



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ÓRTESIS MECATRÓNICA PARA ASISTENCIA EN LA EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PACIENTES SOMETIDOS A CIRUGÍA ARTROSCÓPICA DE RODILLA, MEDIANTE UN SISTEMA DE CORRECCIÓN DE AMPLITUD ARTICULAR Y FUERZA MUSCULAR, EN LA FUNDACIÓN DE NIÑOS ESPECIALES SAN MIGUEL

Autores

Andrés Mauricio Balarezo Acosta
Bryan Ronald Chuquimarca Ortega

Director

Ing. Andrés Marcelo Gordón Garcés



RESUMEN

El siguiente trabajo de titulación es acerca del diseño e implementación de una órtesis mecatrónica para facilitar la evaluación de los parámetros de amplitud articular y fuerza muscular para la rehabilitación de pacientes sometidos a cirugía artroscópica de rodilla en la fundación de niños especiales San Miguel de Salcedo.

El sistema se ajusta a la articulación de la rodilla mediante velcros, el sistema posee 2 modos de operación, evaluación donde se evalúa el progreso de rehabilitación del usuario y el otro de asistencia de movimiento con un control predictivo que mide la intención de movimiento de la articulación brindando soporte y asistencia a los movimientos. Los datos se almacenan en una base de datos con la aplicación móvil que recibe los datos de la órtesis mediante conectividad bluetooth. La órtesis es portable e inalámbrica para poder ser utilizada por el usuario mientras realiza los ejercicios de rehabilitación o para asistencia al caminar según el rehabilitador lo amerite. Una vez implementada la órtesis en el departamento de rehabilitación de la fundación de niños especiales San Miguel, mediante las encuestas implementadas al personal de rehabilitación y a usuarios de prueba, se pudo comprobar que mediante la órtesis se facilita y optimiza notablemente la toma de datos para la evaluación



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar una órtesis mecatrónica para asistencia en la evaluación y rehabilitación de pacientes sometidos a cirugía artroscópica de rodilla, mediante un sistema de corrección de amplitud articular y fuerza muscular, en la Fundación de Niños Especiales San Miguel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de los procedimientos de artroscopia de rodilla más comunes en pacientes adultos.
- Investigar sobre la biomecánica de las extremidades inferiores del cuerpo humano especialmente en la articulación de la rodilla.
- Seleccionar el sistema sensorial y los actuadores para la órtesis en función de los parámetros necesarios.



OBJETIVOS

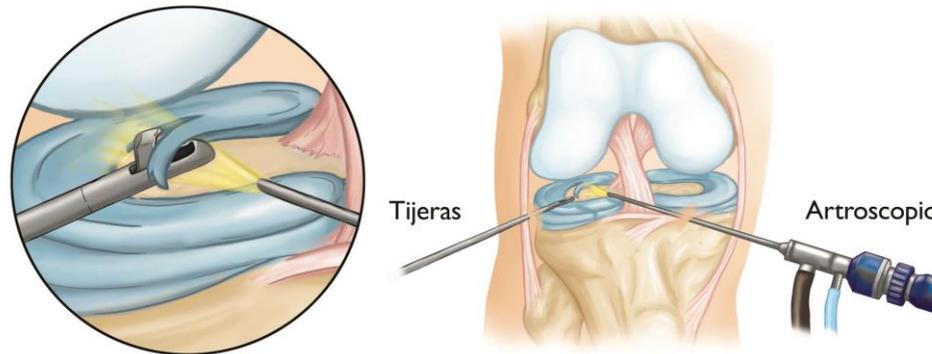
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una órtesis mecatrónica mediante impresión 3D y técnicas de mecanizado CNC para proporcionar un modelo ergonómico y estético para los pacientes.
- Diseñar una aplicación para evaluar los parámetros principales en tratamientos de rehabilitación, así como el control del progreso del paciente.
- Desarrollar los algoritmos de programación para el control de la órtesis mediante sensores de adquisición de datos
- Realizar pruebas de la órtesis de rehabilitación de rodilla para validar su funcionamiento mediante la información registrada en la base de datos.



