727479667; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 1 de agosto del 2024

Atentamente,



Andy Dario Gutama Farez
0107291346



Carlos Andrés Changoluisa Yunda
1727479667

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

Nosotros, Andy Dario Gutama Farez con documento de identificación N° 0107291346 y Carlos Andrés Changoluisa Yunda con documento de identificación N° 1727479667, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo tecnológico: Diseño y construcción de una silla de ruedas eléctrica plegable implementando un sistema de control automático, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 1 de agosto 2024

Atentamente,



Andy Dario Gutama Farez
0107291346



Carlos Andrés Changoluisa Yunda
1727479667

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, John Ignacio Calle Siguencia con documento de identificación N° 0102118213, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS ELECTRICA PLEGABLE IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO, realizado por Andy Dario Gutama Farez con documento de identificación N° 0107291346 y Carlos Andrés Changoluisa Yunda con documento de identificación N° 1727479667, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Dispositivos Tecnológicos que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1 de agosto del 2024

Atentamente,

John Ignacio Calle Siguencia
0102118213

Dedicatoria

Andy Dario Gutama Farez

Pensar que hace un año comenzó esta historia. Un camino agotador, lleno de retos y desafíos, un camino que robó horas de sueño y trajo lágrimas. Pero ahora contemplo el fin y el inicio de una nueva época. Este triunfo está dedicado a mi Papá Dios, quien me sostuvo, me dio aliento, me enseña y me forma cada día, me inspira; su amor es mi mejor sustento.

También dedico este triunfo a las personas más maravillosas de mi vida: a mi papá Néstor por su apoyo y consejo, a mi madre Bertha por su cariño y entrega, a mi hermana Jessi por su cariño y amor, a mi hermana Jenny por ser mi descanso y paz, y a mi hermanita Natasha por ser mi mayor tesoro.

Carlos Andrés Changoluisa Yunda

Feliz y agradecido de finalizar esta etapa de la vida académica, de haber logrado generar un impacto positivo a quien fue enfocado este proyecto. Siempre con la frase de que para lograr grandes cosas, también se requiere de grandes sacrificios. Realmente han valido completamente la pena, y no se puede demostrar de mejor manera que con este trabajo realizado.

Dedico este logro a mi padre y mi madre, Ramiro y Magdalena, quienes realmente me han dado todas las oportunidades para poder seguir la carrera que me ha motivado desde el día uno. Además, me han apoyado en su totalidad para continuarlo en una diferente ciudad, lejos del hogar, siendo mis dos soles en mi vida.

Dedico este logro a mis hermanos, Santiago y Sylvia, quienes son mis infaltables y confidentes, siempre brindándome su apoyo, amor y cariño.

Dedico también este logro a mis mejores amigos, Ariel, Henry, Andy, Elías, Juan José y André, quienes siempre han estado a mi lado, no han permitido que caiga en el camino y los llevo siempre en el corazón por las grandes personas que son.

Y a mi gato, Nilo.

Agradecimientos

Andy Dario Gutama Farez

Mi corazón rebosa de gratitud al recordar a todos aquellos que nos ayudaron a convertir el proyecto en lo que es hoy. Quiero hacer una mención especial a Bryan Méndez, Santiago Urgiles y Maoly Paute, cuya amistad es un bálsamo en mi vida. Agradezco profundamente al Ingeniero John Calle por la confianza, la oportunidad de trabajar en este proyecto y su continuo respaldo. También agradezco a la Ingeniera Ana Cecilia Villa, por su paciencia y apoyo. A Vanesa Rodríguez y Marco Aucapiña, por su apoyo, orientación y guía durante los tiempos de manufactura. A Paula Martínez, por su constante ayuda y respaldo. Y finalmente, pero no menos importante, a Andrés Changoluisa, cuya amistad ha dado un nuevo color a mi vida.

Carlos Andrés Changoluisa Yunda

Este proyecto realmente el decir que solo dos lo hicimos, es mentirse. Gracias a todos, todos los que han estado con su apoyo total, con sus buenas vibras y buenos deseos, me faltaría documento para agradecer a todos aquellos que fueron parte.

Para mis amigos, Ariel Cordovez, Juan Pablo Cruz, Balmore Hernandez, Fernando García. Martin López, Henry Parra, Elias López, Maoly Paute, Majo Ortega, Sofia Mejia, Juan Jose Guevara, Andre Flores, les agradezco un mundo, por ser parte con su amistad, su confianza plena, las risas y buenos momentos, sus palabras y su respaldo constante en vida.

A mi tutor, Ing. John Calle, por su confianza en la realización de este proyecto, las palabras y guía en los momentos adecuados, sobre todo también por su forma de ver a la ingeniería, que es un motor del cual este proyecto y la vida profesional han tomado y tomará su forma.

A mi co-tutora, Dra. Ana Cecilia Villa, por todo su apoyo, su guía, su paciencia, ser una inspiración y mostrarnos el nivel de la Biomecánica en si, puede llegar a impactar.

A Vanesa Rodríguez y Marco Aucapiña, que todo su apoyo en la realización de este proyecto no se hubiera logrado sin su guía.

A Paula Martínez, tu cariño, tu confianza plena y sobre todo tu apoyo y respaldo, este documento no se hubiera logrado.

y a mi compañero de este proyecto y mejor amigo, Andy Gutama, que realmente en todos los momentos, nos hemos apoyado para que todo salga bien, que realmente agradecerte sería insuficiente para todo lo que se ha vivido, simplemente feliz de compartir este proyecto contigo.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIV
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Descripción del problema	1
2.2. Antecedentes	1
2.3. Importancia y alcances	2
2.4. Delimitación	2
2.5. Problemas General	2
2.6. Problemas Específicos	3
3. Objetivos	3
3.1. Objetivo general	3
3.2. Objetivos Específicos	3
4. Marco Teórico	4
4.1. Antropometría	4
4.1.1. Antropometría Estática	5
4.1.2. Antropometría Dinámica	5
4.2. Tipos de Sillas de Ruedas	6
4.2.1. Sillas de ruedas manuales	6
4.2.2. Sillas de Ruedas Eléctricas	7

4.3.	Mecanismos utilizados para Sillas de Ruedas	7
4.3.1.	Silla de Ruedas de Bipedestación Eléctrica	7
4.3.2.	Silla de Ruedas para Cuadripléjicos tipo camilla	8
4.3.3.	Silla de Ruedas Reclinable	9
4.3.4.	Sillas de Ruedas Eléctrica, Reclinable y Basculante	9
4.3.5.	Silla de Ruedas Eléctrica con Tracción Central Reclinable 180°	10
4.3.6.	Silla de ruedas eléctrica plegable modular	10
4.3.7.	Silla de ruedas eléctrica plegable por palanca	11
4.4.	Materiales para sillas de ruedas eléctricas	11
4.5.	Tipos de sistemas de control para sillas de ruedas	12
4.5.1.	Sistema de control de una silla de ruedas eléctrica mediante reconoci- miento de voz	12
4.5.2.	Sistema de control con movimientos de la cabeza	13
5.	Marco metodológico	14
5.1.	Componentes de la silla de ruedas eléctrica	15
5.2.	Determinar variables de diseño	16
5.3.	Diseño de concepto	17
5.3.1.	Análisis de mecanismo	18
5.3.2.	Definición de componentes	20
5.4.	Cálculo y Selección de partes y piezas	20
5.4.1.	Cálculo de fuerzas en cada nodo de la estructura mecánica	22
5.4.2.	Análisis del nodo E	23
5.4.3.	Análisis del nodo D	24
5.4.4.	Análisis del nodo M	26
5.4.5.	Análisis del nodo C	28
5.4.6.	Cálculos de pernos	30
5.4.7.	Cálculo del reposa brazos	32
5.4.8.	Cálculo del perfil diagonal	37
5.4.9.	Simulación general de la estructura mecánica	40
5.5.	Diseño a Detalle	41
5.6.	Proceso de construcción	41
5.7.	Sistema de Control	42
5.7.1.	Sistema de control implementado en el modelo TK1	42
5.7.2.	Sistema de control alternativo opción 1	44

5.7.3. Sistema de control alternativo opción 2	47
5.7.4. Flujograma	50
5.7.5. Esquema Electronico	53
6. Resultados	57
6.1. Resultados de las variables de diseño	57
6.2. Resultados de las simulaciones mediante elementos finitos	59
6.2.1. Resultados del Repoza Brazos	60
6.2.2. Resultados del Perfil Diagonal	61
6.2.3. Resultados de la estructura general	63
6.3. Resultados de Simulación de Sistema de Control Alternativo	65
6.4. Resultados de la construcción de la silla de ruedas eléctrica TK1	67
7. Conclusiones	70
8. Recomendaciones	70
Referencias	74
ANEXOS	75

Lista de Tablas

1.	Componentes implementados en el modelo TK1	43
2.	Componentes Propuestos para la primera alternativa de control	45
3.	Componentes Propuestos para la segunda alternativa de control	48
4.	Medidas Antropométricas y Dimensiones para la Silla de Ruedas	58
5.	Valores Calculados y Comerciales para Tubos y Tuberías	59
6.	Parámetros del Análisis de Mallado Reposo Brazos	61
7.	Parámetros del Análisis de Mallado Perfil Diagonal	63
8.	Parámetros del Análisis de Mallado Estructura General	65
9.	Procesos de Manufactura y Materiales por Subconjunto	68
10.	Componentes de la silla de ruedas eléctrica	76

Lista de Figuras

1.	Medidas antropométricas estáticas	5
2.	Silla de ruedas manual	6
3.	Silla de Ruedas Eléctrica	7
4.	Silla de Ruedas de Bipedestación Eléctrica	8
5.	Silla de Ruedas para Cuadripléjicos	8
6.	Silla de Ruedas Reclinable	9
7.	Sillas de Ruedas Eléctrica Basculante	9
8.	Sillas de Ruedas 180°	10
9.	Silla de ruedas eléctrica City	10
10.	Silla de ruedas eléctrica Traveller	11
11.	Silla de ruedas con sistema de control por voz	13
12.	Sistema de control por movimientos de la cabeza	13
13.	Metodología del Proceso	14
14.	Componentes de la silla de ruedas eléctrica TK1	15
15.	Esquema de las medidas antropométricas del usuario	17
16.	Simulación de la trayectoria del mecanismo en SolidWorks	19
17.	Representación de las partes de la silla de ruedas realizado en SolidWorks	20
18.	Diseño de concepto del subsistema estructura mecánica	21
19.	Diagrama de cuerpo libre de la estructura	22
20.	Diagrama de cuerpo libre del nodo E	23
21.	Diagrama de cuerpo libre del nodo D	25
22.	Diagrama de cuerpo libre del nodo M	26
23.	Diagrama de cuerpo libre del nodo C	28
24.	Representación del cortante en el nodo D	31
25.	Representación y diagrama de cuerpo libre del reposa brazos	32
26.	Representación del aplastante del reposa brazos	35
27.	Simulación del Reposo Brazos	36
28.	Diagrama de cuerpo libre del perfil diagonal	37
29.	Simulación del perfil diagonal	40
30.	Simulación general de la estructura mecánica	41
31.	Diagrama del proceso de construcción de la silla de ruedas	42
32.	Funcionamiento del sistema de control comercial	44
33.	Funcionamiento de la primera propuesta de control	46

34.	Interacción entre el módulo principal y el módulo del IMU9250	47
35.	Funcionamiento de la primera propuesta de control	49
36.	Interacción entre el módulo principal y el módulo del joystick	50
37.	Flujograma del Sistema de Control Alternativo	51
38.	Flujograma del Sistema de Control Alternativo Continuación	52
39.	Esquema Electrónico del Módulo Principal Receptor	54
40.	Esquema Electrónico del Módulo IMU a Distancia	55
41.	Esquema Electrónico del Módulo Joystick a Distancia	56
42.	Resultados de la antropometría del usuario	57
43.	Simulación del Reposo Brazos	60
44.	Simulación del perfil diagonal	62
45.	Simulación general de la estructura mecánica	64
46.	Simulación de Sistema de Control Alternativo	66
47.	Valores de Simulación de Sistema de Control Alternativo	67
48.	Silla de ruedas eléctrica plegable TK1	69
49.	Distribución de la masa del cuerpo	77
50.	Propiedades mecánicas de los materiales	78
51.	Propiedades mecánicas de los pernos	79
52.	Propiedades geométricas	80
53.	Catalogo de tubería estructural redonda	81
54.	Catalogo de tubería estructural rectangular	82

Resumen

El presente proyecto aborda el diseño y construcción de una silla de ruedas eléctrica plegable con un sistema de control adecuado para personas con discapacidad motriz en extremidades superiores e inferiores. Inicialmente, se realizó un estudio del estado del arte de las sillas de ruedas disponibles en el mercado y se consultaron manuales de antropométrica y diseño de sillas. Con base en las dimensiones obtenidas para el usuario, se diseñó un mecanismo de plegado eficiente. Posteriormente, se llevaron a cabo diseño detallados de las piezas y análisis de elementos finitos para asegurar la funcionalidad y resistencia de la silla. La fabricación de la silla se llevó a cabo mediante técnicas de manufactura convencionales. Finalmente, se diseñó un sistema de control intuitivo y accesible para usuarios con limitaciones motrices severas, asegurando que puedan operar el dispositivo de manera autónoma. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y efectividad del diseño propuesto.

Palabras clave: Silla de ruedas eléctrica, Plegable, Sistema de control, Discapacidad motriz, Diseño y construcción.

Abstract

This project addresses the design and construction of a foldable electric wheelchair with a control system suitable for individuals with motor disabilities in upper and lower limbs. Initially, a study of the state of the art of wheelchairs available in the market was conducted, and anthropometry and chair design manuals were consulted. Based on the user's dimensions, an efficient folding mechanism was designed. Subsequently, detailed designs of the parts were made, and finite element analysis was carried out to ensure the wheelchair's functionality and durability. The wheelchair was the manufactured using conventional manufacturing techniques. Finally, an intuitive and accessible control system was designed for users with severe motor limitations, ensuring they can operate the wheelchair autonomously. The results obtained demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed design.

Keywords: Electric wheelchair, Foldable, Control system, Motor disability, Design and construction.

1. Introducción

En el presente trabajo, se abordará un estudio sobre las diversas variables que permitan el desarrollo de una silla de ruedas. Se realizará un estudio de las variables antropométricas de personas con discapacidad motriz, con el fin de obtener información sobre las medidas corporales, características físicas para su dimensionamiento. Se examinará los tipos de sillas existentes en el mercado, para determinar características, ventajas y limitaciones con el objetivo de identificar elementos que pueden incorporarse en el diseño. El estudio de mecanismos utilizados en las sillas de ruedas enfocadas en los que permiten el plegado de la misma. De igual manera se investigará los diferentes materiales aplicados en la fabricación este aspecto es vital para determinar la resistencia, durabilidad entre otras características. Por último, se explorarán los diferentes sistemas de control

2. Problema

2.1. Descripción del problema

El grupo de Investigación Biomédica (GIIB) de la Universidad Politécnica Salesiana ha desarrollado un prototipo de silla de ruedas eléctrico plegable para una persona con problemas de movilidad. Sin embargo, se han identificado diversas fallas en el diseño y el sistema de control de este dispositivo. En cuando el diseño mecánico, se ha observado pandeo en los reposapiés y soportes frontales de las ruedas, lo cual afecta la estabilidad y funcionalidad del dispositivo. Además, se han registrado problemas de soldadura y el sistema de plegado se encuentra inhabilitado, lo que limita su capacidad de almacenado y transporte. Con respecto al sistema de control, actualmente se utiliza un joystick para controlar los movimientos y grados de libertad. Sin embargo, se ha detectado una limitación importante, ya que excluye a personas que no tienen la capacidad motora tanto en las extremidades superiores e inferiores. Esto implica que el dispositivo no es accesible para aquellos individuos que no pueden utilizar el joystick, lo que limita su dependencia y movilidad.

2.2. Antecedentes

En la Universidad Politécnica Salesiana, se llevó a cabo el desarrollo de un prototipo de silla de ruedas eléctrica diseñando para una colaboradora de la universidad que padece de paraplejia, una condición que afecta su capacidad de movimiento en las extremidades

inferiores. El objetivo principal de este proyecto fue diseñar una silla de ruedas eléctrica que proporcionara movilidad y autonomía a la usuaria. Para lograrlo, se utilizó aluminio como material principal en la construcción del dispositivo, dando como resultado un mecanismo ligero y resistente. Esta característica permitió que la usuaria pudiera moverse con mayor facilidad y comodidad. Además, el prototipo cuenta con un sistema de plegado mediante el uso de un mecanismo de deslizamiento. Esta funcionalidad fue diseñada para hacer que el dispositivo fuera transportable y fácil de almacenar en espacios reducidos. Dicho dispositivo ha estado en funcionamiento a inicios del año 2019, la última revisión realizada a mediados del año 2023. De la revisión realizada se detectó que el prototipo presenta fallos mecánicos.

2.3. Importancia y alcances

Según Médica (2023) en Ecuador por medio estudios realizados hasta el 5 de enero del 2023, se registraron que existen 540,650 personas con algún tipo de discapacidad estos representan el 3.01% de la población. En contraste con los estudios realizadas hasta enero del 2022, se ha registrado un incremento de personas con discapacidad, de los diferentes tipos existentes, el tipo de discapacidad más dominante es de tipo físico representa el 48.30%. El presente trabajo de titulación propone el diseño de una silla de ruedas eléctrica con características específicas, como un mecanismo de plegado y un control que sea accesible a personas con problemas de motricidad, ofreciendo un dispositivo con mayor facilidad de transporte, almacenamiento e interacción con el usuario. Dicho prototipo puede llegar a ser una alternativa para fundaciones que trabajen con personas con discapacidad.

2.4. Delimitación

El presente proyecto de titulación se realizará en la Universidad Politécnica Salesiana ubicada en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, durante el periodo académico marzo 2024 – agosto 2024, dentro del Grupo de Investigación de Ingeniería Biomédica GIIB

2.5. Problemas General

- ¿Cuál es la viabilidad técnica y funcional de diseño una silla de ruedas eléctricas plegable con un sistema de control, adaptado a las condiciones antropométricas del paciente y su capacidad de movilidad, para asegurar una movilidad, para asegura una movilidad optima y satisfacer las necesidades de desplazamiento?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las variables de diseño necesario para lograr la integración mecatrónica de los sistemas en una silla de ruedas eléctrica plegable, considere las condiciones antropométricas de los pacientes con discapacidad motriz, así como los tipos de mecanismo y controladores existentes en el estado del arte?.
- ¿Cómo diseñar el sistema de mecánico de una silla de ruedas que permita su plegado para reducir sus dimensiones y facilitar su transporte, garantizando al mismo tiempo la resistencia estructural a través de análisis con software de ingeniería y considerando materiales y procesos de manufactura convencionales?.
- ¿Es factible diseñar una alternativa académica al joystick como sistema de control que permita a los usuarios interactuar y controlar el desplazamiento de la silla de ruedas, verificando la factibilidad de integración del controlador con software de ingeniería?.
- ¿Cómo construir un prototipo de silla de ruedas utilizando técnicas de manufactura convencionales e integrando el sistema de control, con el fin de evaluar tanto el sistema mecánico como el controlador del prototipo?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Diseñar una silla de ruedas eléctrica, plegable, con un sistema de control, partiendo de las condiciones antropométricas del paciente y su capacidad de movilidad, para garantizar la obtención de los desplazamientos deseados.

3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las variables de diseño partiendo de un estudio del estado del arte que identifique condiciones antropométricas de pacientes con discapacidad motriz, tipos de mecanismos y controladores para garantizar la integración mecatrónica de los sistemas.
- Diseñar el sistema mecánico de la silla de ruedas que permita plegado de la misma para reducir sus dimensiones y se puede transportar con facilidad, garantizando la resistencia estructural a través de análisis con software de ingeniería y considerando materiales procesos de manufactura convencionales.

- Diseñar una alternativa académica al joystick como sistema de control, que permitía a los usuarios interactuar y controlar el desplazamiento de la silla de ruedas, verificando la factibilidad de integración del controlador con software de ingeniería.
- Construir un prototipo de la silla de ruedas con técnicos de manufactura convencionales integrando el sistema de control para evaluar el prototipo tanto en el sistema mecánico como el controlador.

4. Marco Teórico

En el presente trabajo, se abordará un estudio sobre las diversas variables que permiten el desarrollo de una silla de ruedas. Se realizará un análisis de las variables antropométricas de personas con discapacidad motriz, con el fin de obtener información sobre las medidas corporales y características físicas necesarias para su dimensionamiento. Se examinarán los tipos de sillas de ruedas existentes en el mercado, con el objetivo de determinar sus características, ventajas y limitaciones, e identificar elementos que puedan incorporarse en el diseño. Además, se estudiarán los mecanismos utilizados en las sillas de ruedas, especialmente aquellos que permiten su plegado y desplegado. Asimismo, se investigarán los diferentes materiales aplicados en la fabricación, aspecto vital para determinar la resistencia, durabilidad y otras características importantes. Por último, se explorarán los diferentes sistemas de control empleados en estas sillas.

4.1. Antropometría

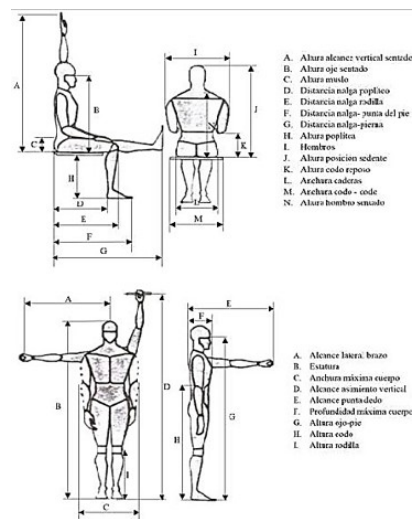
En 1976, durante el Congreso Internacional de las Ciencias de la Actividad Física en Montreal, se presentó la antropometría o cineantropometría como una rama científica. Dos años después, la UNESCO oficialmente la conoció como ciencia en el international Council of Sport and Physical Education. Esta disciplina se enfoca en el análisis del tamaño, proporción, maduración, forma, composición y funciones generales del cuerpo humano. Su objetivo primordial es describir las características físicas en las personas. La antropometría se sustenta en cuatro pilares fundamentales: mediciones corporales, estudio del somatotipo, análisis de la proporcionalidad y exploración de la composición corporal. (Carmenate Milián, Moncada Chávez, y Borjas Leiva, 2014)

4.1.1. Antropometría Estática

También nombrada como antropometría estructural, se encarga de dimensionar el cuerpo cuando este se encuentra en una posición fija y determinada, como se puede observar en la Figura 1. El conocimiento de las dimensiones estáticas es básico para el diseño de los puestos de trabajo y permite establecer las distancias necesarias entre el cuerpo y lo que le rodea, las dimensiones del mobiliario, herramientas, etc. U. Fernando (2016)

Figura 1

Medidas antropométricas estáticas.



Nota: Parámetros de Medidas Antropométricas estáticas en sentado y parado según U. Fernando (2016).

4.1.2. Antropometría Dinámica

La antropometría dinámica es una disciplina compleja que implica tener conocimientos en biomecánica para analizar los movimientos de los trabajos mientras realizan sus tareas. Las dimensiones dinámicas o funcionales se obtienen al observar cómo se mueven las articulaciones durante ciertas actividades. Esto nos permite entender su función y los posibles movimientos, y evaluar la capacidad de movimiento en las articulaciones. (Gama Marquez, 2016)

Además, S. L. Fernando, René, Guillermo, y Beatriz (2011) afirman que en el diseño de una silla de ruedas se debe especificar varios parámetros, entre estos:

1. El Ancho del asiento.
2. La altura del asiento.
3. La profundidad del asiento.
4. La altura del respaldo.
5. La altura del apoyo de Brazos.

4.2. Tipos de Sillas de Ruedas

Cada tipo de silla de ruedas ofrece soluciones específicas para facilitar la movilidad y la independencia de quienes las utilizan. También varían en términos de tamaño, materiales y funciones, por lo cual se clasifican en 2 tipos:

4.2.1. Sillas de ruedas manuales

Como se observa en la Figura 2, el usuario genera el movimiento de la silla de ruedas mediante manipular las ruedas traseras. Se considera de estructura rígida si el chasis permanece constante o de estructura plegable si el chasis es manipulable mediante algún mecanismo con la finalidad de reducir su tamaño.

Figura 2

Silla de ruedas manual.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Manual. (Medical, 2024)

4.2.2. Sillas de Ruedas Eléctricas

Hernández Vilema y Verdugo Ibarra (2016) destaca que las sillas de ruedas eléctricas son impulsadas por moteres que funcionan con baterías recargables. El usuario puede controlar la silla a través de un mando o panel de control, ajustando la velocidad y otras características según sus necesidades. Además, hay controles especiales para personas con discapacidades en los brazos. Estas sillas cuentan con tecnología avanzada, como conexión a la red y navegación satelital, y ofrecen funcionalidades importantes para el bienestar del usuario. También pueden subir pendientes con facilidad sin requerir ayuda externa, lo que brinda mayor independencia y autonomía al usuario como se observa en la Figura 3.

Figura 3

Silla de Ruedas Eléctrica.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3. Mecanismos utilizados para Sillas de Ruedas

Barrientos Martínez, Sánchez Cruz, y Sánchez García (2016) ha catalogado los siguientes modelos, que permiten identificar distintos mecanismos utilizados en brindar una característica en base a las necesidades del usuario:

4.3.1. Silla de Ruedas de Bipedestación Eléctrica

Caracterizada en permitir a los usuarios ponerse de pie de forma segura y cómoda gracias a un mecanismo que ajusta la posición de la silla para lograr la bipedestación, como se indica en la Figura 4.

Figura 4

Silla de Ruedas de Bipedestación Eléctrica.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3.2. Silla de Ruedas para Cuadripléjicos tipo camilla

Están diseñadas con un mecanismo especial que proporciona un mayor soporte y comodidad a personas con limitaciones de movimiento en todas las extremidades, ofreciendo una función de tipo camilla para el usuario, como se indica en la Figura 5.

Figura 5

Silla de Ruedas para Cuadripléjicos.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3.3. Silla de Ruedas Reclinable

Cuentan con un mecanismo de inclinación que permite ajustar el ángulo del asiento para mayor confort y descanso del usuario, como se indica en la Figura 6.

Figura 6

Silla de Ruedas Reclinable.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3.4. Sillas de Ruedas Eléctrica, Reclinable y Basculante

Electrónicamente Incorporan un mecanismo electrónico que permite realizar ajustes avanzados de inclinación y basculación, evitando úlceras por presión y proporcionando alivio de la presión, como se indica en la Figura 7.