ARTROSCOPIA DE RODILLA

Es una alternativa terapéutica que es menos invasiva que una cirugía convencional y ha mostrado mejores resultados en la recuperación. La artroscopia, funciona como método de diagnóstico endoscópico (técnica que consiste en introducir una cámara en un tubo endoscópico a través de un orificio natural, incisión, u órgano hueco) con estas cualidades la artroscopia permite visualizar estructuras interarticulares, al mismo tiempo que puede abordar las afecciones con la mayor eficacia y la menor agresividad.



AMPLITUD ARTICULAR

Se refiere a la cantidad de movimiento que realiza una articulación, ya sea por movimiento voluntario del paciente sin ningún impulso, o por ayuda de un profesional de la salud y/o fuerza externa. Esta distancia se expresa generalmente en grados (distancia recorrida desde su posición neutral a su límite máximo) cuyo Rango de movimiento articular varía de acuerdo a la articulación, actualmente para la rodilla se utiliza un instrumento llamado goniómetro universal.



FUERZA MUSCULAR

Es un parámetro que generalmente se evalúa de forma visual en base a un ángulo de tracción muscular y las relaciones que el terapeuta escoja entre longitud-tensión del músculo del paciente. Este parámetro es la capacidad que tiene el paciente para realizar un movimiento antes de que se genere fatiga por la repetitividad del esfuerzo realizado. Actualmente para evaluar este parámetro se utilizan dinamómetros manuales y tensiómetros.



ÓRTESIS DE RODILLA

Es un parámetro que generalmente se evalúa de forma visual en base a un ángulo de tracción muscular y las relaciones que el terapeuta escoja entre longitud-tensión del músculo del paciente. Este parámetro es la capacidad que tiene el paciente para realizar un movimiento antes de que se genere fatiga por la repetitividad del esfuerzo realizado. Actualmente para evaluar este parámetro se utilizan dinamómetros manuales y tensiómetros.



TIPOS DE ORTESIS

Órtesis Activas



Órtesis Pasivas



TIPOS DE ORTESIS

Órtesis Mecánicas



Órtesis Automatizadas



ARQUITECTURA DE DISEÑO



DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE LA ÓRTESIS

Para realizar el diseño del prototipo de órtesis se tuvo en cuenta las medidas antropométricas ecuatorianas, para poder establecer medidas estándar de peso y altura, obteniendo los siguientes resultados.

Estatura de un hombre ecuatoriano promedio: 171.08cm.

Peso promedio de un hombre ecuatoriano: 70 kg.



DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE LA ÓRTESIS

Para asegurar que el diseño sea ergonómico se utilizo medidas antropométricas de ecuatorianos frente a un medio de trabajo una maquina o un artefacto.



DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE LA ÓRTESIS

No	Medidas Antropométrica	50° [cm]
1	Altura Normal	171.08
2	Altura posición sentado normal	91.63
3	Altura posición sentado relajado	90.01
4	Altura de la rodilla	54.39
5	Altura a la poplítea	44.02
6	Altura del codo en posición sentado	22.04
7	Grosor del muslo	13.86
8	Longitud Glúteo - Rodilla	56.89
9	Longitud Glúteo - Poplítea	47.25
10	Longitud Codo a Codo posición sentado	46.46
11	Ancho de caderas posición sentado	38.05
12	Longitud Hombro - Codo	37.47
13	Longitud Codo - Mano	46.13

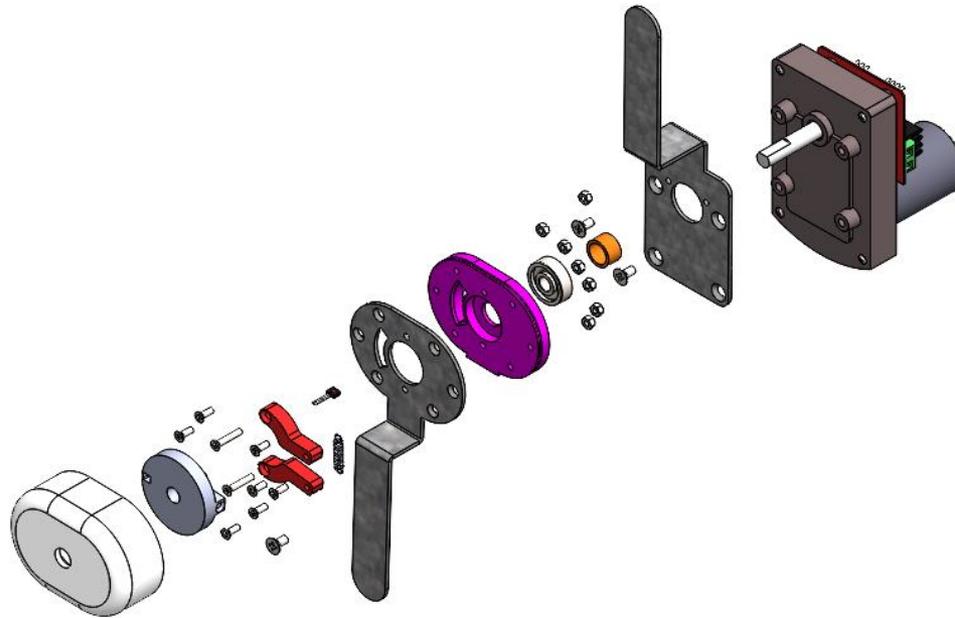


DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE LA ÓRTESIS

Los principales parámetros considerados son:

- Componentes para el soporte.
- Componentes para el movimiento.