Figura 7

Sillas de Ruedas Eléctrica Basculante.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3.5. Silla de Ruedas Eléctrica con Tracción Central Reclinable 180°

Ofrecen una función mecánica de tracción central que brinda gran maniobrabilidad, además de poder reclinarse hasta 180° para mayor comodidad y facilidad de transporte, como se indica en la Figura 8.

Figura 8

Sillas de Ruedas 180°.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (Medical, 2024)

4.3.6. Silla de ruedas eléctrica plegable modular

Su diseño modular le garantiza la capacidad de desmontar piezas y mediante su mecanismo, permite plegarse de manera lateral, como se indica en la Figura 9

Figura 9

Silla de ruedas eléctrica City.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (EMED, 2023)

4.3.7. Silla de ruedas eléctrica plegable por palanca

Mediante un mecanismo tipo palanca permite que la silla se pliegue de forma eficiente y rápida facilitando su uso diario y mejorando su portabilidad, como se observa en la Figura 10

Figura 10

Silla de ruedas eléctrica Traveller.



Nota: Modelo de Catálogo de Silla de Ruedas Eléctrica. (EMED, 2023)

4.4. Materiales para sillas de ruedas eléctricas

Independientemente del tipo de mecanismo o estructura de la silla de ruedas, la selección del material es un punto crucial, por motivo de que estará sometido a diferentes cargas y expuesto a elementos corrosivos que deterioren la calidad y afecte la consistencia del prototipo. De igual manera la adquisición del cualquier tipo de material está ligado al costo, por este motivo, materiales como el titanio, aunque posea varias propiedades mecánicas convenientes para la silla de ruedas, es de elevado costo. Sin embargo, existen aceros que son una alternativa para la silla de ruedas, de los cuales se trataran en este apartado. (Ideas, 2023)

Según Barragán Téllez y cols. (2017) se denomina hierro de fundición a las aleaciones de hierro-carbono que contienen más de un 2.1 por ciento de carbono fundido. El exceso de carbono en la estructura molecular del hierro fundido forma carburo de hierro, componente principal de la perlita, que le otorga alta resistencia y ductilidad. Poseen varias aplicaciones, son de costos bajos y accesibles, sin embargo, por la gran concentración de carburo de hierro provoca que el material sea frágil y de mayor peso, lo cual para la nuestra aplicación lo convierte en un material incompatible.

Fuentes Tapia y cols. (2022) afirma que el aluminio es uno de los elementos más abundantes

y posee varias propiedades mecánicas entre estas una gran resistencia a la corrosión y oxidación, aproximadamente tiene una densidad de 2.7 (gramos por centímetro cúbico) lo cual lo convierte en un material altamente ligero, dúctil, maleable y de fácil mecanizado. Convirtiéndose en uno de los metales más versátiles industriales utilizado por la humanidad dada a sus propiedades. Se emplea en una enorme variedad de aleaciones para fabricar numerosos utensilios y envases, así como partes de diversas maquinarias.

Barragán Téllez y cols. (2017) menciona sobre las aleaciones de hierro-carbono con pequeñas concentraciones de carbono, desde 0.5% a 2%. La reducción de carbono es paralela al desarrollo de hornos más avanzados de mayor temperatura y capaces de introducir sustancias que faciliten el retiro de escoria y otras impurezas. La menor concentración de carbono es el acero le proporciona características semejantes a las del hierro puro con un alto grado de ductilidad. Comercialmente están en forma de perfiles y por sus propiedades mecánicas como resistencia, utilidad, fácil soldadura, resistencia a la corrosión lo convierte en un material compatible para el prototipo.

4.5. Tipos de sistemas de control para sillas de ruedas

Comercialmente existen diversos modelos de sillas de ruedas eléctricas, donde comúnmente estas se encuentran controladas por joystick, al cual por accionamiento mecánico se determina una dirección generada por una señal eléctrica la cual controla la dirección y accionamiento de las ruedas motorizadas provocando el movimiento en la silla. Este tipo de control es apropiado para personas que tengan motricidad en sus extremidades superiores, sin embargo, para personas que posean cuadriplejía se convierte en una tarea compleja el encontrar un dispositivo que dé respuesta. En este apartado se hablará de algunos tipos de controles que se han desarrollado.

4.5.1. Sistema de control de una silla de ruedas eléctrica mediante reconocimiento de voz

El siguiente sistema de control es realizado mediante el módulo Vrbot, que se encarga del reconocimiento de voz, el cual la información llega a un PIC 18F4550 que está programado por diversos comandos de voz “adelante, atrás, izquierda y derecha” que dan el accionamiento a las ruedas motorizadas. (Cujano Ayala, 2013)

Según Evelyn (2019) mediante el software Dragon Naturally Speaking, sensores ultrasónicos, giroscopios y por medio de los siguientes comandos “Adelante, Atrás, Izquierda, Derecha, Dormir y Alto” se controla el accionamiento de las ruedas motorizadas, el uso de sensores ultrasónicos como medida de seguridad si el dispositivo se encontrara por colisionar y unos

giroscopios que se encargan de linealizar el movimiento de la silla de ruedas como se observa en la Figura 11

Figura 11

Silla de ruedas con sistema de control por voz.



Nota: Pruebas de giros de la silla de ruedas.(Evelyn, 2019)

4.5.2. Sistema de control con movimientos de la cabeza

El siguiente sistema de control comanda los movimientos de la silla mediante movimientos de la cabeza, por medio de sensores inerciales según, Daniel (2019). Dicho control se caracteriza por comandar la silla mediante las inclinaciones de la cabeza, como se observa en la Figura 12

Figura 12

Sistema de control por movimientos de la cabeza.



Nota: Control de la silla de ruedas mediante sensores inerciales. (Daniel, 2019).

5. Marco metodológico

En el siguiente apartado se describirá mediante fases cada proceso que interviene en el diseño y construcción del prototipo de silla de ruedas denominado TK1 como se observa en la Figura 13. Primero, se determinan las variables que influyen en el diseño. Después, se procede a realizar el diseño de concepto, donde se busca un mecanismo óptimo y se procede a identificar los componentes que forman parte de dicho mecanismo. Finalmente, se realizan los cálculos, simulaciones y selección de elementos para prototipar.

Figura 13

Metodología del Proceso.



Nota: Descripción de las fases de la Metodología del Proceso

5.1. Componentes de la silla de ruedas eléctrica

Por medio del diagrama de bloques se observa de manera general la integración que existe entre los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos del sistema de control de la silla de ruedas eléctrica plegable. El componente mecánico involucra estructura y mecanismo, el componente eléctrico conforma fuente de alimentación y por las ruedas motorizadas para generar el movimiento de la silla y por último el componente de control en donde interviene la unidad de control que se encarga de regular potencia, y el joystick que se encarga de recibir la intención de control del usuario. Dichos componentes se observan en la Figura 14

Figura 14

Componentes de la silla de ruedas eléctrica TK1 .



Nota: Se observa el subsistema electrónico y mecánico que conforma la silla de ruedas.

5.2. Determinar variables de diseño

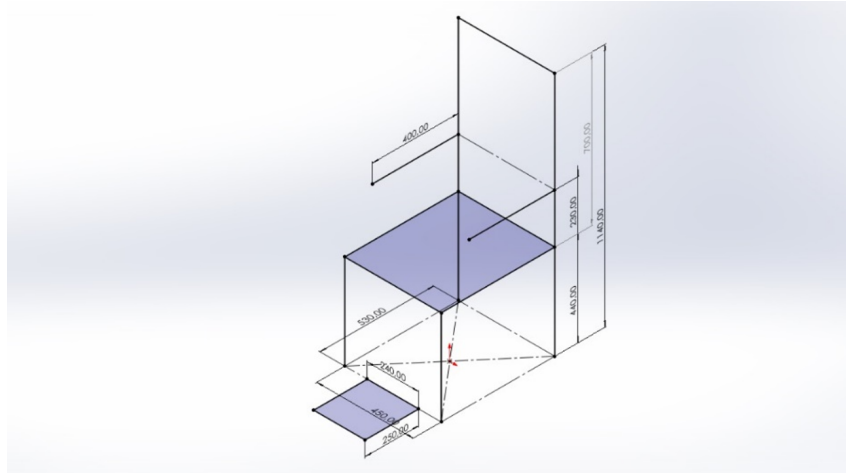
Para iniciar el diseño de la silla de ruedas eléctrica, se procedió a consultar diversos manuales técnicos, con el afán de caracterizar de manera adecuada al usuario. En consecuencia, se procedió a tomar las medidas antropométricas del usuario en posición de reposo según I Permobil (2020). De los cuales las medidas más relevantes como se indica en los manuales son:

- **Altura poplítea:** Es la distancia conformada de la planta de los pies hasta la parte anterior de la rodilla y los muslos se encuentran formando un ángulo de 90° con respecto a las rodillas.
- **La distancia Sacro-Poplítea:** Es la distancia conformada por la parte posterior de los glúteos por todo el fémur terminando en la fosa poplítea.
- **Altura del codo con respecto al asiento:** Es la distancia tomada del plano del asiento hasta la parte inferior del codo, tomando en cuenta que el antebrazo y el brazo deben formar un ángulo de 90° .
- **Altura del hombro con respecto al asiento:** Es la distancia medida desde la superficie del asiento hasta la parte superior del hombro.
- **Ancho de caderas:** La distancia medida desde los extremos de los muslos que va de manera transversal por la cadera.
- **Ancho de hombros:** La distancia medida desde los extremos de los músculos deltoides.
- **Largo del pie:** Para esta distancia los pies del usuario deben formar un ángulo de 90° con respecto a las piernas, la medición es tomada del extremo del pie (talón) hasta la punta de los dedos.
- **Ancho de brazos:** La distancia medida desde el extremo del codo hasta la punta de los dedos.

Por medio de las mediciones sugeridas en los manuales, se procedió a realizar un bosquejo de silla que conforme con la antropometría del usuario observado en la Figura 15.

Figura 15

Esquema de las medidas antropométricas del usuario.



Nota: Boceto con las medidas antropométricas del usuario.

Mediante las mediciones se conoció las dimensiones aproximadas del diseño:

- Altura poplítea: 44cm
- Altura sacro poplítea: 46 cm
- Altura del codo con respecto al asiento: 23cm
- Altura del hombro con respecto al asiento: 47cm
- Ancho de los hombros: 45cm
- Largo del pie: 25cm
- Ancho de los brazos: 40cm

5.3. Diseño de concepto

Para el diseño conceptual de la silla de ruedas, se busca que las dimensiones estén basadas en la antropometría del usuario mostrado en la Figura 15, con la finalidad de garantizar comodidad y ergonomía. Además, se requiere que la silla cumpla con la característica de ser plegable, lo cual permite que sea transportable y ocupe menos espacio en su almacenamiento.

5.3.1. Análisis de mecanismo

Para el diseño del mecanismo, la silla de ruedas debe cumplir ciertos parámetros. Considerando la silla en su posición abierta:

- El respaldo y el asiento deben formar un ángulo que se encuentre entre 90° y 100° .
- La longitud del respaldo debe llegar a nivel de los omoplatos.
- La longitud del asiento debe ser de 50.8 a 76.2 mm menor que la distancia sacro-poplítea.
- La longitud de los reposabrazos debe cubrir la distancia del codo hasta las muñecas.
- La altura del reposabrazos debe estar a la altura de los codos, de manera que el brazo y el antebrazo formen un ángulo de 90° .
- La altura del reposapiés con respecto al suelo debe estar entre 50 a 100 mm para evitar rozamientos con el suelo.

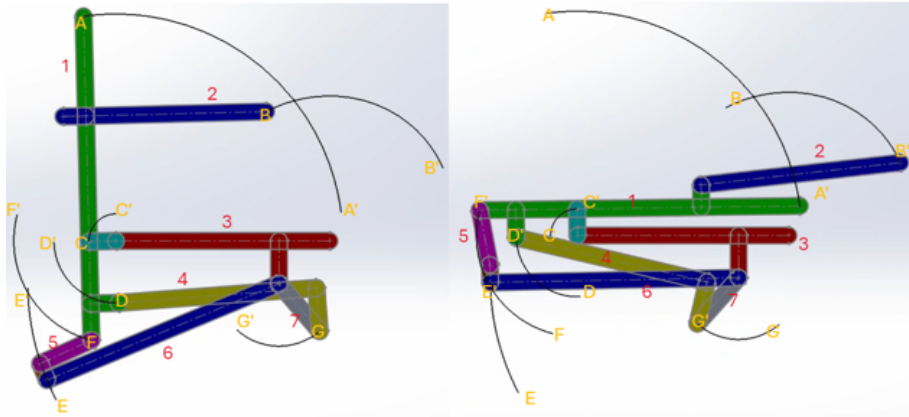
Considerando la silla en su posición cerrada:

- Se debe considerar que el respaldo y asiento formen un ángulo entre 0° y 10° para considerarse plegado, y debe existir una cierta distancia entre estos debido a las dimensiones de la tapicería.
- Se debe considerar que los reposabrazos y el respaldo formen un ángulo entre 0° a 10° .
- Se debe considerar que el mecanismo de plegado genere un movimiento en arco que permita el plegado.
- Se debe asegurar que el mecanismo genere una distancia que garantice espacio suficiente para el control y la batería.

Tomando en cuenta estos parámetros, se procede a realizar la simulación del mecanismo para observar las trayectorias que permiten el plegado de la silla, como se observa en la Figura 16. La simulación tiene la finalidad de determinar las dimensiones óptimas de los eslabones que conforman la silla.

Figura 16

Simulación de la trayectoria del mecanismo en SolidWorks.



Nota: Las letras marcan la trayectoria y los números el eslabón

De las trayectorias observadas mediante las simulaciones, se determinaron las longitudes de los eslabones que cumplen con los parámetros previamente establecidos:

- El reposabrazos (Eslabón 2) tiene una longitud de 440 mm, diseñada para cubrir la longitud de los antebrazos.
- El espaldar (Eslabón 1) tiene una longitud total de 586 mm, extendiéndose desde el extremo hasta los puntos D y C, siendo 65 y 175 mm respectivamente. El punto C facilita la trayectoria en G y coincide con la altura del asiento, permitiendo que el espaldar cubra hasta la altura de los omoplatos.
- El asiento (Eslabón 3) tiene una longitud de 420 mm, diseñado para cubrir la longitud de los muslos sin llegar a la distancia sacro-poplítea, con un punto específico a 300 mm desde el extremo.
- La estructura del soporte medio (Eslabón 4) tiene una longitud de 388 mm, permitiendo el plegado de toda la parte delantera de la silla.
- La estructura de diagonales (Eslabón 6) tiene una longitud de 400 mm, determinando la altura de la silla con respecto al suelo.

- La palanca de plegado (Eslabón 5) tiene una longitud de 100 mm, diseñada para definir el ángulo entre el espaldar y el asiento, así como para generar un movimiento en arco durante el proceso de plegado de la silla.

Las longitudes de los eslabones determinados mediante la simulación nos permiten obtener las trayectorias necesarias para cumplir con el plegado tipo palanca de la silla de ruedas comercial observado en la Figura 10.

5.3.2. Definición de componentes

Mediante las longitudes que conforman la estructura de la silla, se procede a realizar un diseño conceptual de los diferentes elementos que la conforman, como se observa en la Figura 17. De manera general, la silla de ruedas está compuesta por varios elementos que, a su vez, conforman tres subsistemas, los cuales se describen en el Anexo 1 en Tabla 10.

Figura 17

Representación de las partes de la silla de ruedas realizado en SolidWorks.



Nota: Diseño de concepto de todos los elementos que conforman la silla de ruedas

5.4. Cálculo y Selección de partes y piezas

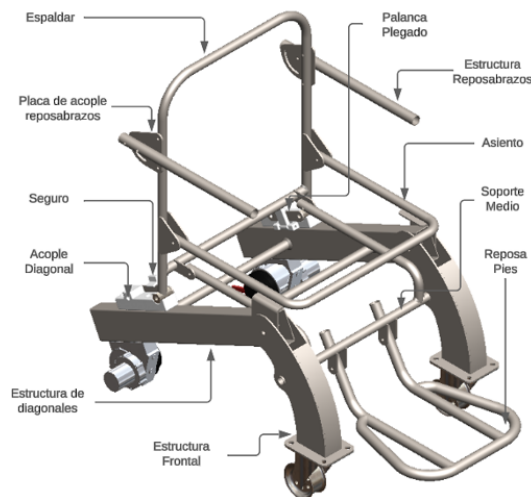
Mediante la Tabla 10, se identifican los diferentes subsistemas del dispositivo, cada uno compuesto por varios elementos. Para los cálculos se consideran algunas condiciones:

- Para iniciar con los análisis estáticos, primero se consideró que se utilizara perfiles circulares y rectangulares con un espesor de 2mm, debido a que algunos elementos serán soldados.
- Con la finalidad de obtener una estructura robusta, se seleccionó un factor de seguridad de 2.5.
- Se utilizará el ASTM A500 como material para la estructura, dado que la norma INEN (2016) especifica que este material tiene su límite elástico a 290 MPa y límite de tracción es de 400Mpa. Además, para los acoples o placas se empleará ASTM A36 el cual su límite elástico es de 250 MPa como se puede observar en la Figura 50 del Anexo 3.
- Se utilizará filamento PLA como material para elementos de formas complejas, donde el límite de tracción es de 45 MPa según Control 3D (2021).
- Se realizarán los cálculos de las vigas y placas sometidos a las condiciones más críticas.

Para los cálculos del subsistema mecánico, se observa la Figura 18, donde se representa cada elemento de la estructura:

Figura 18

Diseño de concepto del subsistema estructura mecánica.



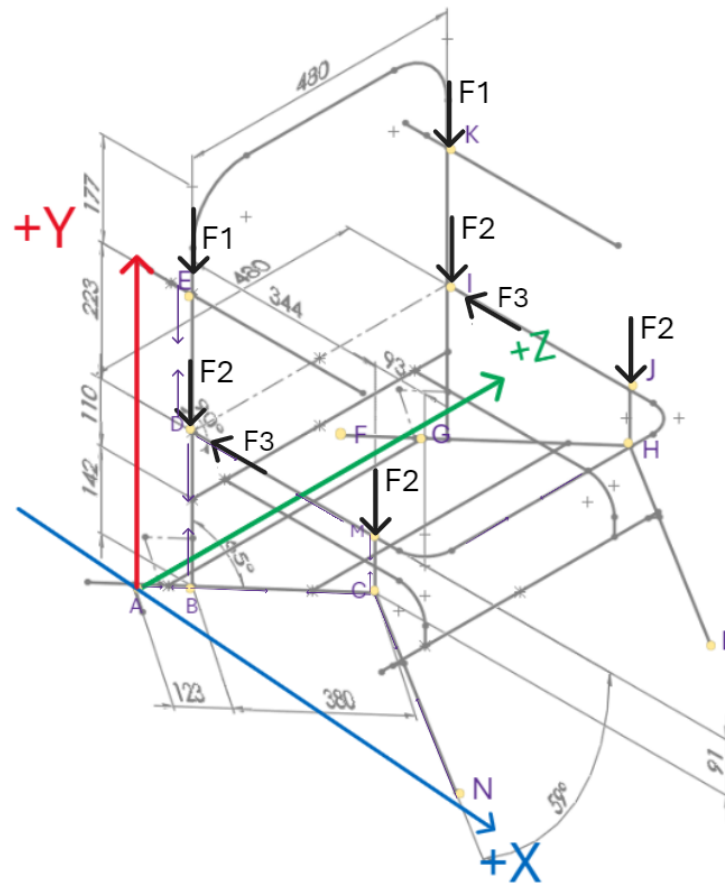
Nota: Se representa cada elemento que conforma la estructura mecánica

5.4.1. Cálculo de fuerzas en cada nodo de la estructura mecánica

Con la finalidad de determinar el esfuerzo de corte y aplastamiento máximo que se pueda generar en las uniones de la estructura, se consideró analizar todo el sistema como una armadura espacial. Para su resolución según Hibbeler (2016) recomienda usar el método de nodos si se busca conocer las diferentes fuerzas que intervienen en cada nodo. Primero se procedió a realizar el diagrama de cuerpo libre de la armadura como se observa en la Figura 19

Figura 19

Diagrama de cuerpo libre de la estructura.



Nota: Se observa el DCL los diferentes nodos, fuerzas y también las flechas moradas son una suposición si el elemento se encuentra en tensión o compresión. El nodo A se considera el origen.

La fuerza F_1 , representa la condición más crítica cuando el usuario eleva todo su peso apoyado de los dos reposabrazos. La fuerza F_2 , representa el peso tal del usuario distribuido para los cuatro apoyos del asiento y la fuerza F_3 , representa el peso del tórax y abdomen del usuario, como se observa en la Figura 49 del Anexo 2. La masa total del cuerpo se distribuye en porcentajes, donde el tórax representa un 21.6% de la masa total y el abdomen representa un 13.9%. Estas fuerzas se representan como:

$$\mathbf{F}_1 = [0\mathbf{i} - 319\mathbf{j} + 0\mathbf{k}] \text{ N}$$

$$\mathbf{F}_2 = [0\mathbf{i} - 160\mathbf{j} + 0\mathbf{k}] \text{ N}$$

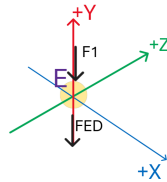
$$\mathbf{F}_3 = [-115\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k}] \text{ N}$$

5.4.2. Análisis del nodo E

Se observa en la Figura 20 el diagrama de cuerpo libre del nodo E, donde esta sometido a dos fuerzas entre estas la F_1 y la fuerza que se origina del nodo E hasta el D

Figura 20

Diagrama de cuerpo libre del nodo E.



Nota: La dirección de la fuerza ED es una suposición, si el resultado es de signo negativo significa que el vector es en sentido opuesto

Según Hibbeler (2016) una fuerza expresada en vector se representa:

$$\vec{F}_{AB} = F_{AB} \cdot \vec{u}_{AB} \quad (1)$$

Donde el vector F , representan la fuerza en forma vectorial y el vector u representa el vector unitario de un punto A a un punto B.

Las coordenadas del nodo E y nodo D son con respecto al origen que es el nodo A son:

$$D(111.7\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$E(111.7\mathbf{i} + 527\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FED:

$$\vec{F}_{ED} = F_{ED} \cdot \vec{u}_{ED}$$

$$\vec{F}_{ED} = F_{ED} \cdot \frac{\vec{r}_{ED}}{\|\vec{r}_{ED}\|}$$

$$\vec{F}_{ED} = F_{ED} \cdot \frac{\vec{r}_D - \vec{r}_E}{\|\vec{r}_{ED}\|}$$

$$\vec{F}_{DE} = F_{DE} \cdot (0\mathbf{i} - 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en j:

$$\sum F_j = 0$$

$$-F_{DE} - 319 = 0$$

$$F_{DE} = -319$$

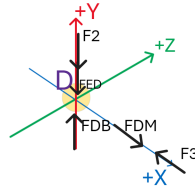
Como el resultado del fuerza FDE es negativo significa que la dirección de la fuerza es en el otro sentido del diagrama de cuerpo libre de la Figura 20

5.4.3. Análisis del nodo D

Se observa en la Figura 21 el diagrama de cuerpo libre del nodo D, donde esta sometido a dos fuerzas entre estas la F1, F2, la fuerza que se origina del nodo E hasta el D, la fuerza que se origina del nodo B hasta el D y la fuerza que tiene origen del nodo D hasta el M.

Figura 21

Diagrama de cuerpo libre del nodo D.



Nota: La dirección de la fuerza es una suposición, si el resultado es de signo negativo significa que el vector es en sentido opuesto

Las coordenadas del nodo E, nodo D, nodo B y nodo M son con respecto al origen que es el nodo A son:

$$D(111.7\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$E(111.7\mathbf{i} + 527\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$B(111.7\mathbf{i} + 52.1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$M(455.8\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FED:

$$\vec{F}_{ED} = F_{ED} \cdot \frac{\vec{r}_D - \vec{r}_E}{\|\vec{r}_{ED}\|}$$

$$\vec{F}_{DE} = F_{DE} \cdot (0\mathbf{i} - 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FDB:

$$\vec{F}_{DB} = F_{DB} \cdot \frac{\vec{r}_D - \vec{r}_B}{\|\vec{r}_{DB}\|}$$

$$\vec{F}_{BD} = F_{DB} \cdot (0\mathbf{i} + 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FDM:

$$\vec{F}_{DM} = F_{DM} \cdot \frac{\vec{r}_M - \vec{r}_D}{\|\vec{r}_{DM}\|}$$

$$\vec{F}_{DM} = F_{DM} \cdot (\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en i:

$$\sum F_i = 0$$

$$F_{DM} - 115\text{N} = 0$$

$$F_{DM} = 115\text{N}$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en j:

$$\sum F_j = 0$$

$$-F_{DE} + F_{DB} - 160\text{N} = 0$$

$$-319 + F_{DB} - 160\text{N} = 0$$

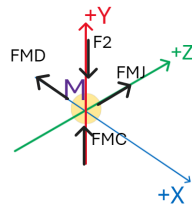
$$F_{DB} = 479\text{N}$$

5.4.4. Análisis del nodo M

Se observa en la Figura 22 el diagrama de cuerpo libre del nodo M, donde esta sometido a dos fuerzas entre estas la F2, la fuerza que se origina del nodo D hasta el M, la fuerza que se origina del nodo C hasta el M y la fuerza que tiene origen del nodo M hasta el J.

Figura 22

Diagrama de cuerpo libre del nodo M.



Nota: La dirección de la fuerza es una suposición, si el resultado es de signo negativo significa que el vector es en sentido opuesto

Las coordenadas del nodo D, nodo J, nodo M y nodo C son con respecto al origen que es el nodo A son:

$$D(111.7\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$C(455.8\mathbf{i} + 213.5\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$J(455.8\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 480\mathbf{k})$$

$$M(455.8\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FMD:

$$\vec{F}_{MD} = F_{MD} \cdot \frac{\vec{r}_D - \vec{r}_M}{\|\vec{r}_{MD}\|}$$

$$\vec{F}_{MD} = F_{MD} \cdot (-\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FMC:

$$\vec{F}_{MC} = F_{MC} \cdot \frac{\vec{r}_M - \vec{r}_C}{\|\vec{r}_{MC}\|}$$

$$\vec{F}_{MC} = F_{MC} \cdot (+0\mathbf{i} + \mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FMJ:

$$\vec{F}_{MJ} = F_{MJ} \cdot \frac{\vec{r}_J - \vec{r}_M}{\|\vec{r}_{MJ}\|}$$

$$\vec{F}_{MJ} = F_{MJ} \cdot (+0\mathbf{i} + \mathbf{j} + 1\mathbf{k})$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en j:

$$\sum F_j = 0$$

$$F_{MC} - 160\text{N} = 0$$

$$F_{MC} = 160\text{N}$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en K:

$$\sum F_K = 0$$

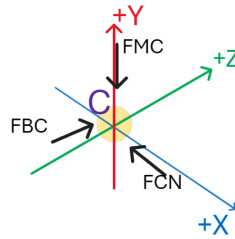
$$F_{MJ} = 0$$

5.4.5. Análisis del nodo C

Se observa en la Figura 23 el diagrama de cuerpo libre del nodo C, donde esta sometido a la fuerza que se origina del nodo N hasta C, la fuerza que se origina del nodo M hasta la C y la fuerza que tiene origen del nodo B hasta el C.