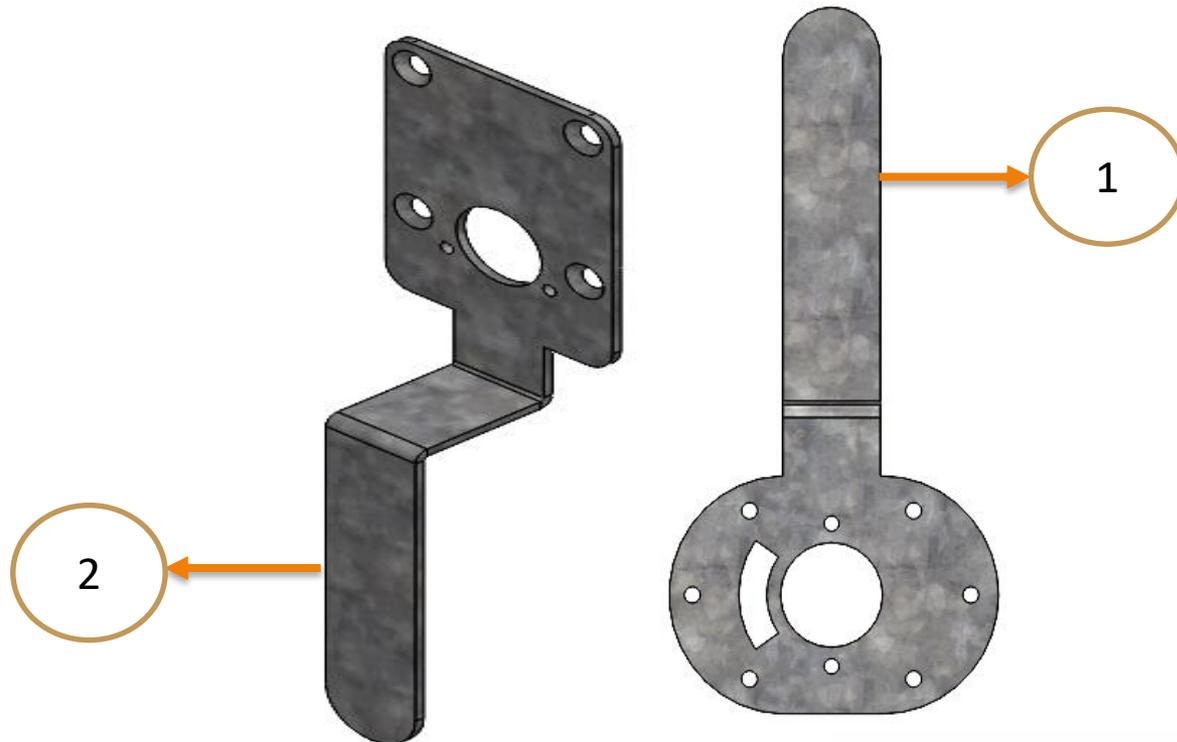


DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE LOS SOPORTES

Los soportes están compuestos por 2 eslabones

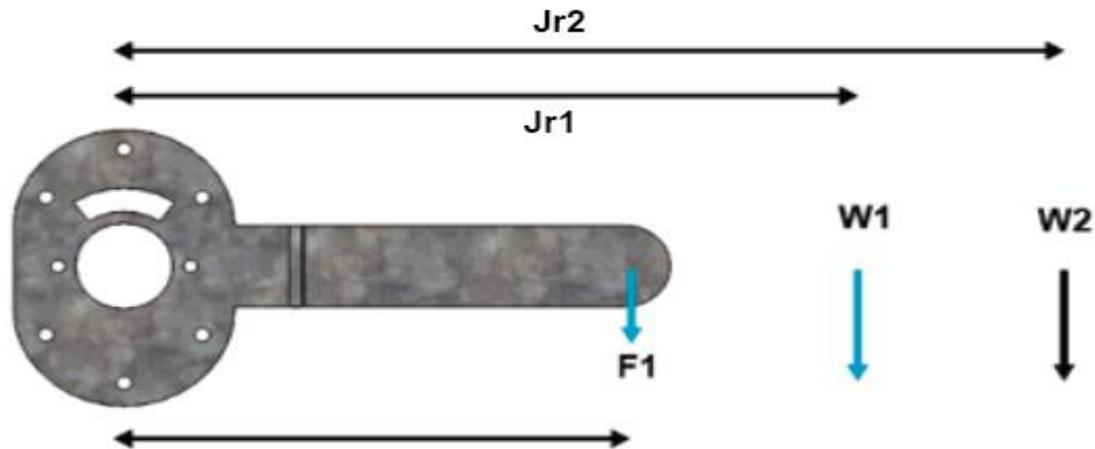
1. Eslabón Shin
2. Eslabón Thigh



DISEÑO MECÁNICO

CÁLCULOS DE DISEÑO ESLABÓN SHIN

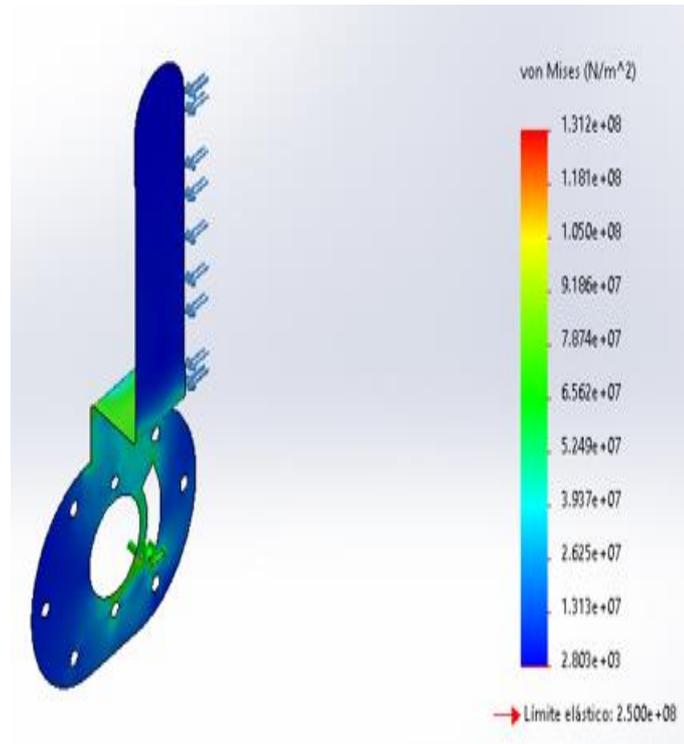
Para el diseño del eslabón hay que tener en cuenta que, el eslabón debe ser capaz de soportar las fuerzas ejercidas sobre el. Para este análisis se realiza un diagrama de cuerpo libre.