Figura 23

Diagrama de cuerpo libre del nodo C.



Nota: La dirección de la fuerza es una suposición, si el resultado es de signo negativo significa que el vector es en sentido opuesto

Las coordenadas del nodo B, nodo C, nodo N y nodo M son con respecto al origen que es el nodo A son:

$$B(111.7\mathbf{i} + 52.1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$C(455.8\mathbf{i} + 213.5\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

$$N(607.8\mathbf{i} - 35.5\mathbf{j} + 480\mathbf{k})$$

$$M(455.8\mathbf{i} + 304.6\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FBC:

$$\vec{F}_{BC} = F_{BC} \cdot \frac{\vec{r}_C - \vec{r}_B}{\|\vec{r}_{BC}\|}$$

$$\vec{F}_{BC} = F_{BC} \cdot (0.905\mathbf{i} + 0.425\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FCN:

$$\vec{F}_{CN} = F_{CN} \cdot \frac{\vec{r}_C - \vec{r}_N}{\|\vec{r}_{CN}\|}$$

$$\vec{F}_{CN} = F_{CN} \cdot (-0.521\mathbf{i} + 0.854\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a expresar el vector FMC:

$$\vec{F}_{MC} = F_{MC} \cdot \frac{\vec{r}_C - \vec{r}_M}{\|\vec{r}_{MC}\|}$$

$$\vec{F}_{MC} = F_{MC} \cdot (0\mathbf{i} + 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en j:

$$\sum F_j = 0$$

$$0.854 * F_{CN} + 0.425 * F_{BC} - 160 \text{ N} = 0$$

Se procede a relizar la sumatoria de fuerzas en i:

$$\sum F_i = 0$$

$$-0.521 * F_{CN} + 0.905 * F_{BC} = 0$$

Resultado de FBC y FCN:

$$F_{BC} = 83.83 \text{ N}$$

$$F_{CN} = 145.63 \text{ N}$$

Se determinaron las fuerzas ejercidas en ciertos nodos de la estructura. Este análisis inicial permitió identificar las cargas específicas en puntos críticos de la estructura. Sin embargo, es fundamental considerar que la estructura presenta simetría. Debido a esta simetría, las fuerzas generadas en un lado de la estructura serán equivalentes a las fuerzas en el lado opuesto. Esta equivalencia simplifica el análisis y diseño, ya que permite suponer que el comportamiento estructural es uniforme en ambos lados, garantizando una distribución de cargas más equilibrada y predecible a lo largo de la estructura.

$$F_{ED} = F_{KI} \quad (2)$$

$$F_{MD} = F_{IJ} \quad (3)$$

$$F_{DB} = F_{IG} \quad (4)$$

$$F_{MC} = F_{JH} \quad (5)$$

$$F_{BC} = F_{GH} \quad (6)$$

$$F_{NC} = F_{LH} \quad (7)$$

Una vez determinadas las fuerzas que influyen en cada nodo, se selecciona la mayor fuerza con el propósito de dimensionar un perno que será utilizado de forma general en toda la estructura. Posteriormente, se procede a dimensionar la sección transversal de la estructura considerando las diferentes fuerzas que influyen en cada nodo. Para los análisis, se seleccionan dos elementos cuyas formas y geometrías se utilizarán de manera general en toda la estructura: el reposabrazos y el perfil diagonal.

5.4.6. Cálculos de pernos

Según Beer y Johnston (2014), el factor de seguridad es el cociente entre la carga ultima y la carga permisible la ecuación se expresa:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\sigma_{\text{último}}}{\sigma_{\text{per}}} \quad (8)$$

Hibbeler (2016) define el esfuerzo cortante promedio como la razón de la fuerza cortante representada con v y el área representada con A , donde la ecuación se expresa:

$$\tau = \frac{v}{A} \quad (9)$$

De igual manera también define el esfuerzo normal promedio en cualquier punto del área de la sección normal como el cociente entre la fuerza normal N y el área A :

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (10)$$

Según Budynas y Nisbett (2021) el límite del cortante se puede aproximar mediante la teoría de energía de distorsión donde la ecuación se expresa:

$$\tau_{\max} = 0.577 \cdot \sigma_{\text{último}} \quad (11)$$

De todos los nodos analizados, se observó que la mayor concentración de fuerzas se encuentra en el nodo D, el cual está sometido a la fuerza DB, que equivale a 479 N. Para dimensionar el diámetro, se sugirió utilizar pernos de grado 8, según se indica en la Figura 51 del Anexo 4. Estos pernos poseen una resistencia a la tracción de 896 MPa. Primero, se determina el límite de cortante del perno de grado 8 utilizando la ecuación 11.

$$\tau_{\max} = 0.557 \times (896 \text{ N/mm}^2) = 517 \text{ N/mm}^2$$

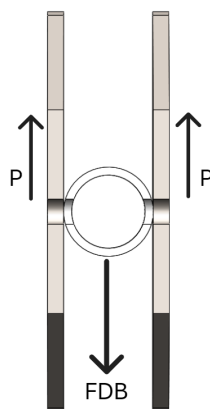
Se procede a calcular el cortante admisible mediante la ecuación 8.

$$\tau_{\text{per}} = \frac{517 \text{ N/mm}^2}{2.5} = 206 \text{ N/mm}^2$$

Una vez determinado el cortante permisible, se procede a analizar la disposición del perno y su efecto sobre el cortante, como se observa en la Figura 24.

Figura 24

Representación del cortante en el nodo D.



Nota: Las fuerzas P son reacciones generadas por la fuerza DB

Se procede a determinar el valor de P.

$$P = \frac{F_{DB}}{2} = \frac{479\text{ N}}{2} = 239.5\text{ N}$$

Mediante la ecuación 9, se procede a calcular el área de la sección efectiva.

$$A = \frac{239.5\text{ N}}{206\text{ N/mm}^2} = 1.16\text{ mm}^2$$

Considerando que el área efectiva del perno es circular, se procede a determinar el diámetro correspondiente.

$$d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{1.16\text{ mm}^2}{\pi}} = 1.21\text{ mm}$$

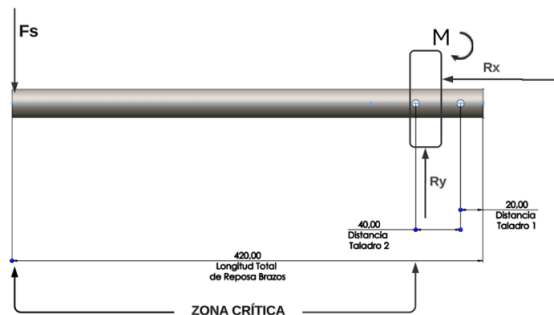
Mediante los cálculos, se estimó un perno de 1.2 mm. Sin embargo, como se observa en la Figura 51 del Anexo 4, el diámetro más cercano disponible es de 6.35 mm. Este valor se utilizará de manera general para todos los pernos del dispositivo.

5.4.7. Cálculo del reposa brazos

Para el cálculo del reposabrazos observado en la Figura 25, se considera dos condiciones críticas. En el primer caso el elemento está sometido flexión cuando el usuario ejerce fuerza al extremo y el segundo caso al momento de ejercer fuerza en la junta sometiendo a aplastamiento.

Figura 25

Representación y diagrama de cuerpo libre del reposa brazos.



Nota: Para el análisis el reposa brazos se considera como una viga empotrada.

Para dimensionar la sección del tubo, se realiza sumatoria de fuerzas y momentos. La fuerza F_s es igual a la fuerza F_1 , sin embargo, hay que considerar que el análisis se realiza en dos dimensiones, por esta razón la fuerza F_1 se encuentra en paralelo al eje Y .

Se procede a realizar la sumatoria de momentos y fuerzas, para determinar el momento máximo.

$$\sum F_Y = 0$$

$$-F_s + R_y = 0$$

$$R_y = 319\text{N}$$

$$\sum M = 0$$

$$M_{max} - F_s * 360\text{mm} = 0$$

$$M_{max} = 114840\text{N}\cdot\text{mm}$$

Según Hibbeler (2016), para el diseño de una viga por flexión se requiere determinar el módulo de sección representado por una S , el cual es una propiedad geométrica definida como la razón de la inercia representado por una I , y la distancia máxima desde el eje neutro representado por una c . Las ecuaciones se expresan:

$$S = I/c \tag{12}$$

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{per}} \tag{13}$$

En la ecuación 13 el módulo de sección también se puede expresar como el cociente entre el momento máximo y esfuerzo permisible. Para calcular el módulo de sección, primero se requiere determinar el esfuerzo permisible del acero A500 mediante la ecuación 8:

$$\sigma_{PerA500} = \frac{290\text{N}/\text{mm}^2}{2.5} = 116\text{N}/\text{mm}^2$$

Mediante la ecuación 13, el momento máximo que se genera en el reposa brazos y el esfuerzo permisible del acero A500 se determinó el módulo de sección:

$$S_1 = \frac{114775.2\text{N}\cdot\text{mm}}{116\text{N}/\text{mm}^2} = 990\text{mm}^3$$

Para determinar la sección modular, se puede observar en la Figura 52 del Anexo 5, las

diferentes propiedades de las figuras geométricas, se procede a seleccionar la ecuación de la sección modular del círculo hueco y se expresa:

$$S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \quad (14)$$

En la ecuación el diámetro exterior se representa con D, y el diámetro interior se representa con d. Para determinar el diámetro exterior se considera un espesor de 2mm, por esta el diámetro interior se expresa en función del diámetro exterior, al remplazar en la ecuación 11 se expresa:

$$d = D - 4mm \quad (15)$$

$$S = \frac{\pi(D^4 - (D - 4)^4)}{32D} \quad (16)$$

Mediante la ecuación 16, se determina el diámetro exterior del tubo:

$$990\text{mm}^3 = \frac{\pi(D_1^4 - (D_1 - 4)^4)}{32D_1}$$

$$990\text{mm}^3 = \frac{\pi(16D_1^3 - 96D_1^2 + 256D_1 - 256)}{32D_1}$$

$$\frac{31680D_1}{\pi} = 16D_1^3 - 96D_1^2 + 256D_1 - 256$$

$$D_1 = 27.96\text{mm}$$

En los cálculos para el reposa brazos se determina una tubería de 27.96 mm de diámetro exterior, sin embargo, se puede observar la Figura 53 del Anexo 6, el catálogo de las tuberías donde las dimensiones más cercanas a las comerciales son de 25.4mm. Al seleccionar una tubería comercial de 25.4mm el factor de seguridad también cambia. Mediante la ecuación 16, se procede a calcular el módulo de sección correspondiente a dicha dimensión.

$$S_{\text{comercial}} = \frac{\pi(25.4^4 - (25.4 - 4)^4)}{32 \cdot 25.4}$$

$$S_{\text{comercial}} = 798.16\text{mm}^3$$

Mediante el módulo de sección comercial de 25.4, se procede a remplazar en la ecuación 13

para determinar el nuevo esfuerzo permisible.

$$\sigma_{\text{per_comercial}} = \frac{114775.2 \text{ N} \cdot \text{mm}}{798.16 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{\text{per_comercial}} = 143.79 \text{ N/mm}^2$$

Mediante el esfuerzo permisible comercial se reemplaza en la ecuación 8 para determinar el Factor de seguridad.

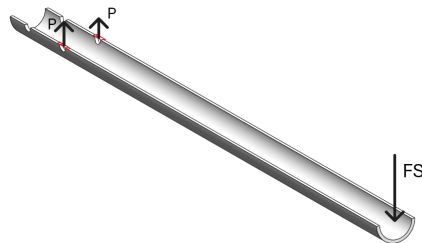
$$\text{factor de seguridad} = \frac{290 \text{ N/mm}^2}{143.79 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{factor de seguridad} = 2.01$$

Para determinar el aplastante que se genera en el agujero del reposabrazos, se considera que el diámetro es de 6.35 mm. Como se observa en la Figura 26, el aplastante se produce en las paredes del agujero del tubo.

Figura 26

Representación del aplastante del reposa brazos.



Nota: Se considera la zona crítica del reposa brazos, donde se generan 2 reacciones por la fuerza F_s .

Para determinar el aplastante se considera que la fuerza F_s genera dos reacciones P . Donde el área de acción está conformada por el diámetro del agujero y el espesor de la pared del tubo.

$$P = \frac{F_s}{2} = \frac{319 \text{ N}}{2} = 159.5 \text{ N}$$

$$A = 6.35 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 12.7 \text{ mm}^2$$

Mediante la ecuación 10, se procede a determinar el valor del esfuerzo aplastante.

$$\sigma_b = \frac{159.5 \text{ N}}{12.7 \text{ mm}^2} = 12.56 \text{ N/mm}^2$$

Se realiza una comparación del esfuerzo aplastante con respecto al esfuerzo admisible del material.

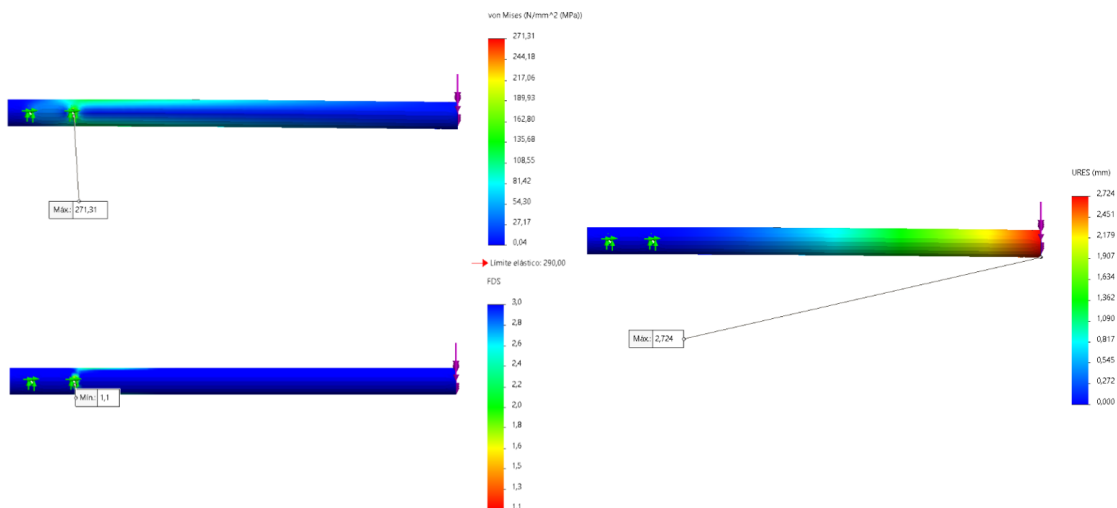
$$\sigma_b < \sigma_{\text{perA500}}$$

$$12.56 \text{ N/mm}^2 < 290 \text{ N/mm}^2$$

Se concluye que el esfuerzo aplastante es menor que el esfuerzo admisible del material. Se proceden a realizar los análisis estáticos del reposabrazos mediante el software SolidWorks, con la finalidad de conocer que los esfuerzos que se ejercen en el elemento no sobrepasan la zona elástica, observar el factor de seguridad y la deformación respectivamente que se observa en la Figura 43

Figura 27

Simulación del Reposabrazos.



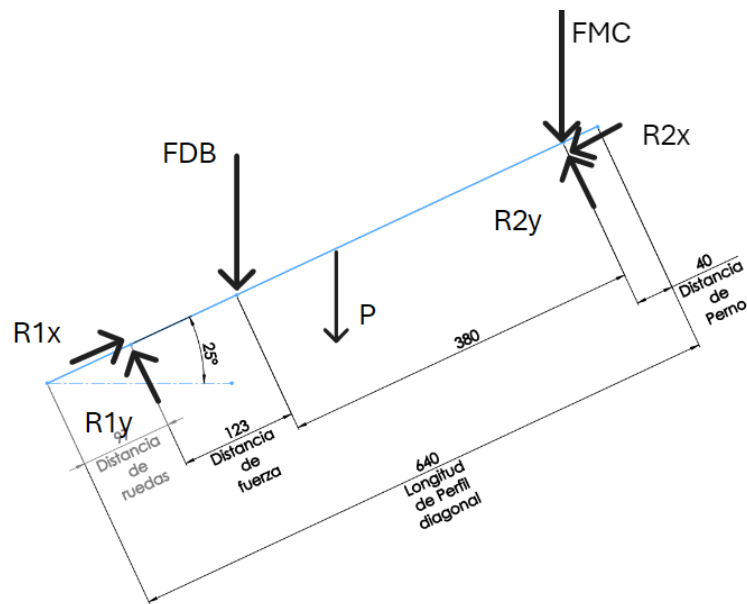
Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

5.4.8. Cálculo del perfil diagonal

Para el cálculo del perfil diagonal se observa en la Figura 28 el diagrama de cuerpo libre, para los análisis se considera la condición más crítica donde el elemento se encuentra sometido a flexión

Figura 28

Diagram de cuerpo libre del perfil diagonal.



Nota: Se considera la situación más crítica, donde el elemento está doblemente apoyado.

Para dimensionar la sección del tubo rectangular, se realiza sumatoria de fuerzas y momentos. La fuerza P representa el peso de la tubería y se encuentra en el centro del elemento. Se hace una suposición donde el peso aproximado es de 5kg.

$$P = 5 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 49.05 \text{ N}$$

Como el elemento se encuentra a una inclinación, se procede a calcular los componentes de cada fuerza.

$$FDB_y = 479 \sin(25^\circ) = 202.42 \text{ N}$$

$$FDB_x = 479 \cos(25^\circ) = 434.24 \text{ N}$$

$$FMC_y = 160 \sin(25^\circ) = 67.57 \text{ N}$$

$$FMC_x = 160 \cos(25^\circ) = 145.05 \text{ N}$$

$$P_y = 49 \sin(25^\circ) = 20.70 \text{ N}$$

$$P_x = 49 \cos(25^\circ) = 44.39 \text{ N}$$

Se procede a realizar los cálculos de sumatorias de fuerzas con el fin de determinar las reacciones R1 y R2 mediante el uso de la componente vertical.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{1y} + R_{2y} - FDB_y - FMC_y - P_y = 0$$

Se procede a realizar las sumatorias de momentos.

$$\sum M = 0$$

$$-FDB_y \cdot 123 - P_y \cdot 223 + R_{2y} \cdot 503 - FMC_y \cdot 503 = 0$$

$$R_{2y} = \frac{63531.86}{503} \approx 126.33 \text{ N}$$

Se resuelve la sumatoria de fuerzas para determinar el valor de R1y

$$R_{1y} = 164.49 \text{ N}$$

Se procede a analizar el momento máximo entre FBD y P con respecto a R1, con el fin de dimensionar la sección transversal.

$$M_{FDB_y} = 24905.27 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{P_y} = 4628.33 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Mediante la ecuación 13, el momento generado por la fuerza BD y el esfuerzo permisible del A500 se determina el módulo de sección.

$$S_2 = \frac{24905.27 \text{ N} \cdot \text{mm}}{116 \text{ N}/\text{mm}^2}$$

$$S_2 = 214.29 \text{ mm}^3$$

Para determinar la sección modular, se puede observar en la Figura 52 del Anexo 5, las diferentes propiedades de las figuras geométricas, se procede a seleccionar la ecuación de la sección modular del rectángulo hueco y se expresa:

$$S = \frac{BH^3 - bh^3}{6H} \quad (17)$$

Donde la H representa el largo exterior, B la base exterior, h el largo interior y b la base interior. Para determinar el largo exterior se considera un espesor de 2mm, también la base de las ruedas motorizadas mide 40mm, por el cual este valor se considera la base exterior.

$$S = \frac{BH^3 - (B - 4)(H - 4)^3}{6H} \quad (18)$$

donde:

$$B = 40 \text{ mm}$$

$$b = B - 4 \text{ mm}$$

$$h = H - 4 \text{ mm}$$

Se resuelve la ecuación

$$214.29 = \frac{40H^3 - (40 - 4)(H - 4)^3}{6H}$$

El valor aproximado de H es:

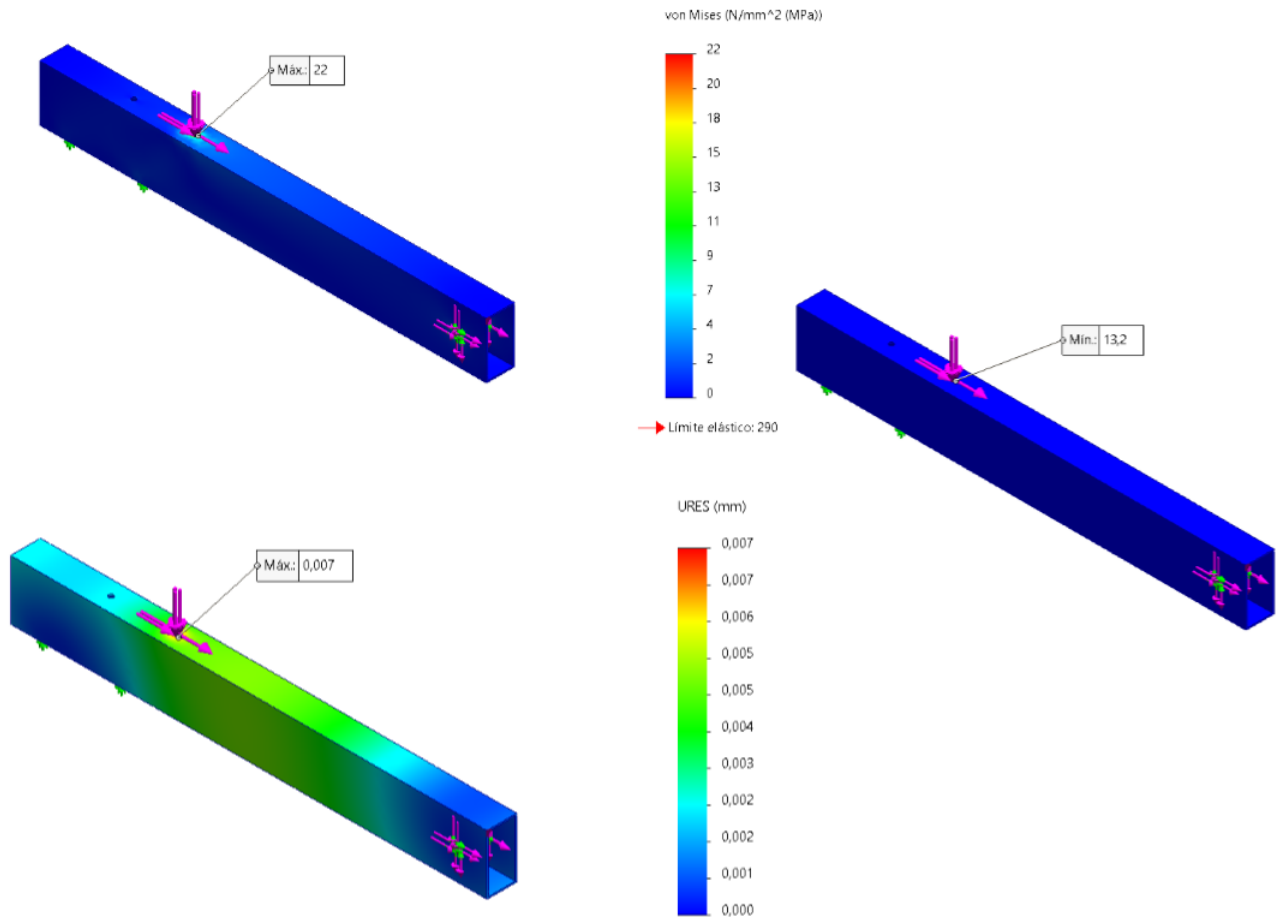
$$H \approx 48.35 \text{ mm}$$

En los cálculos para la estructura diagonal se determina una tubería rectangular de 40x48mm, sin embargo, en la Figura 52 del Anexo 7 se seleccionó una tubería rectangular de 40x80mm. Se proceden a realizar los análisis estáticos del reposabrazos mediante el software SolidWorks con la finalidad de conocer que los esfuerzos que se ejerce en el elemento que no sobrepasen la zona elástica, observar el factor de seguridad y la deformación como se observa en la Figura

44

Figura 29

Simulación del perfil diagonal.



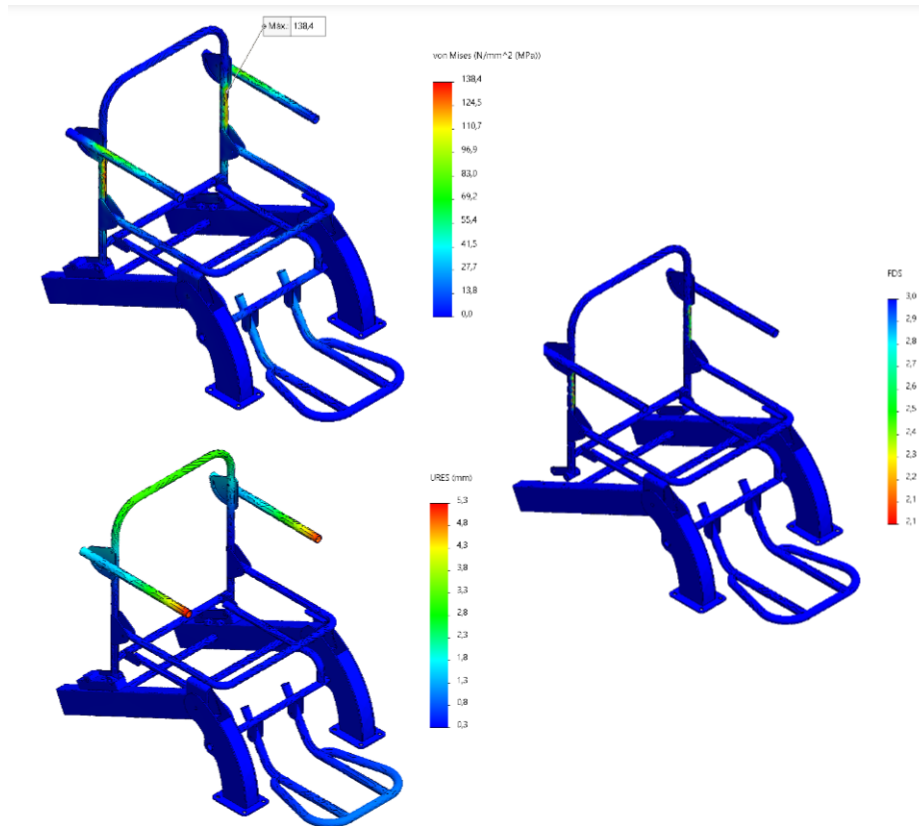
Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

5.4.9. Simulación general de la estructura mecánica

Una vez determinada la sección transversal de los dos elementos previamente mencionados y la dimensión del perno, se procedió a realizar un análisis general de toda la estructura mediante el método de elementos finitos. Este análisis permitió conocer los esfuerzos a los que está sometida la estructura, verificar si estos se encuentran dentro del límite elástico, y evaluar las deformaciones y el factor de seguridad como se puede observar en la Figura 45

Figura 30

Simulación general de la estructura mecánica.



Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

5.5. Diseño a Detalle

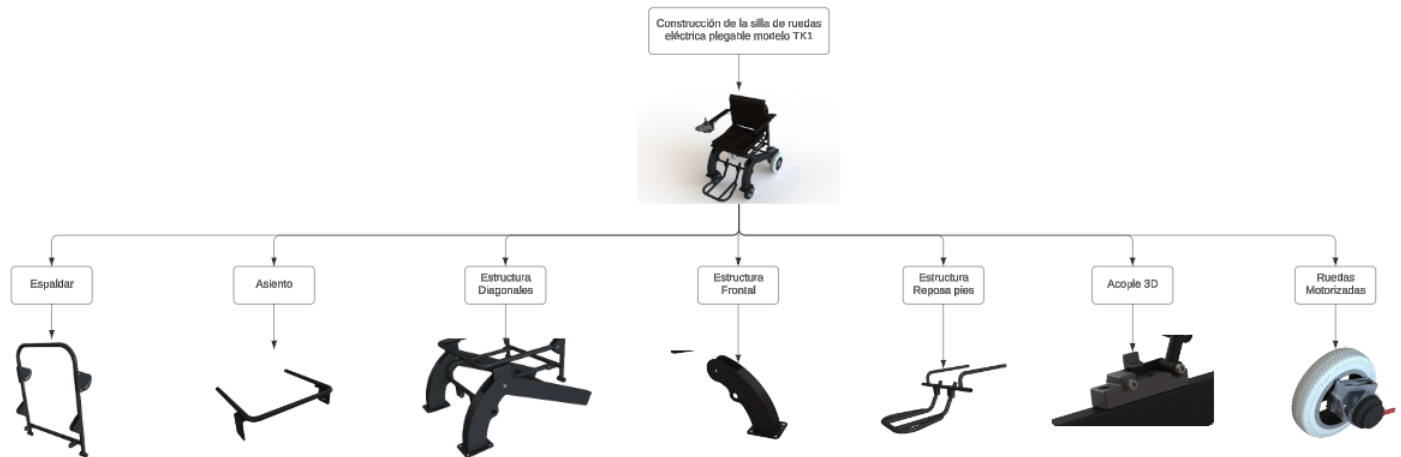
Para el proceso de construcción del dispositivo, en primera instancia se realizaron planos de cada conjunto, respetando los parámetros previamente obtenidos, los cuales se encuentran disponibles en el Anexo 8.

5.6. Proceso de construcción

Se realiza el diagrama de procesos identificando cada subconjunto que compone el dispositivo de silla de ruedas eléctrica plegable modelo TK1, como se observa en la Figura 31.

Figura 31

Diagrama del proceso de construcción de la silla de ruedas.



Nota: Se observa los diferentes subconjuntos para ensamblar en la silla de ruedas.

5.7. Sistema de Control

En este apartado se abordará el sistema de control integrado, como también dos propuestas de sistemas de control para la silla de ruedas eléctrica TK1. Con la primera propuesta, se busca emplear un sensor IMU que reconozca la intención de movimiento del usuario para generar los comandos necesarios que permitan el desplazamiento de la silla de ruedas. En la segunda opción de control, se plantea la implementación de un joystick inalámbrico que permita la asistencia de una tercera persona. En ambas propuestas, se utilizará el protocolo de comunicación ESP-NOW, que requiere dos ESP32, uno que actúe como emisor y otro como receptor.

5.7.1. Sistema de control implementado en el modelo TK1

En esta sección se detallan los componentes del sistema de control implementado en la silla de ruedas eléctrica modelo TK1. Estos componentes son de carácter comercial y han sido adaptados de la primera versión de la silla de ruedas eléctrica plegable Castanier Muñoz y Mendía Idrovo (2018). En la siguiente Tabla 1, se proporcionan cada uno de los componentes junto con sus características.

Tabla 1*Componentes implementados en el modelo TK1*

Componente	Cantidad	Descripción
Motores Brushless de 12"	2	Motores Brushless de 12 pulgadas, estos motores cuentan con un freno electromagnético a 24VDC, un peso aproximado de 4 kg y una potencia nominal de 250 W.
Joystick WSYG-24V	1	Joystick Comercial Estándar Este dispositivo permite comandar la dirección mediante una palanca. Además, cuenta con botones para regular la velocidad y un medidor para visualizar la carga de la batería.
Control de Motores WS-24V	1	Controlador para motores de 24V, regula la potencia para el control de velocidad y también el sentido de giro de las ruedas.
Batería Li-Po de 24V y 10Ah	1	Pack de batería de 24V y 10Ah, con un peso aproximado de 3 kg.

Nota: La tabla presenta los componentes implementados en la silla de ruedas eléctrica modelo TK1, así como sus características. (Golden Motor, 2024)

El funcionamiento del sistema de control comienza cuando el usuario establece la dirección mediante el joystick. De manera similar, si desea modificar la velocidad, la interfaz ofrece un conjunto de botones para aumentar o disminuir la velocidad. Una vez que se establece la dirección, el joystick genera una señal que es recibida por la unidad de control WS-24V. Esta unidad se encarga de regular la potencia de las ruedas motorizadas, lo que permite el movimiento del chasis. En la Figura 32 se muestra el modo de uso del sistema de control implementado.

Figura 32

Funcionamiento del sistema de control comercial.



Nota: El funcionamiento del control comercial está conformado por el joystick, unidad de control WS-24V y ruedas motorizadas.

5.7.2. Sistema de control alternativo opción 1

En este apartado se examinará en detalle la propuesta de control basada en un sensor IMU9250, con un enfoque especial en usuarios con limitaciones que impiden el uso efectivo del joystick. Además, este sistema de control se presenta como una alternativa al sistema implementado en el modelo TK1, debido a las dificultades encontradas para adquirir un conjunto adecuado de ruedas motorizadas, joystick, baterías y otros componentes necesarios. En la Tabla 3 se proporciona una lista detallada de los componentes propuestos y sus respectivas descripciones.

Tabla 2*Componentes Propuestos para la primera alternativa de control*

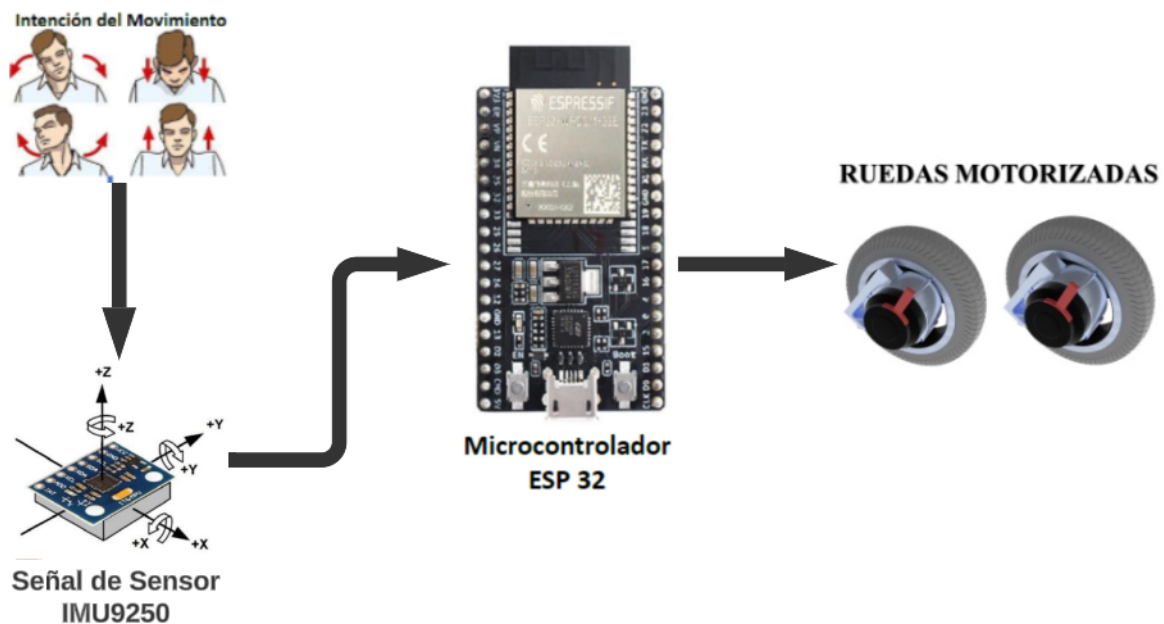
Componente	Cantidad	Observaciones
ESP32	2	Módulo WiFi/Bluetooth que permite la comunicación inalámbrica y el control remoto de los motores y otros componentes.
Sensor IMU9250	1	Sensor de movimiento de 9 ejes que proporciona datos precisos sobre la orientación y aceleración, esenciales para la emulación del joystick.
Puente H	1	Controlador de motores que permite la inversión de la dirección del motor y el control de la velocidad mediante modulación de ancho de pulso (PWM).
Batería	1	Es la fuente de alimentación del módulo .
Vestible	1	Permite posicionar los sensores IMU9250 en el usuario .

Nota: La tabla presenta los componentes propuestos para el nuevo diseño de sistema de control y sus respectivas observaciones.

El funcionamiento del sistema de control por medio de un sensor IMU consistirá en que el usuario utilizará un dispositivo vestible a nivel del temporal. Este control estará enfocado en personas con limitaciones de motricidad en extremidades superiores e inferiores. Mediante inclinaciones de derecha a izquierda de la cabeza, el usuario establecerá la dirección de izquierda y derecha de la silla de ruedas y mediante ligeras inclinaciones de atrás y adelante el usuario establece los movimientos de retroceso y avanzar. Una vez que se establezca la dirección mediante los sensores, dicha señal será capturada por un ESP32 y, mediante el protocolo de comunicación ESP-NOW, se enviará al módulo receptor, que estará conformado por un ESP32 y un puente H, con la finalidad de regular la velocidad y la dirección de las ruedas motorizadas. En la Figura 33 se muestra el modo de uso de la primera alternativa de control

Figura 33

Funcionamiento de la primera propuesta de control.

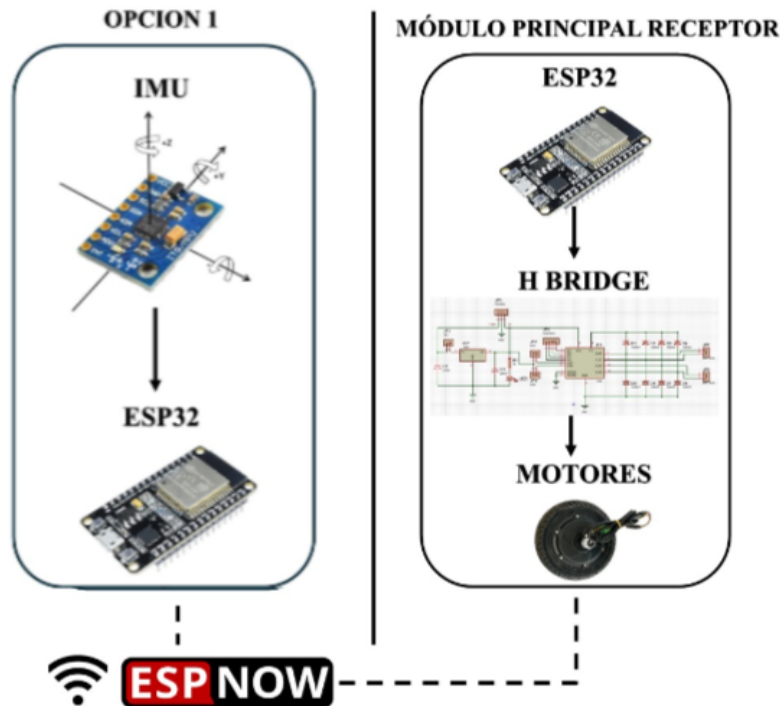


Nota: El funcionamiento de la primera alternativa de control estará conformado por el sensor IMU y dos ESP32.

En la Figura 34, se muestra el módulo IMU9250 acompañado de su correspondiente microcontrolador ESP32. El módulo IMU9250 está diseñado para captar datos precisos sobre la orientación y los movimientos del sistema mediante sus sensores de giroscopio y acelerómetro. Esta información es crucial para aplicaciones que requieren un monitoreo detallado de la postura y el desplazamiento. El ESP32, por su parte, facilita la integración del IMU9250 con el resto del sistema al proporcionar la conectividad necesaria para la transmisión de datos. La figura ilustra claramente cómo el IMU9250 se conecta con el módulo principal a través del ESP32, destacando su función en la adquisición de datos y su papel en el proceso de control y monitoreo del sistema en tiempo real.

Figura 34

Interacción entre el módulo principal y el módulo del IMU9250 .



Nota: Módulo de sensor IMU y módulo principales comunicados mediante el protocolo ESP-NOW

5.7.3. Sistema de control alternativo opción 2

En este apartado se examinará en detalle la propuesta de control basada en un joystick, diseñada específicamente para permitir la asistencia externa. En este enfoque, un tercer usuario, encargado de controlar la silla, operará el joystick para dirigir el movimiento y las funciones de la silla de ruedas. Este sistema de control está orientado a ofrecer una solución práctica en situaciones donde el usuario principal de la silla pueda necesitar ayuda para operar el dispositivo de manera efectiva. La Tabla 3 proporciona una lista detallada de los componentes propuestos para esta solución, junto con sus respectivas descripciones, para ofrecer una visión clara de los elementos que conforman el sistema de control.

Tabla 3*Componentes Propuestos para la segunda alternativa de control*

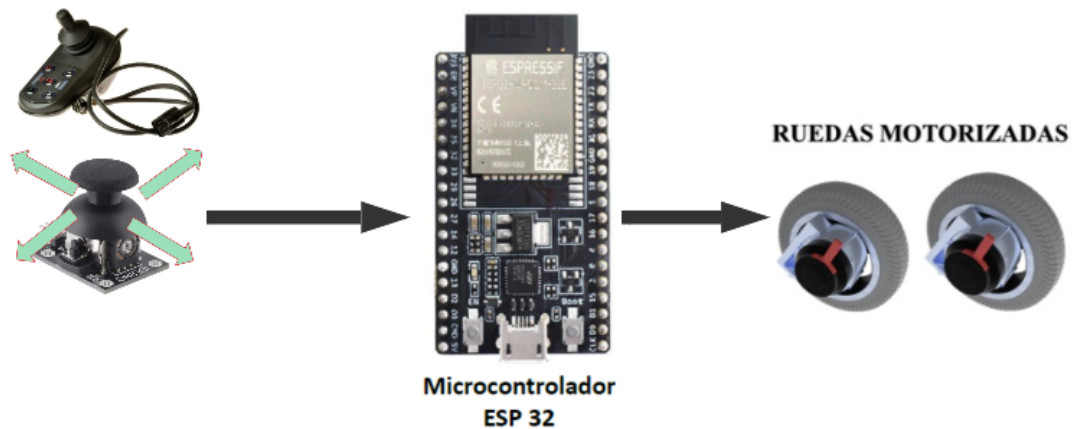
Componente	Cantidad	Observaciones
ESP32	2	Módulo WiFi/Bluetooth que permite la comunicación inalámbrica y el control remoto de los motores y otros componentes.
Módulo Joystick	1	Utilizados para emular el movimiento del joystick mediante la variación de la resistencia, proporcionando señales analógicas al ESP32.
Puente H	1	Controlador de motores que permite la inversión de la dirección del motor y el control de la velocidad mediante modulación de ancho de pulso (PWM).
Batería	1	Es la fuente de alimentación del módulo .

Nota: La tabla presenta los componentes propuestos para el nuevo diseño de sistema de control y sus respectivas observaciones.

El funcionamiento del sistema de control mediante el módulo de joystick inalámbrico está diseñado para asistir a personas con limitaciones de motricidad que requieren la ayuda de un tercero. En este sistema, las distintas direcciones del joystick son capturadas por un microcontrolador ESP32, que gestiona la entrada del joystick. La comunicación entre el joystick y el módulo receptor se realiza a través del protocolo de comunicación ESP-NOW, el cual permite una transmisión eficiente y en tiempo real de los datos. El módulo receptor, compuesto por otro ESP32 y un puente H, recibe las señales enviadas desde el joystick y las convierte en comandos que controlan el movimiento y las funciones de la silla de ruedas. En la Figura 35 se ilustra el modo de uso de esta primera alternativa de control, mostrando cómo se implementa el sistema y cómo interactúan los diferentes componentes para facilitar el manejo de la silla.

Figura 35

Funcionamiento de la segunda propuesta de control.

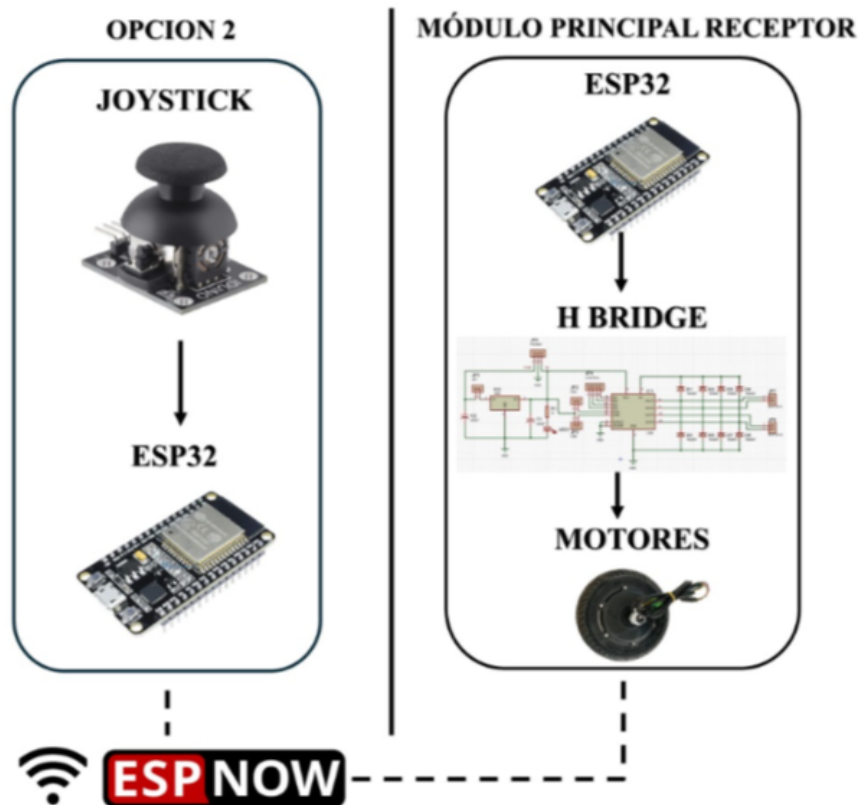


Nota: El funcionamiento de la segunda alternativa de control estará conformado por un módulo joystick y dos ESP32.

En la Figura 36 se observa el módulo joystick acompañado de su respectivo ESP32, destacando la interacción con el módulo principal del sistema. El joystick, junto con el ESP32, está diseñado para captar las entradas del usuario y transmitir las al módulo receptor. La figura ilustra cómo el ESP32, conectado al joystick, se comunica con el módulo principal, proporcionando una visión clara del flujo de datos y la integración de los componentes del sistema. Esta configuración permite la gestión eficaz del control de la silla de ruedas mediante el joystick inalámbrico, facilitando la asistencia externa y la operación del sistema.

Figura 36

Interacción entre el módulo principal y el módulo del joystick.



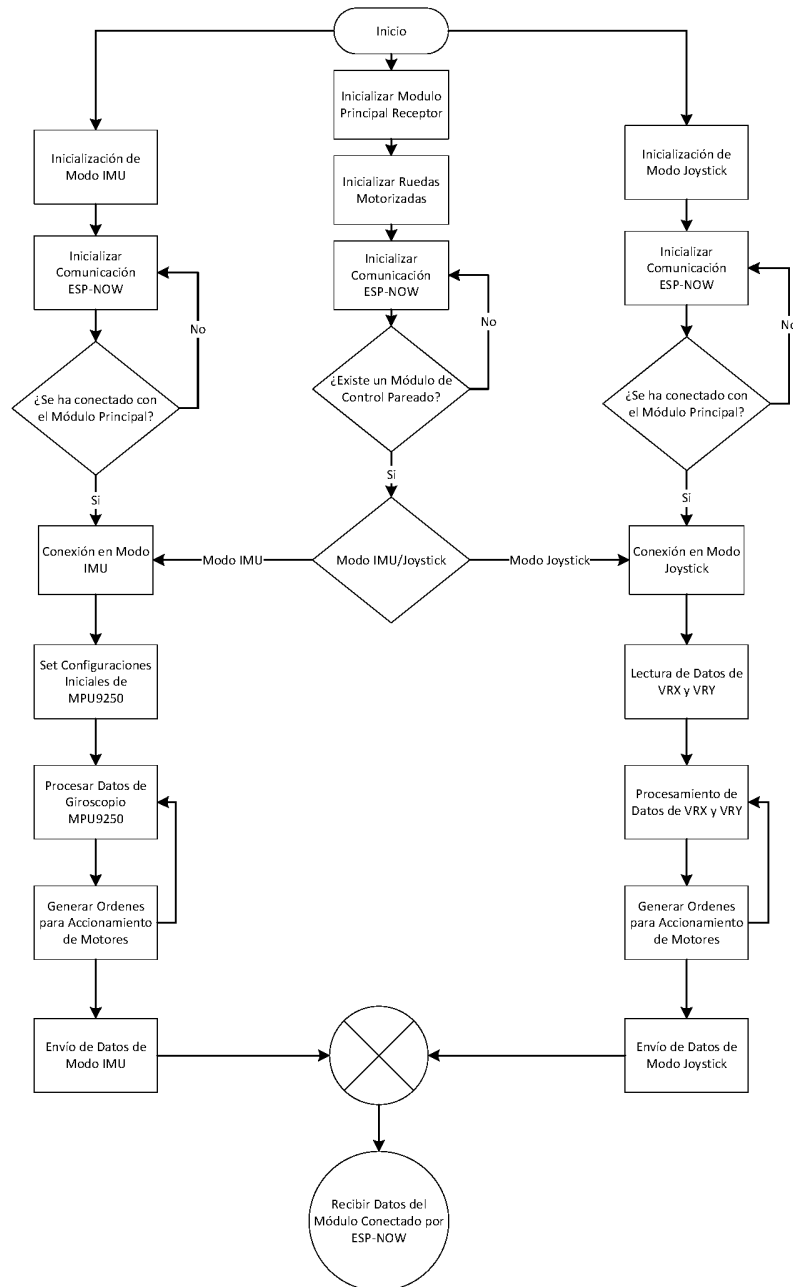
Nota: Módulo de joystick y módulo principal comunicados mediante el protocolo ESP-NOW.

5.7.4. Flujograma

El flujograma del sistema de control propuesto se puede observar en la Figura 37 y Figura 38 . Este flujograma es una representación visual del funcionamiento de las diferentes opciones y la comunicación mediante el protocolo ESP-NOW. Los distintos procesos representan las etapas principales del sistema, desde la activación inicial hasta la ejecución de los comandos de control.

Figura 37

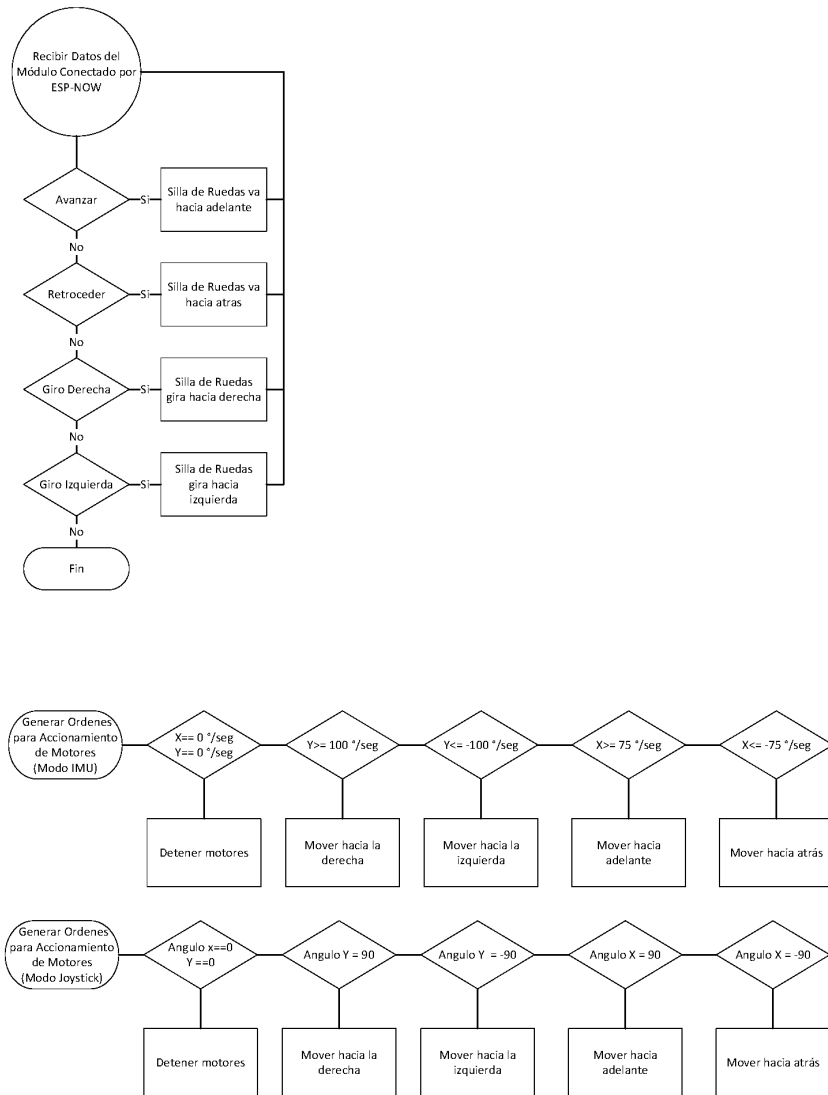
Flujograma del Sistema de Control Alternativo.



Nota: Se incluye ambas opciones del sistema de control alternativo, el MPU9250 y el Joystick.

Figura 38

Continuación de Flujograma de Sistema de Control Alternativo.



Nota: Finalización del Proceso del Flujograma. Detallandose el proceso de los datos para generar ordenes para accionar los motores según cada modo.

El sistema alternativo de control inicia con el encendido de los diferentes módulos que lo conforman. El módulo principal receptor es el encargado de permitir la conexión de un tipo de dispositivo, ya sea en modo IMU o en modo Joystick, para evitar redundancias en la recepción de órdenes para la activación de los motores.

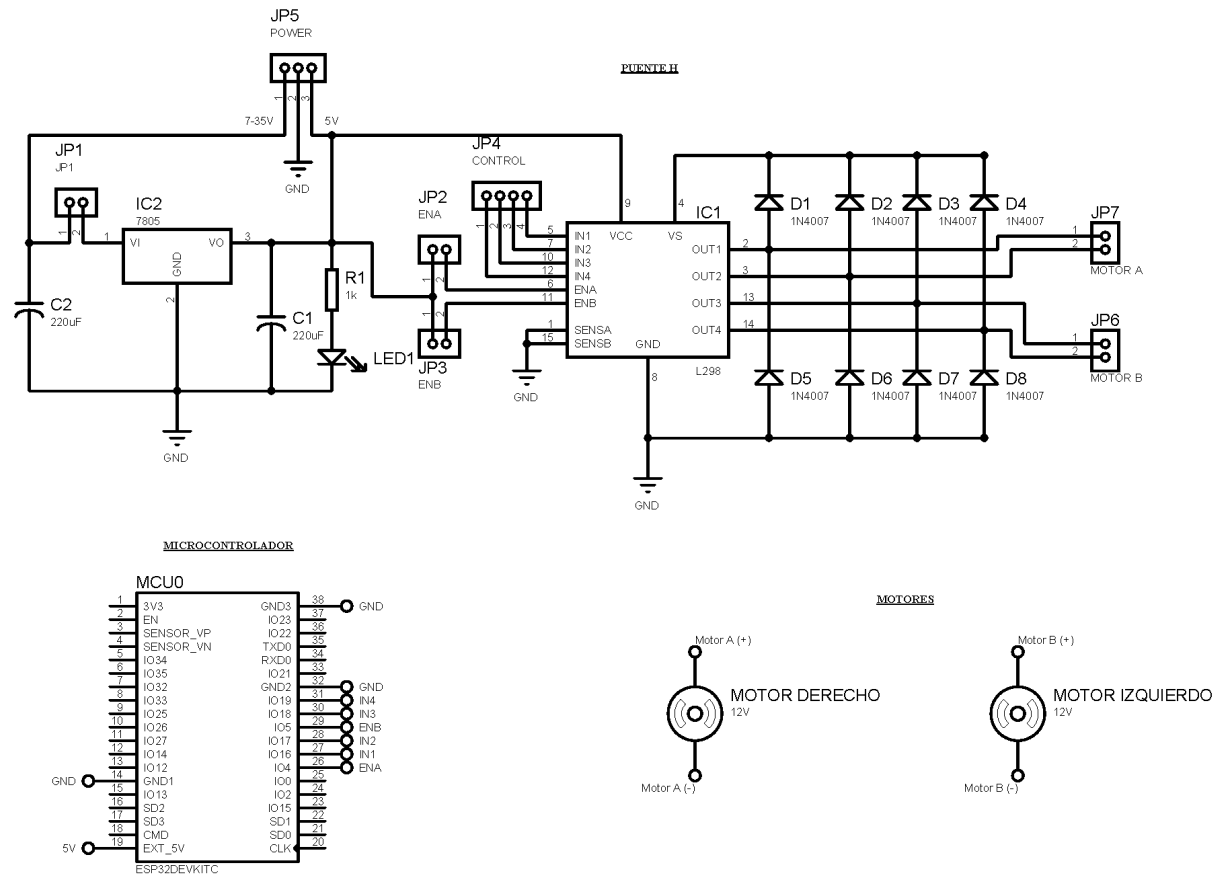
Cada modo dispone de su propia lógica, lo cual permite la adquisición única de los datos necesarios. Tanto el MPU9250 como el Joystick se configurarán para operar dentro de un rango de valores específicos que aseguren que la orden de funcionamiento del motor cumpla con las condiciones necesarias para su activación. En caso contrario, el sistema se mantendrá en espera o en paro hasta que la señal obtenida cumpla con los requisitos necesarios para arrancar los motores de acuerdo a lo requerido.

5.7.5. Esquema Electronico

El esquema electrónico del sistema propuesto en las Figuras 39, 40 y 41 ilustra detalladamente la conexión de los componentes principales, de las Figuras 34 y 36, empleando módulos ESP-32, batería de 3.7V y su respectivo módulo de carga, en el caso de los módulos de control alternativos a distancia de modo IMU y modo Joystick. Para el módulo principal receptor, será alimentado directamente de la batería de la silla de ruedas, por lo que mediante el puente H, este servirá para alimentar el ESP-32 y los motores DC, además de permitir el control de estos mismos, mediante la recepción de datos, y la activación de las salidas del microcontrolador.

Figura 39

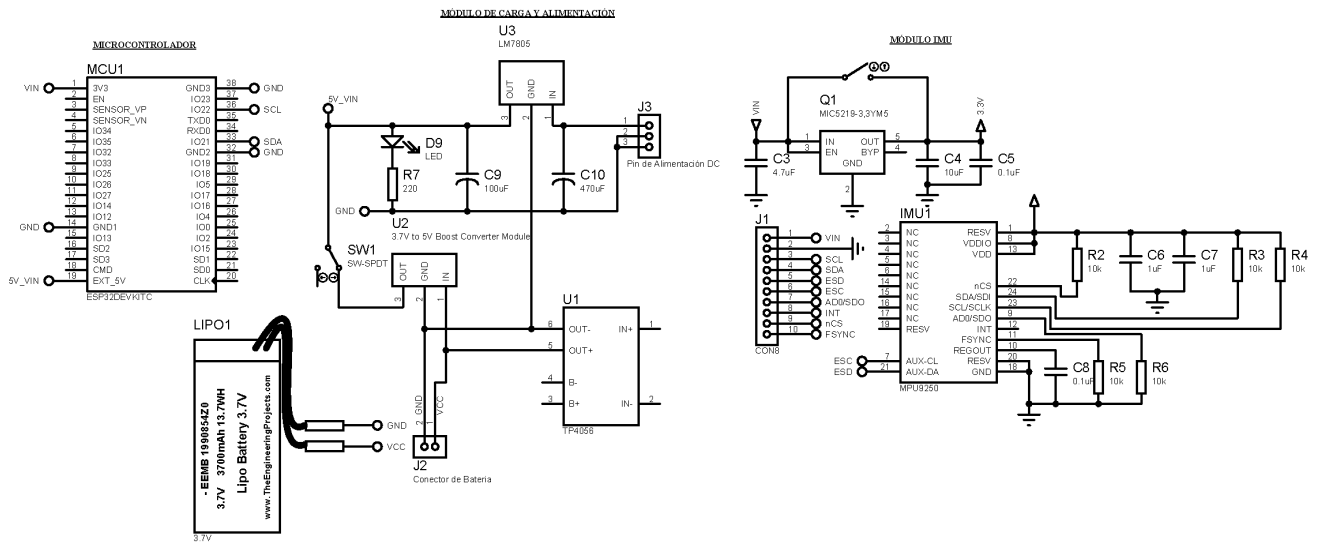
Esquema Electrónico del Módulo Principal Receptor



Nota: Componentes dentro del esquema integrado son ESP-32, H-Bridge, Motores DC. Diseñado en Proteus

Figura 40

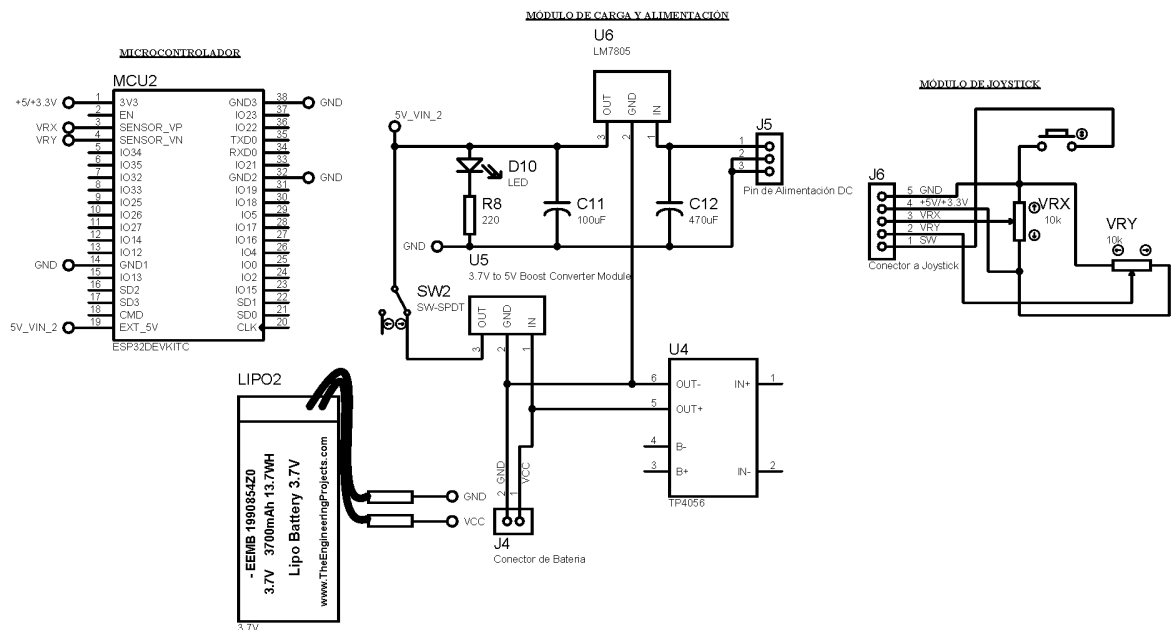
Esquema Electrónico del Módulo IMU a Distancia



Nota: Componentes dentro del esquema integrado son ESP-32, Batería de Litio de 3.7V y MPU9250. Diseñado en Proteus.

Figura 41

Esquema Electrónico del Módulo Joystick a Distancia



Nota: Componentes dentro del esquema integrado son ESP-32, Batería de Litio de 3.7V y Joystick. Diseño en Proteus.

La planificación y diseño del esquema eléctrico, en conjunto con el diagrama de flujo y la implementación del protocolo ESP-NOW, forman una base robusta y eficiente para el sistema de control de la silla de ruedas eléctrica. La compatibilidad de los componentes seleccionados y su disposición aseguran que el sistema sea escalable y adaptable a futuras modificaciones o mejoras. La capacidad de actualizar y expandir el sistema sin necesidad de reconfigurar completamente la infraestructura de comunicación es una ventaja significativa

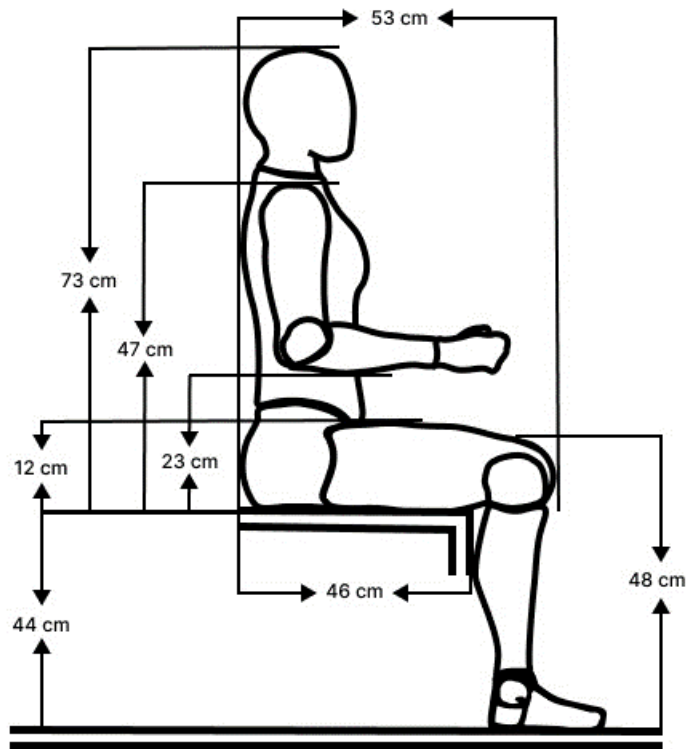
6. Resultados

6.1. Resultados de las variables de diseño

El resultado de las variables de diseño está relacionado con la antropometría del usuario y las condiciones de la estructura de la silla de ruedas, analizadas en dos estados: plegado y abierto. En la Figura 42 se observa la antropometría del usuario y en la Tabla 4 se detallan las dimensiones que cumplen con las condiciones de la silla y la antropometría del usuario.

Figura 42

Resultados de la antropometría del usuario.



Nota: Se observa la antropometría del usuario en posición de reposo.

Tabla 4*Medidas Antropométricas y Dimensiones para la Silla de Ruedas*

Medida	Antropometría	Dimensión para Silla	Descripción
Altura total sentado	73 cm		Desde el asiento hasta la coronilla de la cabeza
Altura del respaldo del asiento	47 cm	41 cm	Desde el asiento hasta la parte superior de los hombros
Altura del reposabrazos	23 cm	22 cm	Desde el asiento hasta el codo en un ángulo de 90°
Longitud del antebrazo	40 cm	42 cm	Desde el extremo del codo hasta la muñeca
Altura de la rodilla	48 cm		Desde la planta del pie hasta la parte superior de la rodilla
Profundidad del asiento al muslo	44 cm	40 cm	Desde la planta del pie hasta la parte anterior del muslo en un ángulo de 90°
Profundidad del asiento a la parte anterior de la rodilla	46 cm	41 cm	Desde la parte extrema del glúteo hasta la parte anterior de la rodilla
Profundidad total del asiento	53 cm		Desde la parte extrema del glúteo hasta el extremo de la rodilla
Longitud medida de los extremos de los hombros	45 cm	48 cm	Medida horizontal desde un extremo del hombro al otro

Nota: La tabla presenta las medidas antropométricas del usuario y las medidas usadas para el diseño de la silla de ruedas TK1.

En la tabla se observan las diferentes medidas antropométricas y dimensiones utilizadas para la silla de ruedas. En algunos casos, las dimensiones de la silla no coinciden con las medidas antropométricas debido a consideraciones de diseño y recomendaciones de manuales. A continuación se detallan estas diferencias:

- **Altura del respaldo del asiento:** La dimensión para la silla es menor que la medida

antropométrica, ya que los manuales recomiendan que el respaldo no sobrepase la altura de los omóplatos para mantener la comodidad del usuario.

- **Altura del reposabrazos:** La diferencia entre ambas medidas es de solo 1 cm, lo que no representa un cambio significativo en la funcionalidad.
- **Longitud del antebrazo:** La dimensión de la silla es ligeramente mayor debido a que se trata de un elemento apernado, lo que permite cierta flexibilidad en el ajuste.
- **Profundidad del asiento:** La dimensión de la silla es menor que la medida antropométrica, siguiendo las recomendaciones de algunos manuales para asegurar un ajuste adecuado y evitar molestias.
- **Longitud de los extremos de los hombros:** La dimensión de la silla es mayor que la medida antropométrica, en concordancia con recomendaciones de manuales para proporcionar un mejor soporte y comodidad.

6.2. Resultados de las simulaciones mediante elementos finitos

En los resultados de elementos finitos, primero se realizó un cálculo de armaduras para determinar las fuerzas que se ejercen en cada nodo. Estas fuerzas permitieron dimensionar la sección transversal de dos elementos, los cuales se utilizaron de forma general en la estructura. En la Tabla 5 se muestran la dimensión calculada y las medidas del elemento comercial correspondiente.

Tabla 5

Valores Calculados y Comerciales para Tubos y Tuberías

Tipo de Tubo/Tubería	Valor Calculado	Valor Comercial
Tubo de sección circular	27.96 mm de diámetro, 2 mm de espesor	25.4 mm de diámetro, 2 mm de espesor
Tubería rectangular	40 mm x 48 mm, 2 mm de espesor	40 mm x 80 mm, 2 mm de espesor

Nota: Esta tabla presenta las dimensiones calculadas y las dimensiones comerciales para cada tipo de tubo y tubería.

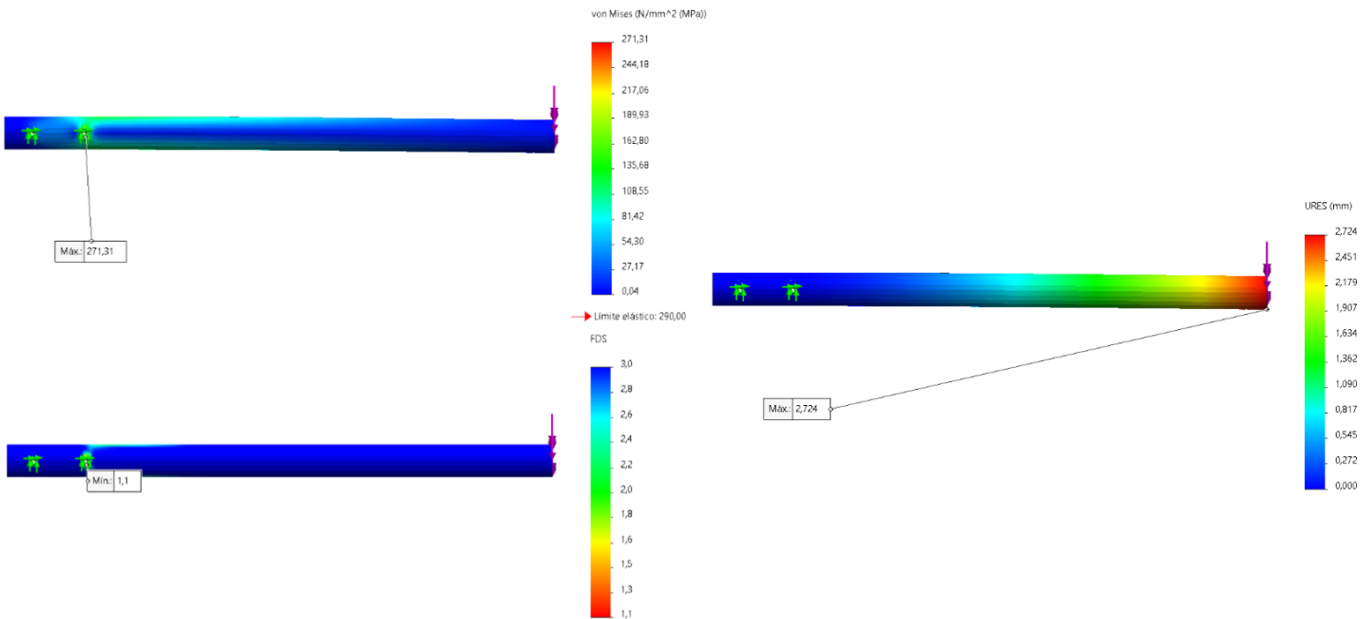
Para cada elemento, se procede a analizar los resultados obtenidos de las simulaciones de elementos finitos.

6.2.1. Resultados del Repoza Brazos

En la siguiente Figura 43 se observa el análisis de elementos finitos del reposa brazos

Figura 43

Simulación del Repoza Brazos.



Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

Para las simulaciones del reposabrazos, se utilizó un mallado tipo tetraédrico debido a la presencia de un agujero en el componente, lo cual es crucial para analizar la concentración de esfuerzos en esa sección. Los resultados de los esfuerzos muestran un valor de 271 MPa dentro de la sección de los agujeros, que está por debajo del límite elástico del material. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, al ser un mallado tetraédrico, algunos tetraedros específicos pueden almacenar este valor. En cuanto a la deformación, se observó que alcanza un valor de 2.7 mm; no obstante, dado que se encuentra dentro de la zona elástica, el reposabrazos regresa a su posición original. El factor de seguridad registrado es de 1.1, aunque, debido al mallado tetraédrico, algunos tetraedros específicos presentan este valor. En la Tabla 6 se detalla los resultado de Esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad

Tabla 6*Parámetros del Análisis de Mallado Reposabrazos*

Parámetro	Valor	Notas
Tipo de Mallado	Tetraédrico	Utilizado para analizar la concentración de esfuerzos en el agujero del reposabrazos.
Esfuerzo Máximo	271 MPa	Valor dentro de la sección de los agujeros; por debajo del límite elástico del material.
Deformación	2.7 mm	Valor observado; el reposabrazos regresa a su posición original al estar dentro de la zona elástica.
Factor de Seguridad	1.1	Valor registrado; algunos tetraedros específicos almacenan dicho valor.

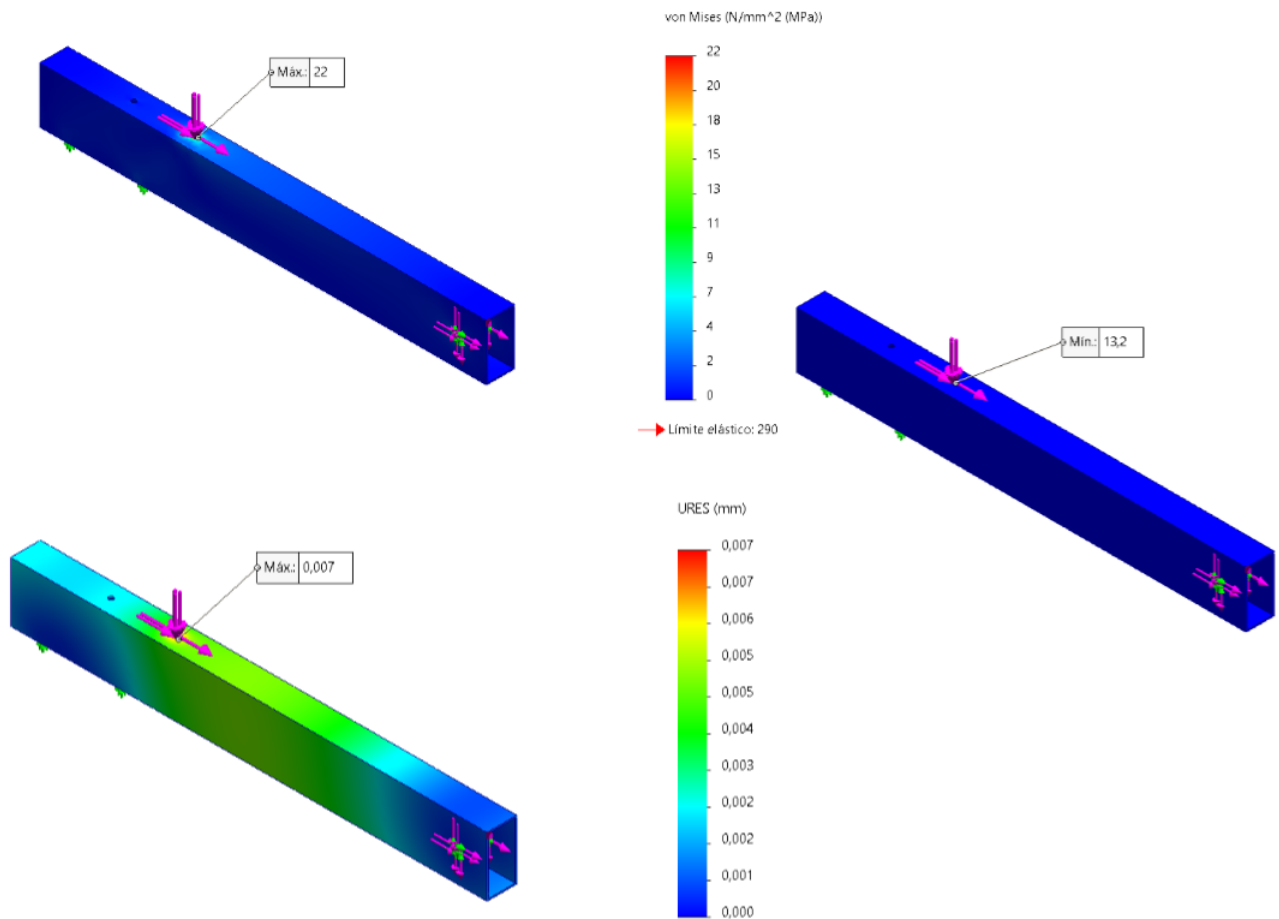
Nota: La tabla presenta los parámetros del análisis de mallado y sus respectivas notas.

6.2.2. Resultados del Perfil Diagonal

En la Figura 44 se observa el análisis de elementos finitos del perfil diagonal. Este análisis se realiza para evaluar el comportamiento estructural del perfil bajo condiciones de carga específicas. La figura muestra la distribución de tensiones y deformaciones a lo largo del perfil, proporcionando una visión detallada de cómo se comporta el material bajo las cargas aplicadas. El análisis de elementos finitos permite identificar puntos críticos y evaluar la resistencia del perfil, lo que es crucial para garantizar la integridad estructural y el desempeño adecuado en su aplicación práctica.

Figura 44

Simulación del perfil diagonal.



Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

Para las simulaciones del perfil diagonal, se utilizó un mallado tipo tetraédrico debido a la presencia de agujeros en el elemento. Los resultados mostraron que el esfuerzo máximo registrado es de 22 MPa, valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material. La deformación experimentada fue de 0.007 mm, y el factor de seguridad registrado es de 13.2. Sin embargo, es importante destacar que, debido al mallado tetraédrico, el factor de seguridad se almacena en ciertos tetraedros específicos. En la Tabla 7 se detalla los resultado de Esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad

Tabla 7*Parámetros del Análisis de Mallado Perfil Diagonal*

Parámetro	Valor	Notas
Tipo de Mallado	Tetraédrico	Utilizado debido a la presencia de agujeros en el perfil diagonal.
Esfuerzo Máximo	22 MPa	Valor registrado; por debajo del límite elástico del material.
Deformación	0.007 mm	Valor observado en la simulación.
Factor de Seguridad	13.2	Valor registrado; almacenado en ciertos tetraedros específicos debido al mallado tetraédrico.

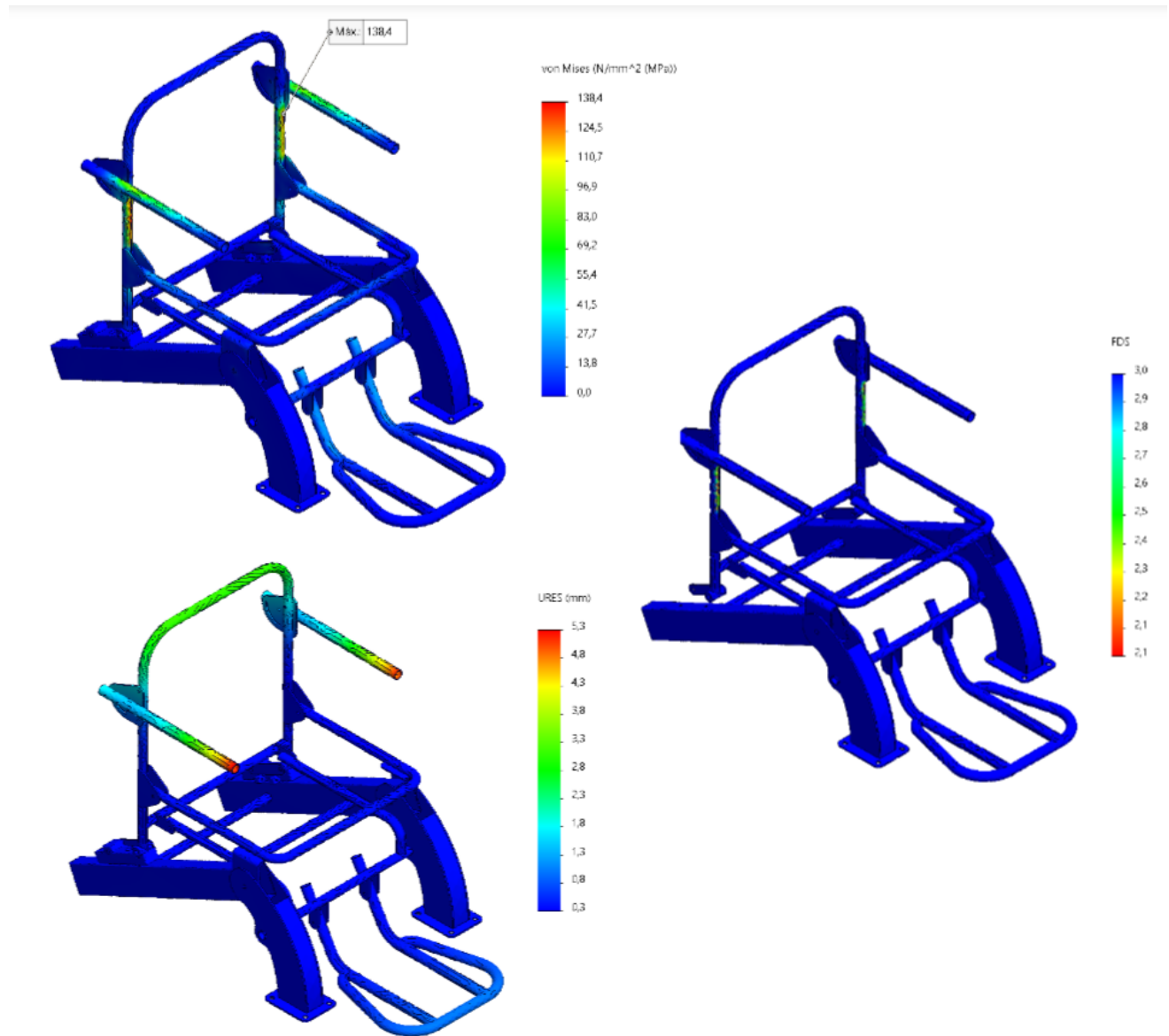
Nota: La tabla presenta los parámetros del análisis de mallado y sus respectivas notas.

6.2.3. Resultados de la estructura general

En la Figura 45 se observa el análisis de elementos finitos de la estructura general. Este análisis proporciona una evaluación detallada del comportamiento global de la estructura bajo diferentes condiciones de carga. La figura ilustra la distribución de tensiones, deformaciones y posibles puntos críticos a lo largo de toda la estructura, permitiendo una comprensión profunda de su respuesta estructural. El análisis de elementos finitos es esencial para identificar áreas de alta carga y posibles fallos, lo que contribuye a asegurar que la estructura cumpla con los requisitos de resistencia y estabilidad para su aplicación prevista.

Figura 45

Simulación general de la estructura mecánica.



Nota: Se realizaron tres simulaciones: esfuerzos, factor de seguridad y deformación.

Para las simulaciones de la estructura general, se utilizó un mallado tetraédrico debido a la complejidad del sistema, que incluye agujeros en ciertos elementos, conexiones tipo perno y diferentes materiales. Entre los resultados obtenidos, se observa un valor de 138.4 MPa concentrado en el espaldar, el cual no excede el límite elástico del material. Al analizar la

deformación, se registra un valor máximo de 5.3 mm en el reposabrazos, resultado de las múltiples fuerzas a las que está sometida la estructura. El factor de seguridad es de 2.1, y este valor se concentra en el espaldar y en los elementos de acople con el reposabrazos. En la Tabla 8 se detalla los resultado de Esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad

Tabla 8

Parámetros del Análisis de Mallado Estructura General

Parámetro	Valor	Notas
Tipo de Mallado	Tetraédrico	Utilizado debido a la complejidad del sistema, incluyendo agujeros, conexiones tipo perno y diferentes materiales.
Esfuerzo Máximo	138.4 MPa	Valor concentrado en el espaldar; no excede el límite elástico del material.
Deformación	5.3 mm	Valor máximo registrado en el reposabrazos debido a las múltiples fuerzas a las que está sometida la estructura.
Factor de Seguridad	2.1	Valor concentrado en el espaldar y en los elementos de acople con el reposabrazos.

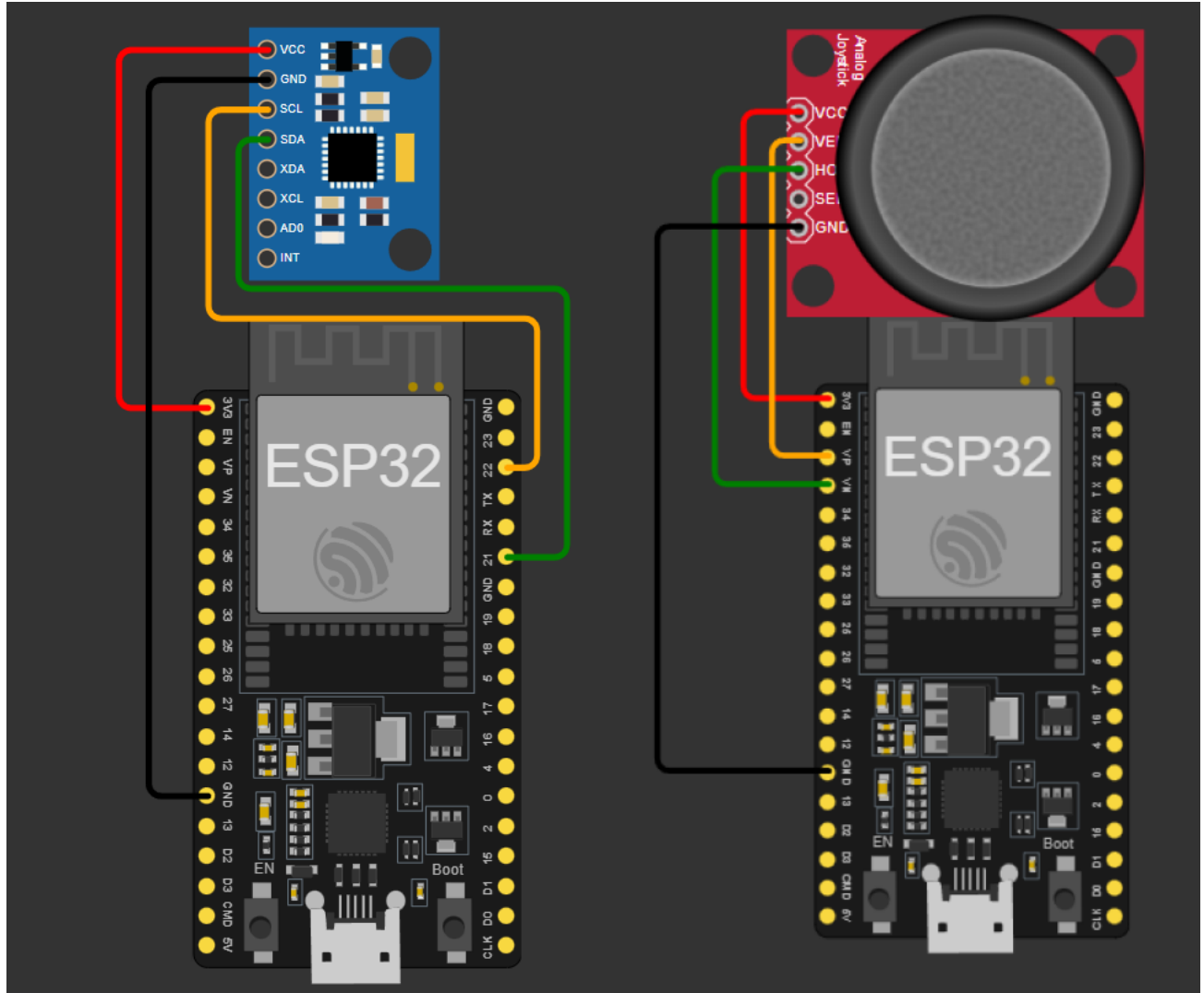
Nota: *La tabla presenta los parámetros del análisis de mallado y sus respectivas notas.*

6.3. Resultados de Simulación de Sistema de Control Alternativo

En la Figura 47 y ?? , los resultados de la simulación demostraron que el sistema es capaz de emular con precisión las señales del joystick, logrando un control suave. Así mismo la señal que el IMU enviaría en su conexión al microcontrolador, determinandose valores que se pueden establecer para que el sistema de control propuesto pueda tener la escalabilidad a una próxima implementación.

Figura 46

Simulación de Sistema de Control Alternativo.



Nota: Simulación de Modo IMU y Modo Joystick en Wookwi.

Figura 47

Valores de Simulación de Sistema de Control Alternativo.

```
Rotación en X: 40.00 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 94.99 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 130.00 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 144.99 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 144.99 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 144.99 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
Rotación en X: 144.99 deg/s, Y: 0.00 deg/s, Z: 0.00 deg/s
El Valor Suavizado en X es: 2048 (0 grados)
El Valor Suavizado en Y es: 4095 (90 grados)
El Valor Suavizado en X es: 2048 (0 grados)
El Valor Suavizado en Y es: 4095 (90 grados)
El Valor Suavizado en X es: 2048 (0 grados)
El Valor Suavizado en Y es: 4095 (90 grados)
El Valor Suavizado en X es: 2048 (0 grados)
```

Nota: Datos obtenidos de Modo IMU y Modo Joystick Respectivamente. Adquisición de 2 Ejes y de Manipulación de Joystick.

6.4. Resultados de la construcción de la silla de ruedas eléctrica TK1

Para la construcción del prototipo se utilizaron métodos tradicionales de manufactura. Estos métodos incluyen técnicas estándar de procesamiento y ensamblaje que aseguran la precisión y la calidad del prototipo final. En la Tabla 9 se detalla el proceso de manufactura empleado, incluyendo las fases específicas del trabajo, los materiales utilizados y las herramientas necesarias. Esta tabla proporciona una visión clara de cada etapa del proceso de fabricación, facilitando la comprensión de cómo se llevó a cabo la construcción del prototipo desde el diseño hasta su ensamblaje final.

Tabla 9*Procesos de Manufactura y Materiales por Subconjunto*

Subconjunto	Procesos de Manufactura	Materiales
Espaldar	Rolado, Soldadura, Taladrado, Corte Láser	Acero de Transmisión, Acero Estructural, Acero Negro
Asiento	Rolado, Soldadura, Taladrado, Corte Láser	Acero Estructural, Acero Negro
Estructura Diagonales	Soldadura, Taladrado	Acero Estructural
Estructura Frontal	Corte Láser, Soldadura	Acero Negro
Estructura de Reposapiés	Rolado, Soldadura, Taladrado, Corte Láser	Acero Estructural, Acero Negro
Acople Diagonal	Manufactura Aditiva	PLA

Nota: La tabla presenta los procesos de manufactura y los materiales utilizados para cada subconjunto de la silla de ruedas eléctrica plegable modelo TK1.

En la Figura 48 se observa el dispositivo finalizado, el cual se destaca por su peso de 34 kg. Esta imagen muestra el prototipo completo, evidenciando su diseño y características finales. El peso del dispositivo es un factor importante a considerar, ya que puede influir en su maniobrabilidad y en su aplicación práctica. La figura proporciona una visión clara del producto terminado, permitiendo una evaluación visual de su construcción y de las características físicas que se han logrado alcanzar en el proceso de fabricación.

Figura 48

Silla de ruedas eléctrica plegable TK1.



Nota: Producto final de modelo de silla de ruedas.

7. Conclusiones

- Para garantizar un diseño adecuado de la silla de ruedas, es indispensable considerar los datos de entrada. En este aspecto fundamental, es necesario tener en cuenta las medidas antropométricas, el peso del usuario y sus características únicas, asegurando que las condiciones de comodidad y funcionalidad se cumplan de manera óptima. Este enfoque permite personalizar el diseño de la silla para cada individuo, garantizando no solo su comodidad, sino también su seguridad y eficiencia en el uso diario.
- Mediante análisis detallados utilizando software de ingeniería como SolidWorks, garantizando la resistencia estructural necesaria para su uso seguro y duradero. La selección de materiales adecuados, como el acero ASTM A36, y la consideración de procesos de manufactura convencionales
- La propuesta de diseño del sistema de control mediante el protocolo de comunicación ESP-NOW permite integrar módulos inalámbricos como IMU MPU9250 o Joystick los cuales genera una asistencia a usuarios que poseen un limitante para interactuar y generar su movilidad con la silla de ruedas eléctrica
- La silla de ruedas puede ser construida con materiales locales, utilizando tecnologías de manufactura que permiten obtener la geometría y la forma necesarias. Posteriormente, el dispositivo puede ser ensamblado sin ningún inconveniente, asegurando un proceso de fabricación eficiente y accesible.

8. Recomendaciones

- Se recomienda revisar periódicamente los rodamientos de las ruedas con el fin de eliminar impurezas para asegurar un manejo óptimo de la silla.
- Se recomienda lubricar el punto de unión entre el asiento y la estructura diagonal con el fin de reducir la fricción durante el plegado de la estructura.
- Se recomienda realizar el cambio del caucho de las ruedas motorizadas para evitar el deslizamiento del dispositivo y garantizar la seguridad del usuario.
- Se recomienda cambiar las baterías para mejorar el tiempo de uso de la silla de ruedas.

- Se recomienda realizar el cambio del caucho de las ruedas motorizadas para evitar el deslizamiento de la estructura y garantizar la seguridad del usuario.

Referencias

- Barragán Téllez, D. E., Elvira Cabrera, L. A., Gallegos Muñoz, D. N., Martínez Maldonado, J. J., Pavón Casas, F. A., y Pérez Gonzaga, R. D. (2017). Acoplamiento para silla de ruedas.
- Barrientos Martínez, F. J., Sánchez Cruz, J. I., y Sánchez García, J. F. (2016). Diseño de una silla de ruedas de cambios posturales y posiciones básicas para personas cuadripléjicas. *Revista de Ingeniería*.
- Beer, F. P., y Johnston, E. R. J. (2014). *Mecánica de materiales* (7.^a ed.). México: McGraw-Hill.
- Bruno, S., José, M., Filomena, S., Vítor, C., Demétrio, M., y Karolina, B. (2016). The conceptual design of a mechatronic system to handle bedridden elderly individuals. *Sensors*, 16(5), 725.
- Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2021). *Mechanical engineering design* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Carmenate Milián, L., Moncada Chávez, F. A., y Borjas Leiva, E. W. (2014). Manual de medidas antropométricas.
- Castanier Muñoz, D. M., y Mendía Idrovo, E. V. (2018). *Diseño, construcción e implementación de una silla de ruedas eléctrica plegable para una persona con problemas de movilidad* (Tesis de Master, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador). Descargado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16102> (Director de Tesis: Calle Sigüencia, John Ignacio)
- Control 3D. (2021). *Ficha técnica del pla (Ácido poliláctico)*. Ficha Técnica. Descargado 2023-09-13, de <https://control3d.net/wp-content/uploads/2021/11/FICHA-TECNICA-FILAMENTO-BASICO-CONTROL3D.pdf> (Información adicional relevante sobre el PLA)
- Cujano Ayala, J. (2013). *Implementación de un sistema de control para el manejo automático de una silla de ruedas* (Tesis de Master no publicada). Universidad César Vallejo.
- Daniel, V. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de control de una silla de ruedas haciendo uso del movimiento de cabeza, para personas con cuadriplejía* (Tesis de Master no publicada). Quito.
- Dipac. (2022). *Catálogo actualizado julio*. Descargado de <https://dipacmanta.com/wp-content/uploads/2024/05/Catalogo-General-de-Productos-2024.pdf> (Consultado el: 22 de noviembre 2023)
- EMED. (2023). *Catálogo de sillas de ruedas eléctricas*. Descargado de <https://emed.pe/>

categoria-producto/silla-de-ruedas/silla-de-ruedas-electrica/ (Consultado el: 1 de julio 2024)

- Evelyn, P. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de control de la linealidad de la trayectoria de una silla de ruedas manejada mediante comandos de voz, para personas cuádruplégicas* (B.S. thesis). Quito, 2019.
- Fernando, S. L., René, T. C., Guillermo, U. S., y Beatríz, R. (2011). Rediseño para la optimización de una silla de ruedas eléctrica de dos posiciones. *Instituto Politécnico Nacional, Sección de estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, Zacatenco.*
- Fernando, U. (2016). *Características antropométricas de personas con discapacidad móvil inferior y su incidencia en el diseño de una silla de ruedas* (Tesis de Master no publicada). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas.
- Fuentes Tapia, J. E., y cols. (2022). *Diseño de una silla de ruedas con bipedestación para personas con movilidad reducida* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería.
- Gama Marquez, A. (2016). Conceptos antropométricos básicos. *Universidad Autónoma del Estado de México.*
- Golden Motor. (2024). *Golden motor products*. Descargado de <https://www.goldenmotor.com> (Consultado el: 1 de agosto de 2024)
- Hernández Vilema, J. F., y Verdugo Ibarra, H. D. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo de elevador de acceso para personas con movilidad reducida en buses de transporte urbano* (Tesis de Master no publicada). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Hibbeler, R. (2016). *Engineering mechanics: Statics* (14th ed.). New York: Pearson.
- I Permobil. (2020). *What are the measurements that i need to take?* Descargado de <https://hub.permobil.com/wheeled-mobility-101> (Consultado el: 3 de agosto de 2023)
- Ideas, O. G. (2023). *Materiales para sillas y andadores: ¿cuál es el adecuado para ti?* Descargado de <https://www.orthoglobalideas.com/explorando-los-diferentes-materiales-en-dispositivos-de-asistencia-sillas-activas-andadores-y-bastones/> (Consultado el: 1 de julio 2024)
- INEN. (2016). *Tubos de acero al carbono soldados para aplicaciones estructurales y usos generales*. NTE INEN 2415. Descargado 2023-09-13, de <https://www.normalizacion.gob.ec/#> (Normativa ecuatoriana sobre propiedades del acero estructural)
- Medical, S. (2024). *Manual wheelchairs*. Descargado de <https://www.sunrisemedical.com/>

manual-wheelchairs/quickie (Consultado el: 3 de agosto 2023)

Mott, R. L., Vavrek, E. M., y Wang, J. (2024). *Machine elements in mechanical design* (Sixth ed.). New York: Pearson. (University of Dayton, Purdue University, Texas A&M University)

Médica, E. (2023).

ANEXOS

Anexo 1: Componentes que conforman la silla

Tabla 10

Componentes de la silla de ruedas eléctrica

Subsistema	No	Elemento	Descripción
Sist. Mec	1	Reposa Brazos	Se encarga de dar apoyo a los brazos del usuario
Sist. Mec	2	Espaldar	Se encarga de dar apoyo a la parte superior del usuario
Sist. Mec	3	Asiento	Se encarga de soportar todo el peso del usuario
Sist. Mec	4	Estructura de diagonales	Soporta todo el peso de la silla
Sist. Mec	5	Reposa Pies	Se encarga de dar soporte a los pies del usuario
Sist. Mec	6	Placa de acople reposabrazos	La unión entre el reposabrazos y el espaldar
Sist. Mec	7	Estructura Frontal	Permite unir las ruedas frontales con la estructura
Sist. Mec	8	Acople Diagonal	La base del mecanismo de plegado
Sist. Mec	9	Seguro	Bloquea el mecanismo de plegado
Sist. Mec	10	Palanca de plegado	Genera el movimiento de plegado de la silla
Sist. Mec	11	Soporte Medio	Se encarga de habilitar el plegado de la silla
Sist. Mec	12	Ruedas Frontales	Permite el movimiento de la silla
Sist. Elec	13	Joystick o Controlador	Es la interfaz del usuario con la silla para controlar la silla
Sist. Elec	14	Batería	Es la fuente de alimentación del sistema electrónico
Sist. Elec	15	Ruedas Motorizadas	Son los actuadores de la silla para generar el movimiento
Sist. Elec	16	Unidad de control	Es la unión entre el control y la potencia de la silla
Sist. Elec	17	Cableado	Permite la transmisión de las señales
Sist. Asis	18	Tapizado	Accesorio
Sist. Asis	19	Cojín Asiento	Accesorio
Sist. Asis	20	Cojín Espaldar	Accesorio
Sist. Asis	21	Red de Espaldar	Accesorio

Nota: La tabla presenta los subsistemas que conforman la silla, así como cada elemento del subsistema, entre estos el Sistema Mecánico, Sistema Electrónico y Sistema de Asistencia.

Anexo 2:

Figura 49

Distribución de la masa del cuerpo.

Body Segment	Relative Mass	Individual Member Mass (kg)	Combined Mass (kg)
Head and neck	8.1%	12.6	12.6
Arm	5.6%	4.3	8.7
Forearm	3.2%	2.5	5
Hand	1.2%	0.9	1.9
Thorax	21.6%	33.5	33.5
Abdomen	13.9%	21.5	21.5
Pelvis	14.2%	22	22
Thigh	20%	15.5	31
Leg	9.3%	7.2	14.4
Foot	2.9%	2.2	4.5
		Total mass:	155

Nota: Según Bruno y cols. (2016).

Anexo 3:

Figura 50

Propiedades mecánicas de los materiales.

(Unidades del SI)






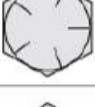
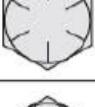

Material	Densidad kg/m ³	Resistencia última			Resistencia a la cedencia ³		Módulo de elasticidad, GPa	Módulo de rigidez, GPa	Coeficiente de expansión térmica, 10 ⁻⁶ /°C	Ductilidad, porcentaje de elongación en 50 mm
		Tensión, MPa	Compresión, ² MPa	Cortante, MPa	Tensión, MPa	Cortante, MPa				
Acero										
Estructural (ASTM-A36)	7 860	400			250	145	200	77.2	11.7	21
Alta resistencia-baja aleación										
ASTM-A709 Grado 345	7 860	450			345		200	77.2	11.7	21
ASTM-A913 Grado 450	7 860	550			450		200	77.2	11.7	17
ASTM-A992 Grado 345	7 860	450			345		200	77.2	11.7	21
Templado										
ASTM-A709 Grado 690	7 860	760			690		200	77.2	11.7	18
Inoxidable, AISI 302										
Laminado en frío	7 920	860			520		190	75	17.3	12
Recocido	7 920	655			260	150	190	75	17.3	50
Acero de refuerzo										
Resistencia media	7 860	480			275		200	77	11.7	
Alta resistencia	7 860	620			415		200	77	11.7	
Hierro fundido										
Hierro fundido gris 4.5% C, ASTM A-48	7 200	170	655	240			69	28	12.1	0.5
Hierro fundido maleable 2% C, 1% Si, ASTM A-47	7 300	345	620	330	230		165	65	12.1	10
Aluminio										
Aleación 1100-H14 (99% Al)	2 710	110		70	95	55	70	26	23.6	9
Aleación 2014-T6	2 800	455		275	400	230	75	27	23.0	13
Aleación 2024-T4	2 800	470		280	325		73		23.2	19
Aleación 5456-H116	2 630	315		185	230	130	72		23.9	16
Aleación 6061-T6	2 710	260		165	240	140	70	26	23.6	17
Aleación 7075-T6	2 800	570		330	500		72	28	23.6	11
Cobre										
Cobre libre de oxígeno (99.9% Cu)										
Recocido	8 910	220		150	70		120	44	16.9	45
Endurecido	8 910	390		200	265		120	44	16.9	4
Latón amarillo (65% Cu, 35% Zn)										
Laminado en frío	8 470	510		300	410	250	105	39	20.9	8
Recocido	8 470	320		220	100	60	105	39	20.9	65
Latón rojo (85% Cu, 15% Zn)										
Laminado en frío	8 740	585		320	435		120	44	18.7	3
Recocido	8 740	270		210	70		120	44	18.7	48
Estaño bronce (88 Cu, 8Sn, 4Zn)	8 800	310			145		95		18.0	30
Manganeso bronce (63 Cu, 25 Zn, 6 Al, 3 Mn, 3 Fe)	8 360	655			330		105		21.6	20
Aluminio bronce (81 Cu, 4 Ni, 4 Fe, 11 Al)	8 330	620	900		275		110	42	16.2	6

Nota: Según Beer y Johnston (2014).

Anexo 4:

Figura 51

Propiedades mecánicas de los pernos.

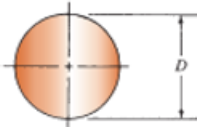
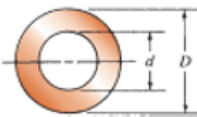
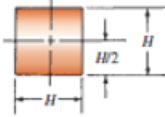
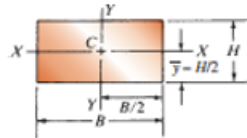
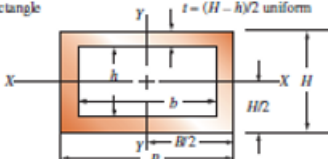
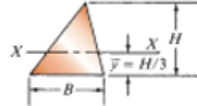
Grado SAE núm.	Rango de tamaño inclusive, in	Resistencia de prueba mínima,* ksi	Resistencia a la tracción mínima,* ksi	Límite elástico mínimo,* ksi	Material	Marcado de la cabeza
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Carbono medio o bajo	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	55 33	74 60	57 36	Carbono medio o bajo	
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Carbono medio, estirado en frío	
5	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Carbono medio, Q&T	
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Martensita baja en carbono, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Aleación de carbono medio, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Aleación de carbono medio, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Martensita baja en carbono, Q&T	

Nota: Según Budynas y Nisbett (2021).

Anexo 5:

Figura 52

Propiedades geométricas.

	A = area I = moment of inertia S = section modulus	r = radius of gyration = $\sqrt{I/A}$ J = polar moment of inertia Z_p = polar section modulus
(a) Circle		$A = \pi D^2/4$ $I = \pi D^4/64$ $S = \pi D^3/32$ $r = D/4$ $J = \pi D^4/32$ $Z_p = \pi D^3/16$
(b) Hollow circle (tube)		$A = \pi(D^2 - d^2)/4$ $I = \pi(D^4 - d^4)/64$ $S = \pi(D^4 - d^4)/32D$ $r = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4}$ $J = \pi(D^4 - d^4)/32$ $Z_p = \pi(D^4 - d^4)/16D$
(c) Square		$A = H^2$ $I = H^4/12$ $S = H^3/6$ $r = H/\sqrt{12}$
(d) Rectangle		$A = BH$ $I_x = BH^3/12$ $I_y = HB^3/12$ $S_x = BH^2/6$ $S_y = HB^2/6$ $r_x = H/\sqrt{12}$ $r_y = B/\sqrt{12}$
(e) Hollow rectangle		$A = BH - bh$ $I_x = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$ $I_y = \frac{HB^3 - hb^3}{12}$ $S_x = \frac{BH^2 - bh^2}{6H}$ $S_y = \frac{HB^2 - hb^2}{6B}$ $r_x = 0.289 \sqrt{\frac{BH^3 - bh^3}{BH - bh}}$ $r_y = 0.289 \sqrt{\frac{HB^3 - hb^3}{HB - hb}}$
(f) Triangle		$A = BH/2$ $I = BH^3/36$ $S = BH^2/24$ $r = H/\sqrt{18}$

Nota: Según Mott, Vavrek, y Wang (2024).

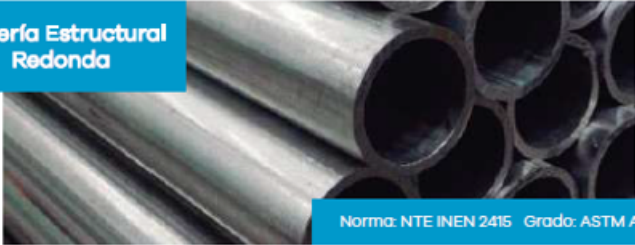
Anexo 6:

Figura 53

Catálogo de tubería estructural redonda.

Tuberías Metálicas ACEROCENTER

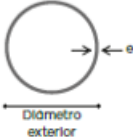
Tubería Estructural Redonda



Norma: NTE INEN 2415 Grado: ASTM A500

Descripción

Tubería redonda estructural, se la utiliza para postes de luz, manijas para carretillas, estructuras para letreros, montaje de estructuras, herrería, columnas, galpones, invernaderos, naves industriales, carrocería, guardachoques, etc.



Recubrimiento: Negro/Galvanizado
Longitud: 6 metros

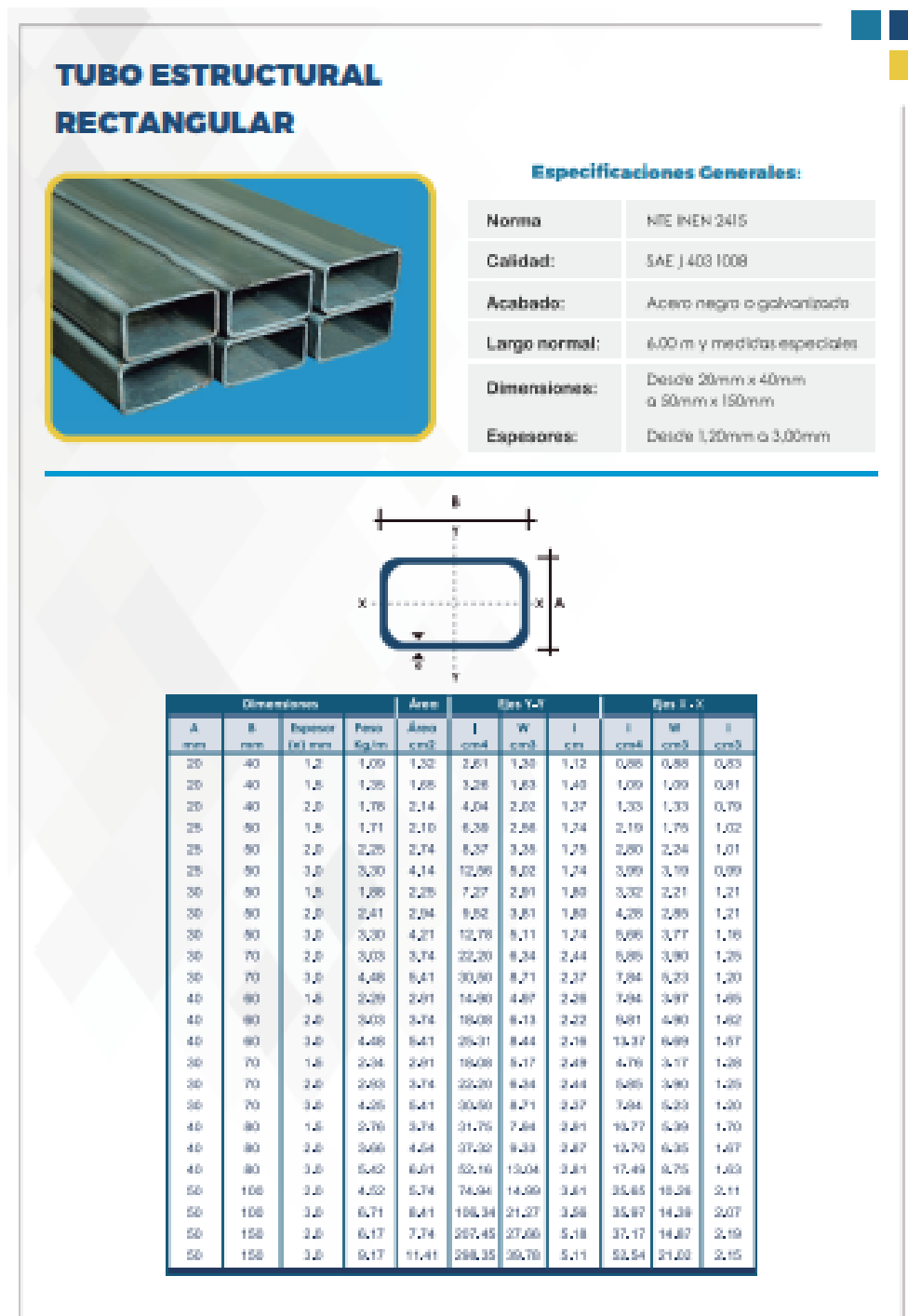
Denominación (pulg.)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (e) (mm)	Peso (kg/m)
3/4	19.10	1.40	0.61
		1.50	0.65
		1.80	0.77
		2.00	0.84
7/8	22.20	1.40	0.72
		1.50	0.77
		1.80	0.91
		2.00	1.00
1	25.40	1.40	0.83
		1.50	0.88
		1.80	1.05
		2.00	1.15
1 1/4	31.80	1.40	1.05
		1.50	1.12
		1.80	1.33
		2.00	1.47
1 1/2	38.10	1.40	1.27
		1.50	1.35
		1.80	1.61
		2.00	1.78

Nota: Según Dipac (2022).

Anexo 7:

Figura 54

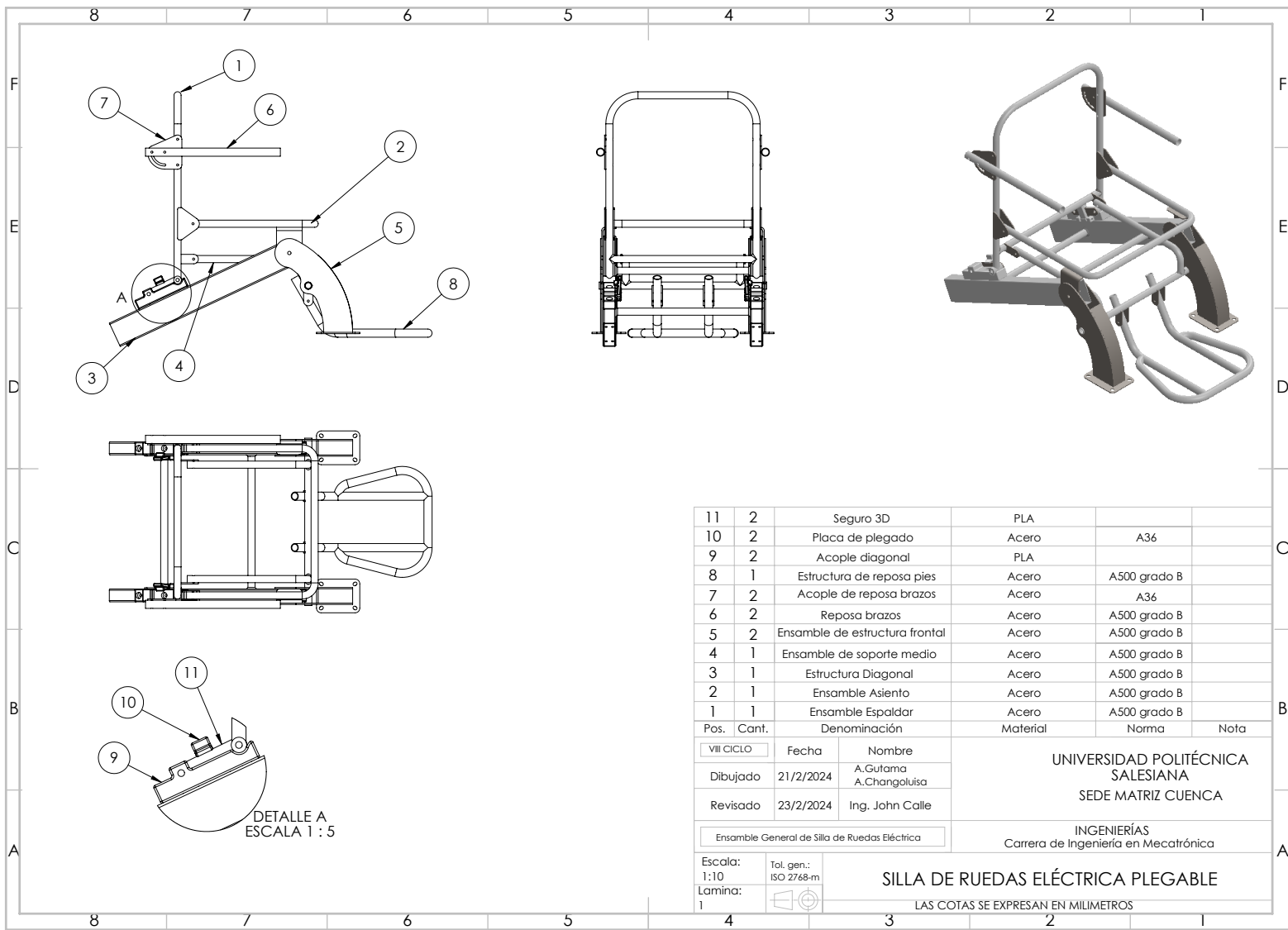
Catálogo de tubería estructural rectangular.



Tubería

Nota: Según Dipac (2022).

Anexo 8: Planos de la Silla

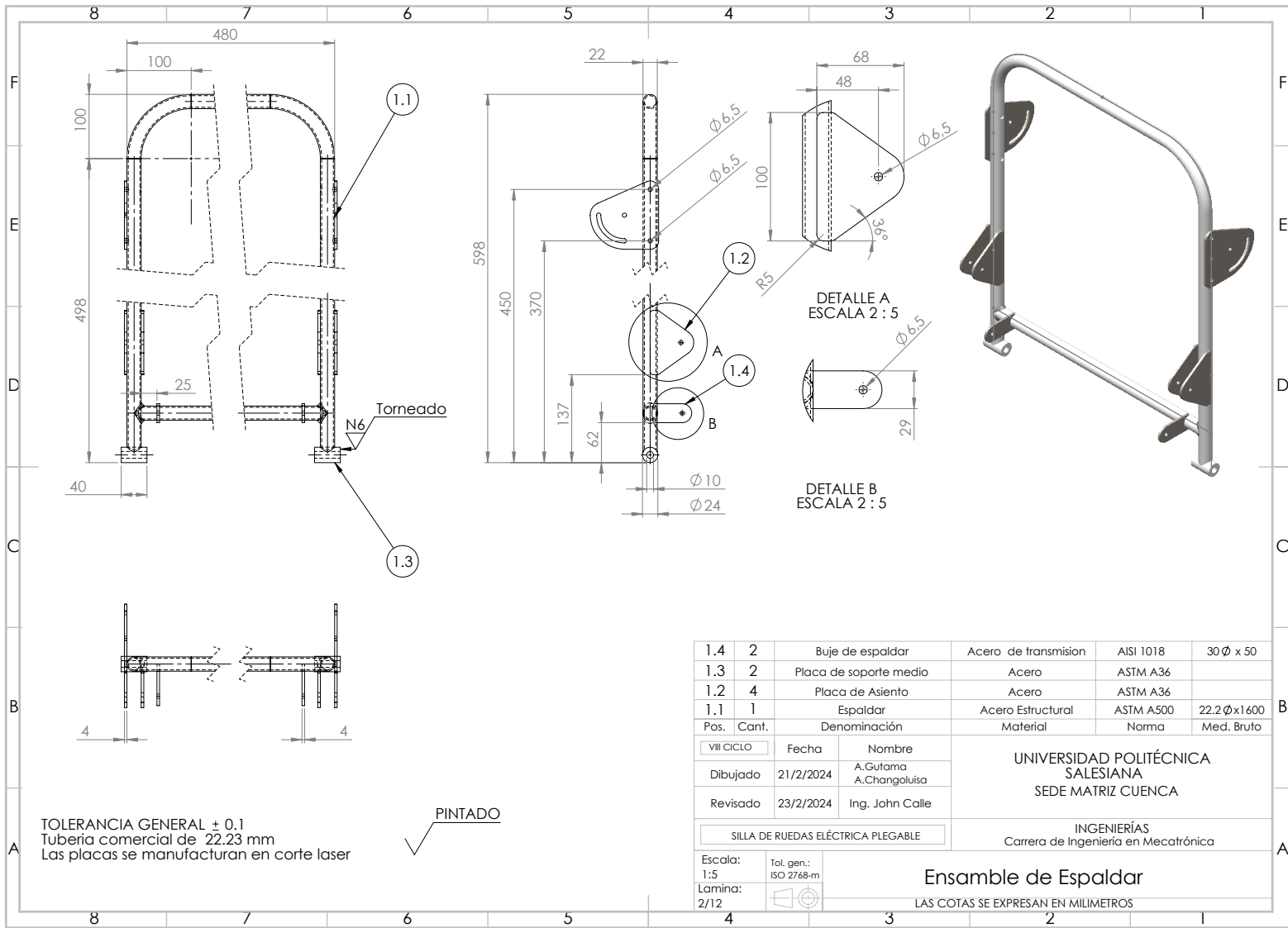


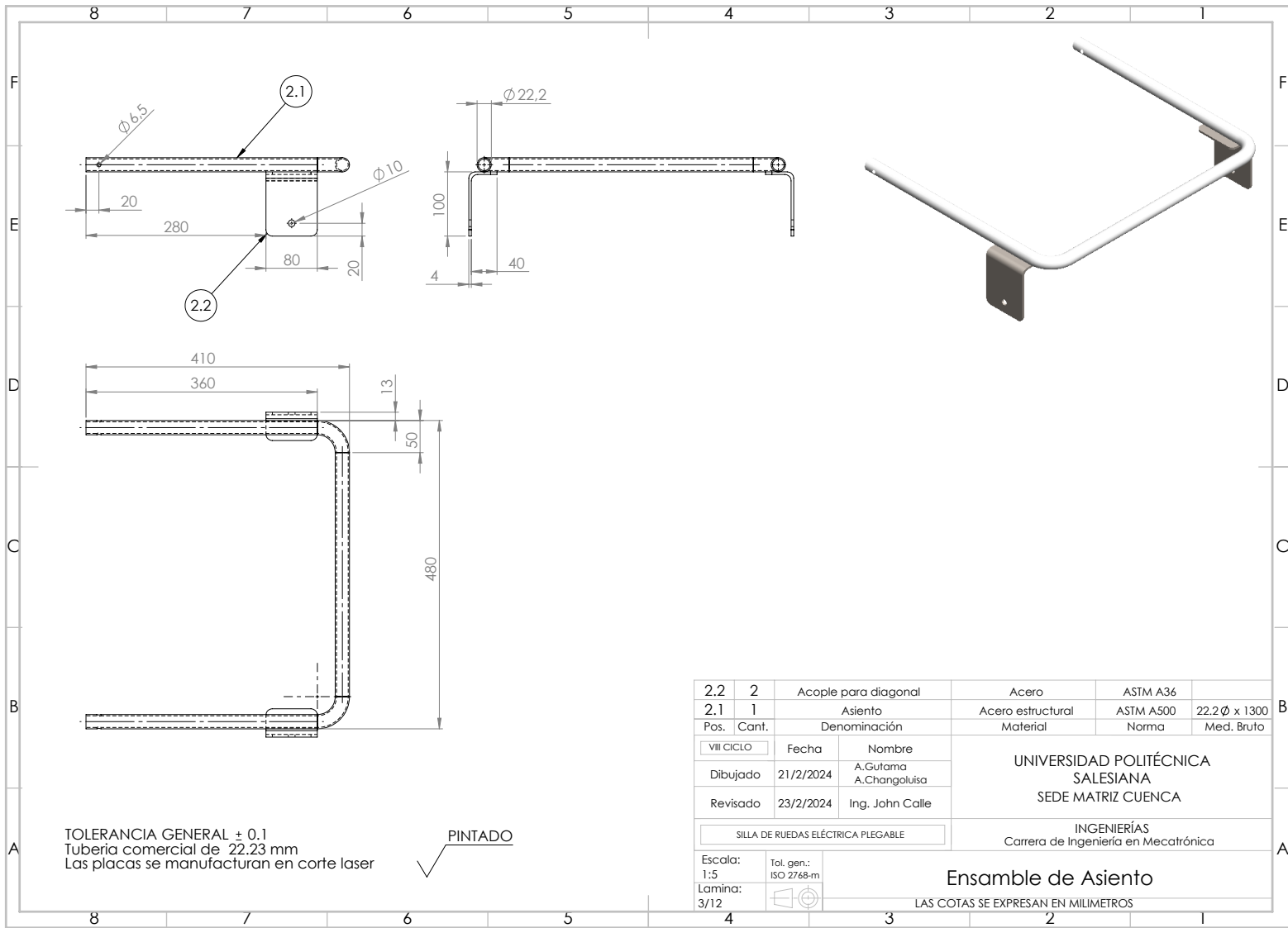
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Nota
11	2	Seguro 3D	PLA		
10	2	Placa de plegado	Acero	A36	
9	2	Acople diagonal	PLA		
8	1	Estructura de reposa pies	Acero	A500 grado B	
7	2	Acople de reposa brazos	Acero	A36	
6	2	Reposa brazos	Acero	A500 grado B	
5	2	Ensamble de estructura frontal	Acero	A500 grado B	
4	1	Ensamble de soporte medio	Acero	A500 grado B	
3	1	Estructura Diagonal	Acero	A500 grado B	
2	1	Ensamble Asiento	Acero	A500 grado B	
1	1	Ensamble Espaldar	Acero	A500 grado B	

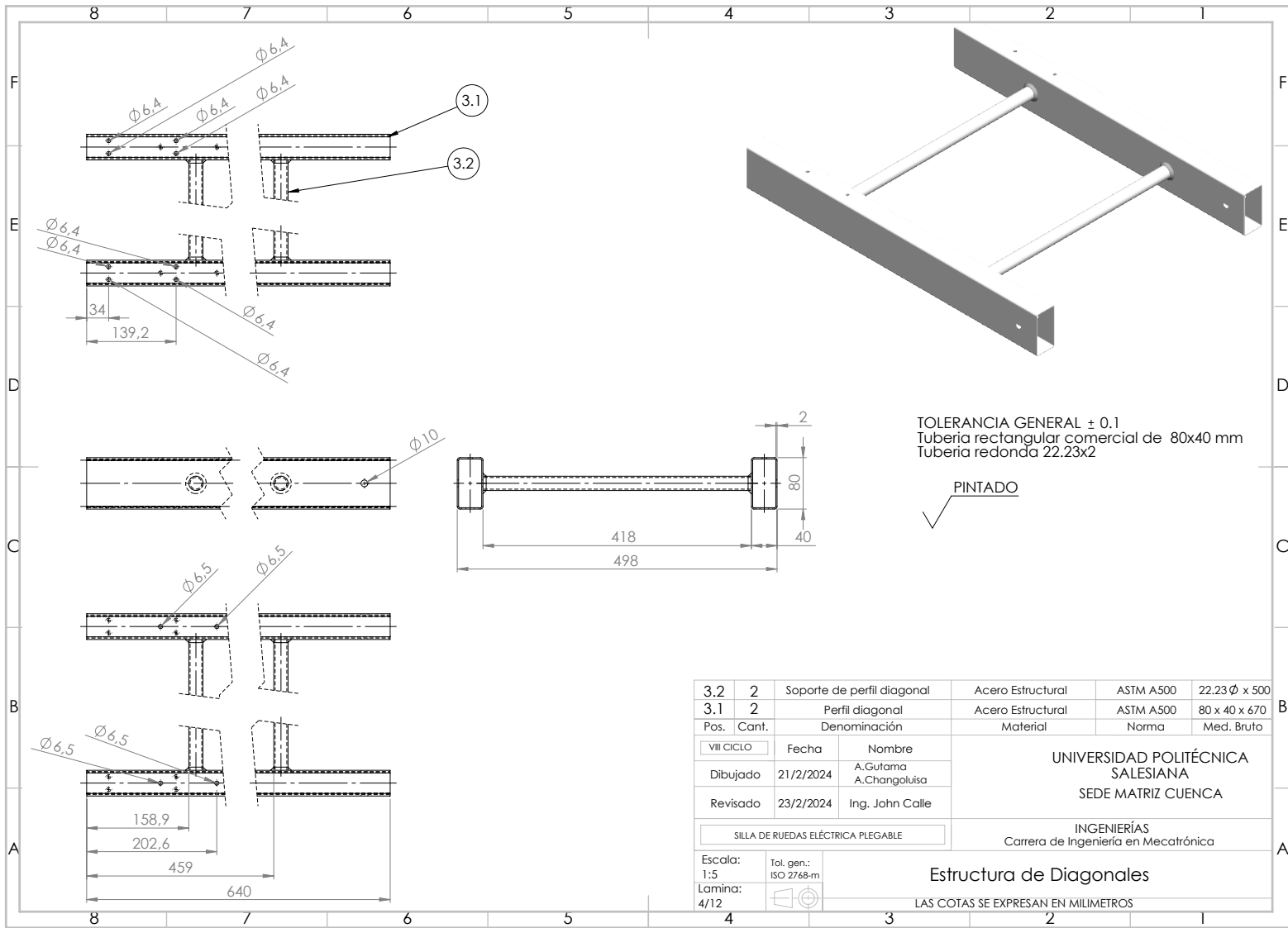
VIII CICLO	Fecha	Nombre
Dibujado	21/2/2024	A.Gutama A.Changoluisa
Revisado	23/2/2024	Ing. John Calle

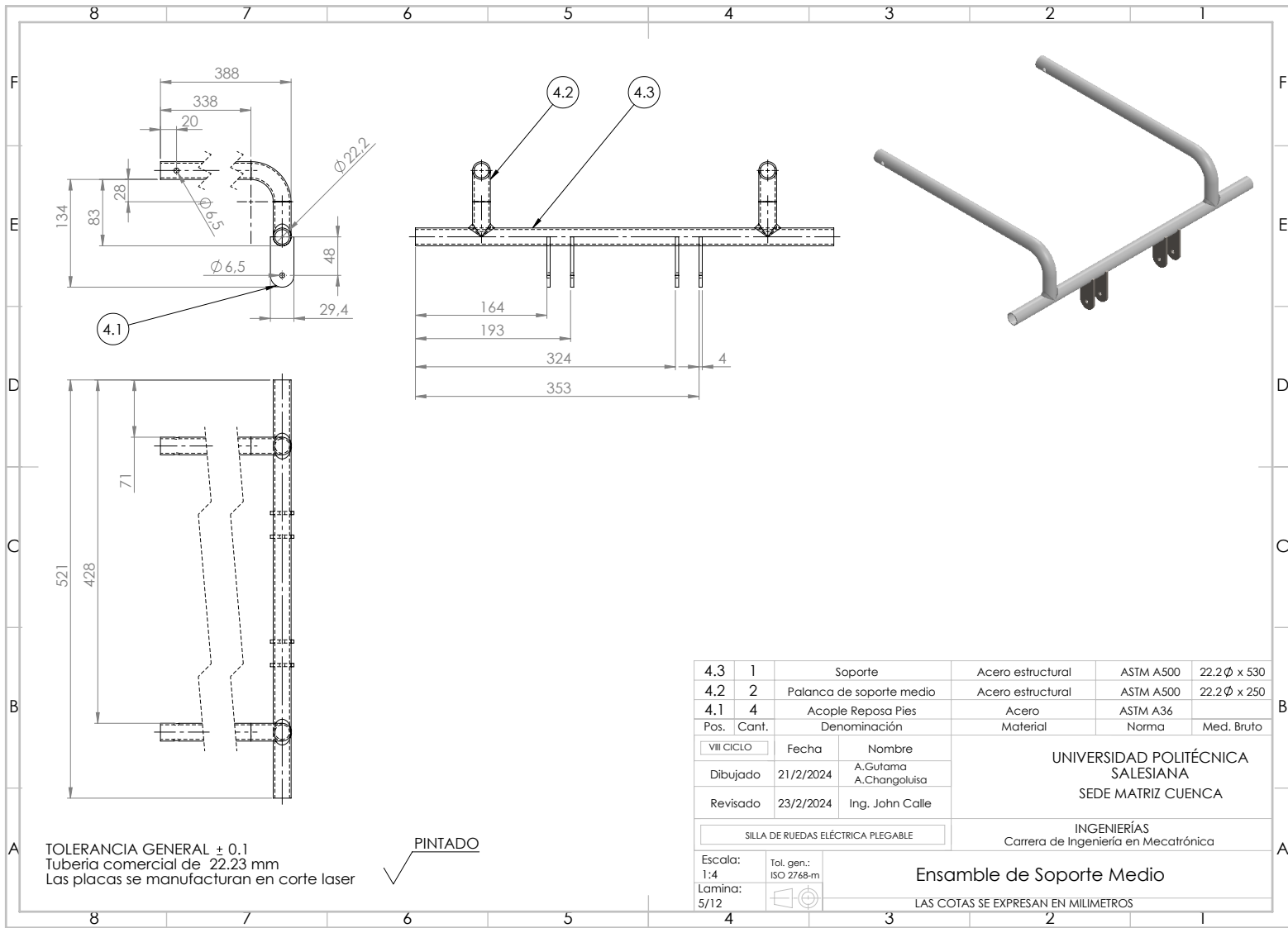
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE MATRIZ CUENCA
 INGENIERÍAS
 Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

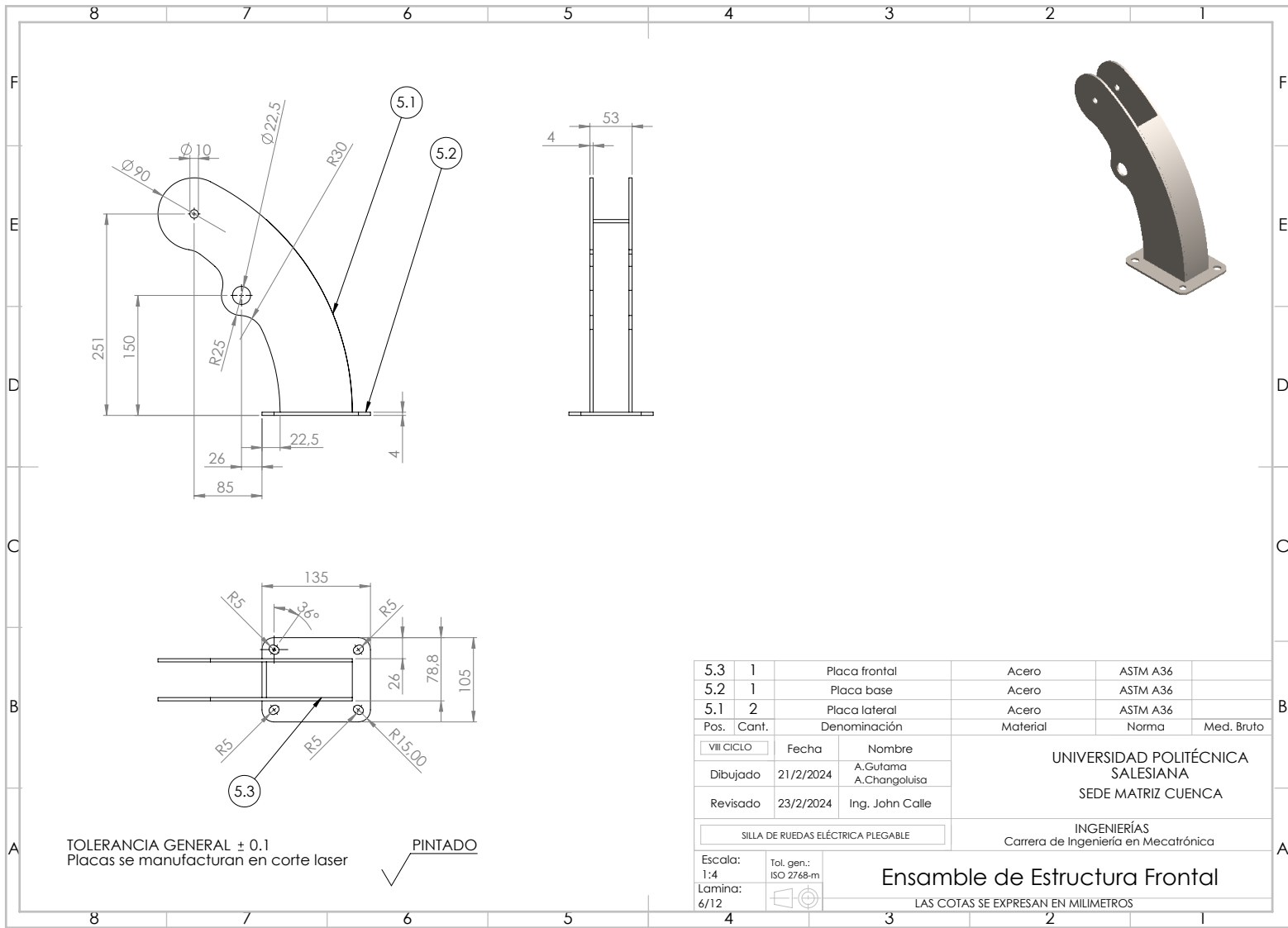
Ensamble General de Silla de Ruedas Eléctrica	
Escala: 1:10	Tol. gen.: ISO 2768-m
SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PLEGABLE	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS	

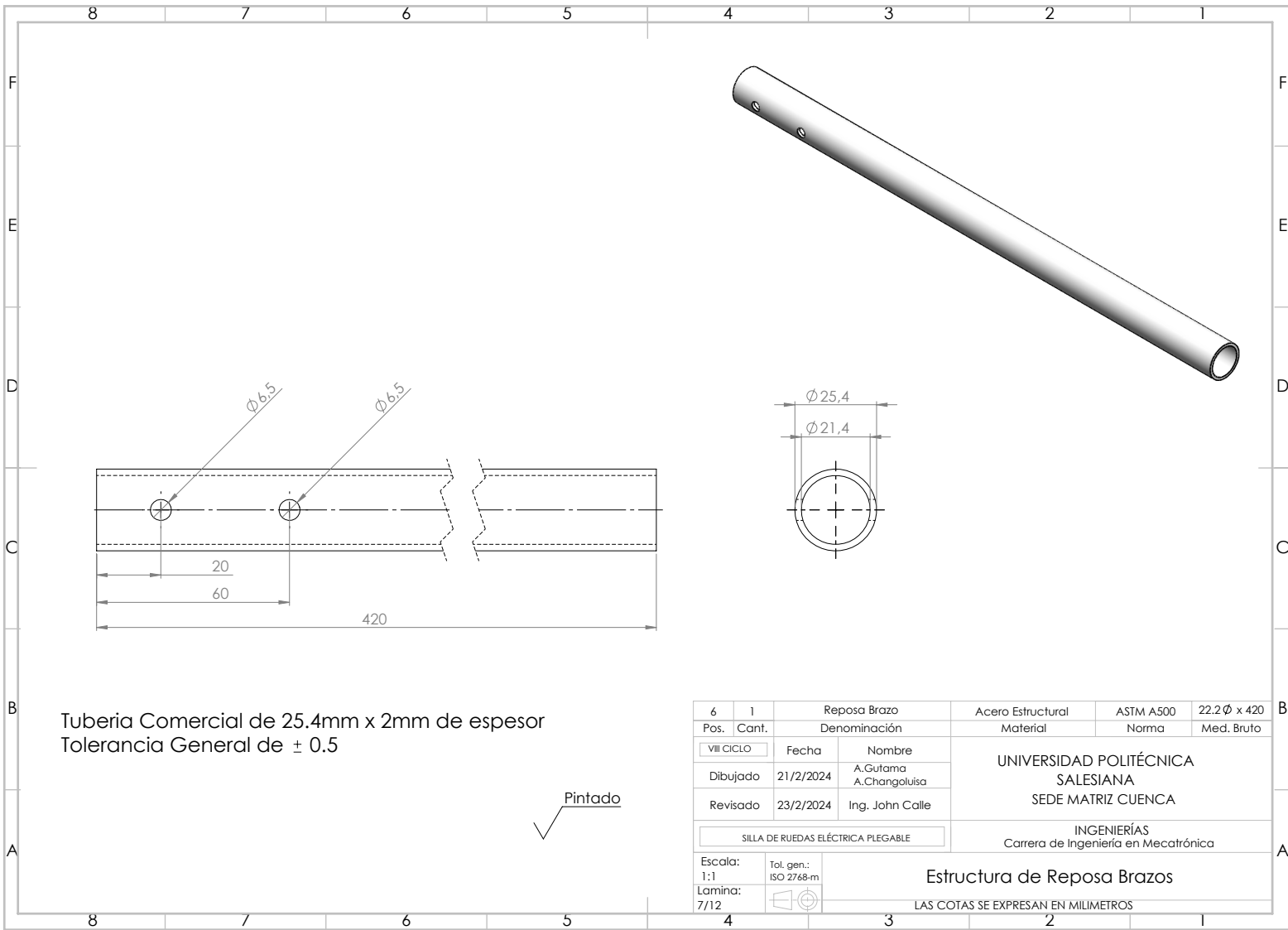








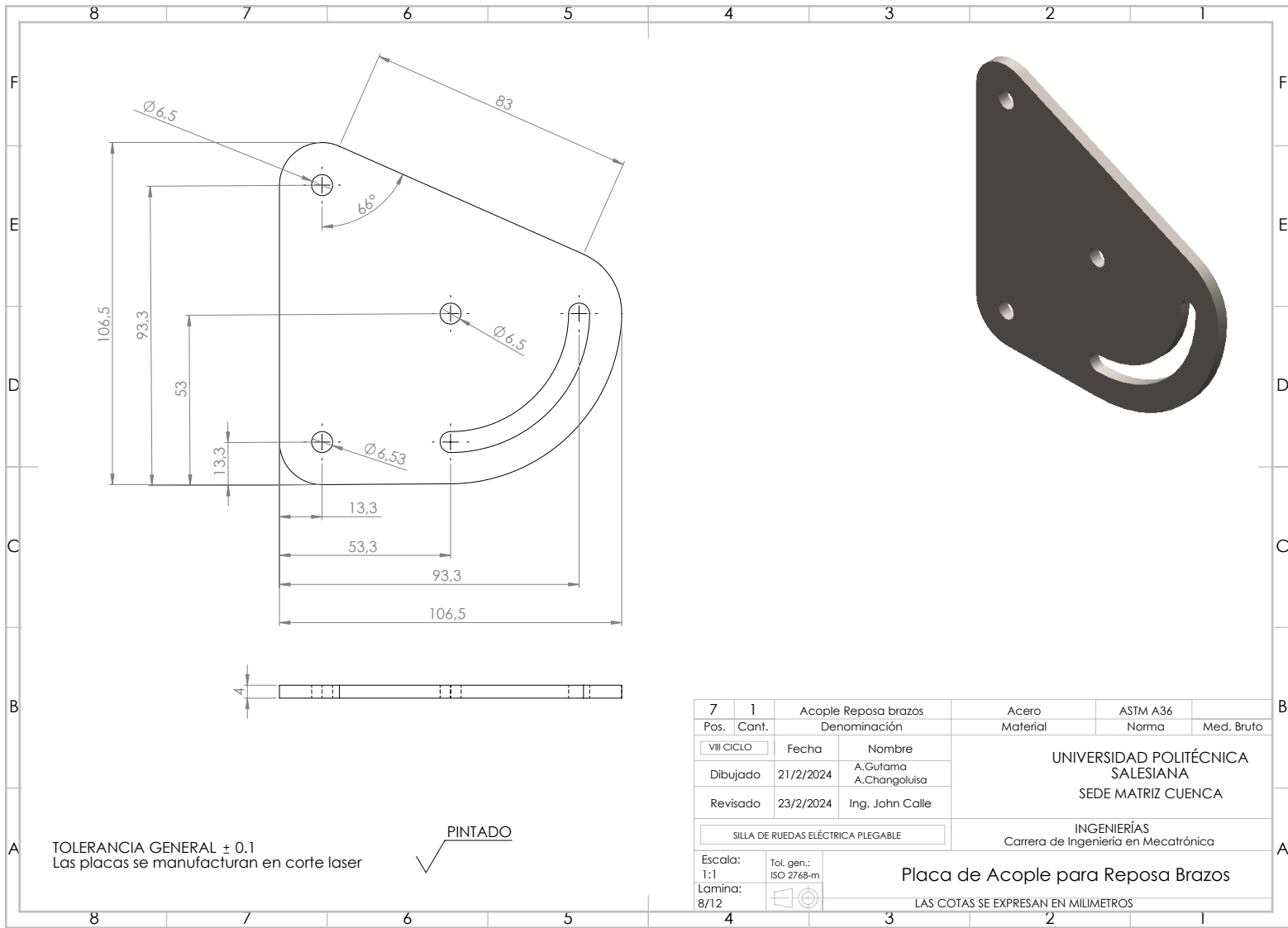




Tubería Comercial de 25.4mm x 2mm de espesor
Tolerancia General de ± 0.5

✓ Pintado

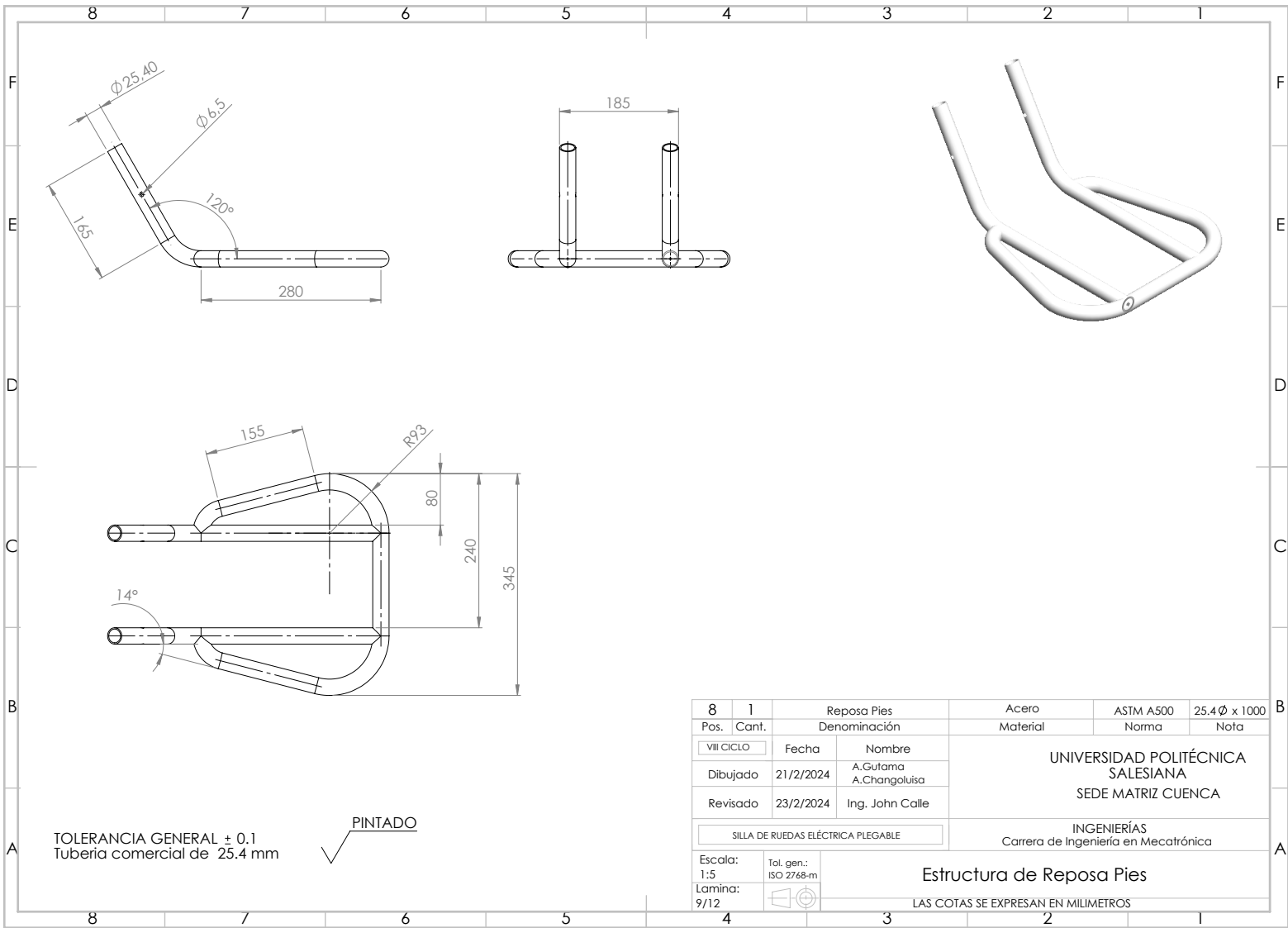
6	1	Reposa Brazo	Acero Estructural	ASTM A500	22.2 ϕ x 420
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Med. Bruto
VIII CICLO	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería en Mecatrónica		
Dibujado	21/2/2024	A.Gutoma A.Changoluisa			
Revisado	23/2/2024	Ing. John Calle			
SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PLEGABLE					
Escala:	Tol. gen.:	Estructura de Reposa Brazos			
1:1	ISO 2768-m				
Lamina:					
7/12		LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS			



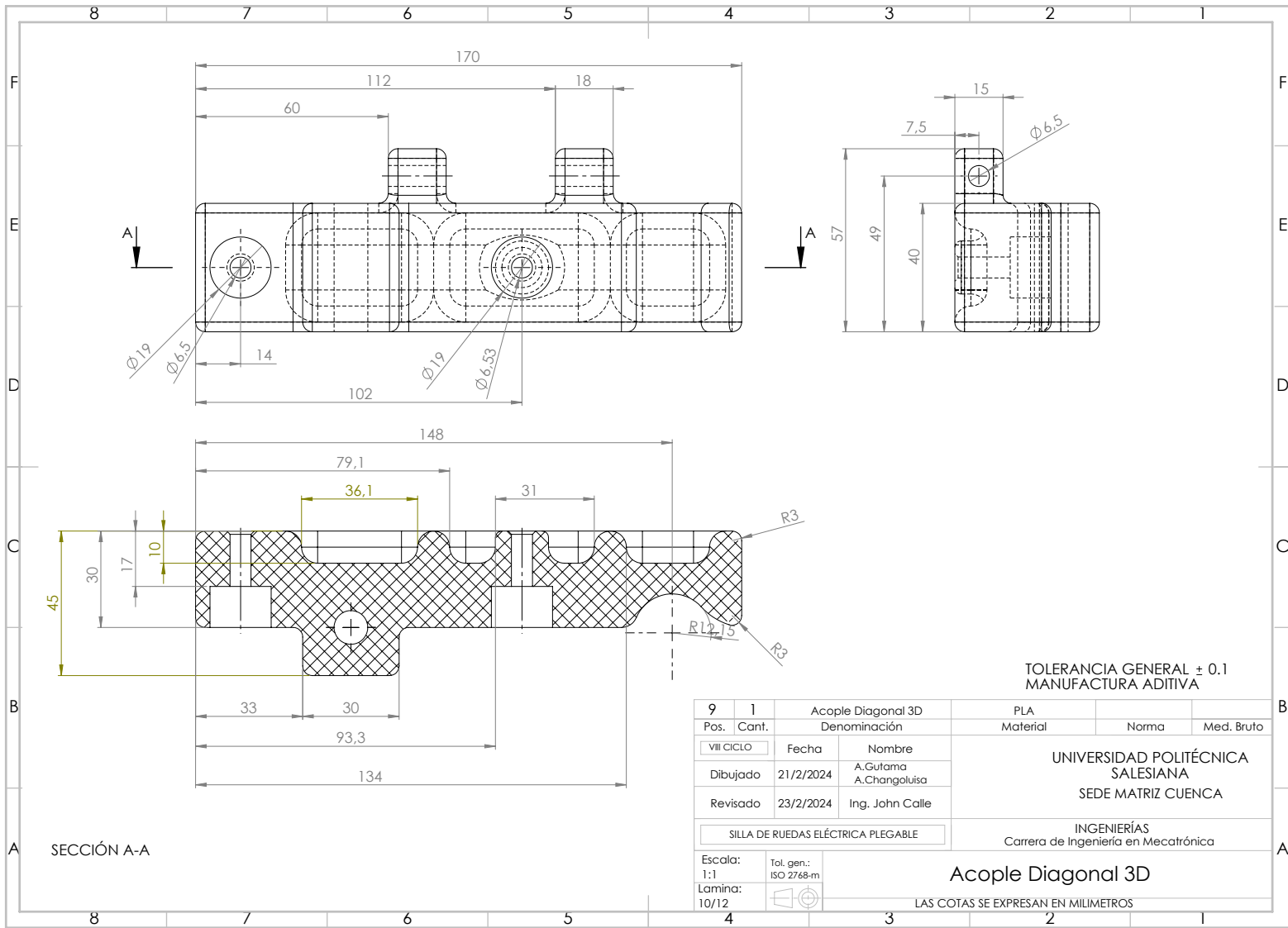
TOLERANCIA GENERAL ± 0.1
Las placas se manufacturan en corte laser

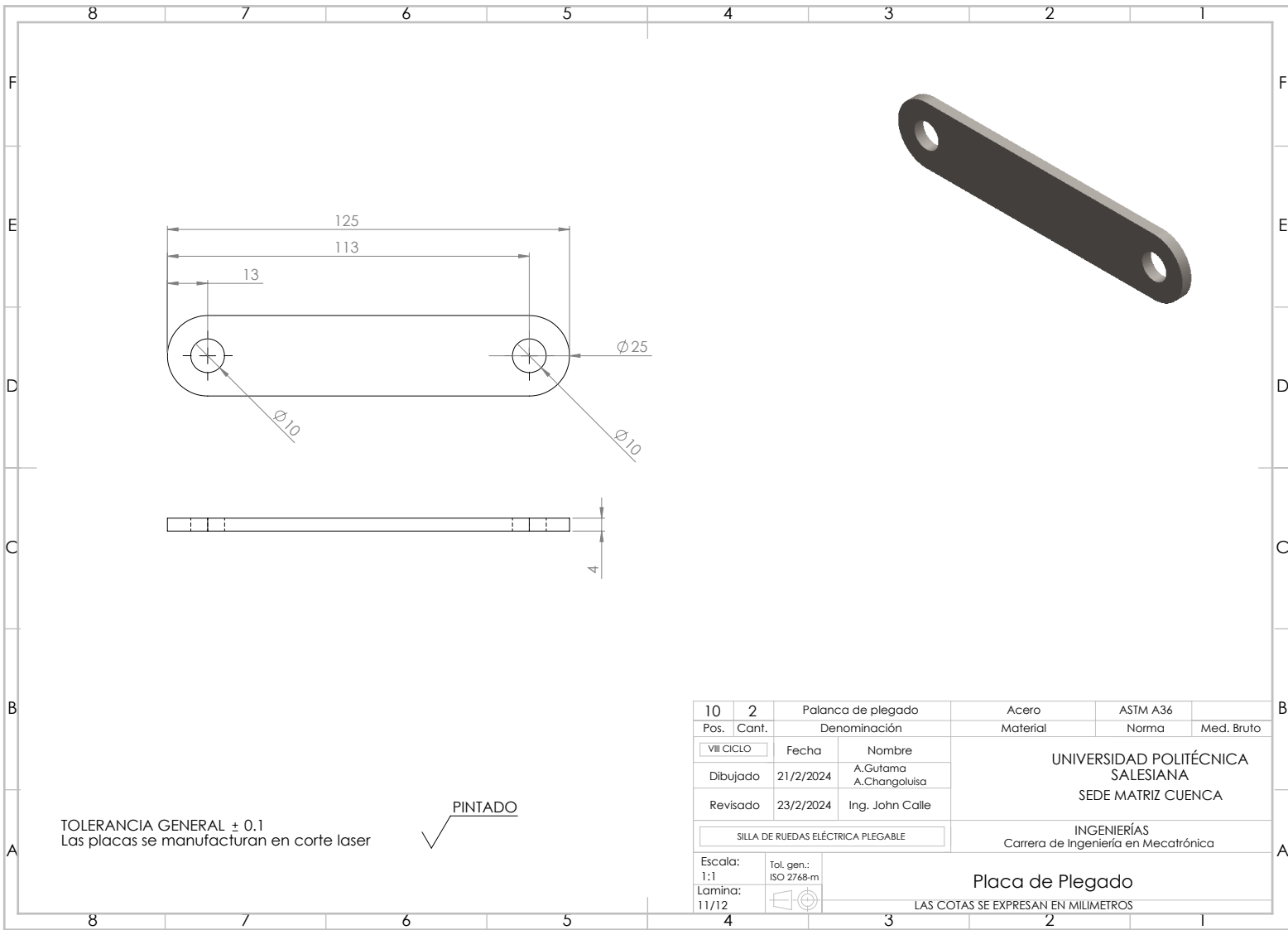
PINTADO

7	1	Acople Reposa brazos	Acero	ASTM A36	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Med. Bruto
VIII CICLO	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería en Mecatrónica		
Dibujado	21/2/2024	A.Gutama A.Changoluisa			
Revisado	23/2/2024	Ing. John Calle			
SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PLEGABLE					
Escala:	Tol. gen.:	Placa de Acople para Reposo Brazos			
1:1	ISO 2768-m				
Lamina:					
8/12		LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS			



8	1	Reposa Pies	Acero	ASTM A500	25.4 ϕ x 1000
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Norma	Nota
VIII CICLO	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería en Mecatrónica		
Dibujado	21/2/2024	A.Gutoma A.Changoluisa			
Revisado	23/2/2024	Ing. John Calle			
SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PLEGABLE					
Escala: 1:5	Tol. gen.: ISO 2768-m	Estructura de Reposa Pies			
Lamina: 9/12					
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS					





TOLERANCIA GENERAL ± 0.1
Las placas se manufacturan en corte laser

PINTADO

10	2	Palanca de plegado		Acero	ASTM A36	
Pos.	Cant.	Denominación		Material	Norma	Med. Bruto
VIII CICLO	Fecha	Nombre		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería en Mecatrónica		
Dibujado	21/2/2024	A.Gutoma A.Changoluisa				
Revisado	23/2/2024	Ing. John Calle				
SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA PLEGABLE						
Escala:	Tol. gen.:	Placa de Plegado				
1:1	ISO 2768-m					
Lamina:						
11/12		LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS				