DISEÑO MECÁNICO

CÁLCULOS DE DISEÑO ESLABÓN SHIN

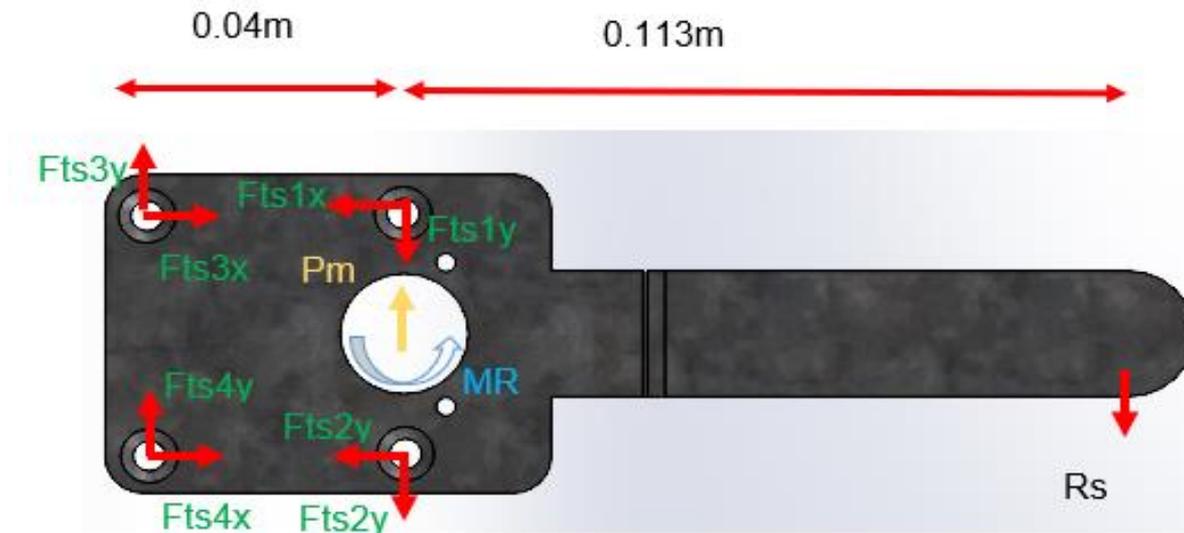
Se realizó un análisis CAE que conjunto con los cálculos mostro que la pieza no fallara y que el diseño es adecuado.



DISEÑO MECÁNICO

CÁLCULOS DE DISEÑO ESLABÓN THIGH

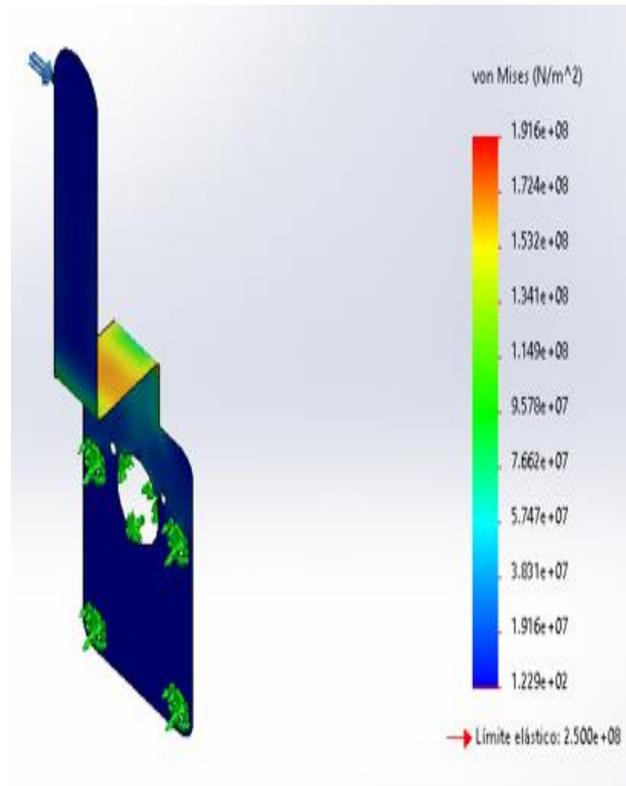
Para el diseño del eslabón hay que tener en cuenta que, el eslabón debe ser capaz de soportar las fuerzas ejercidas sobre el. Para este análisis se realiza un diagrama de cuerpo libre.



DISEÑO MECÁNICO

CÁLCULOS DE DISEÑO ESLABÓN SHIN

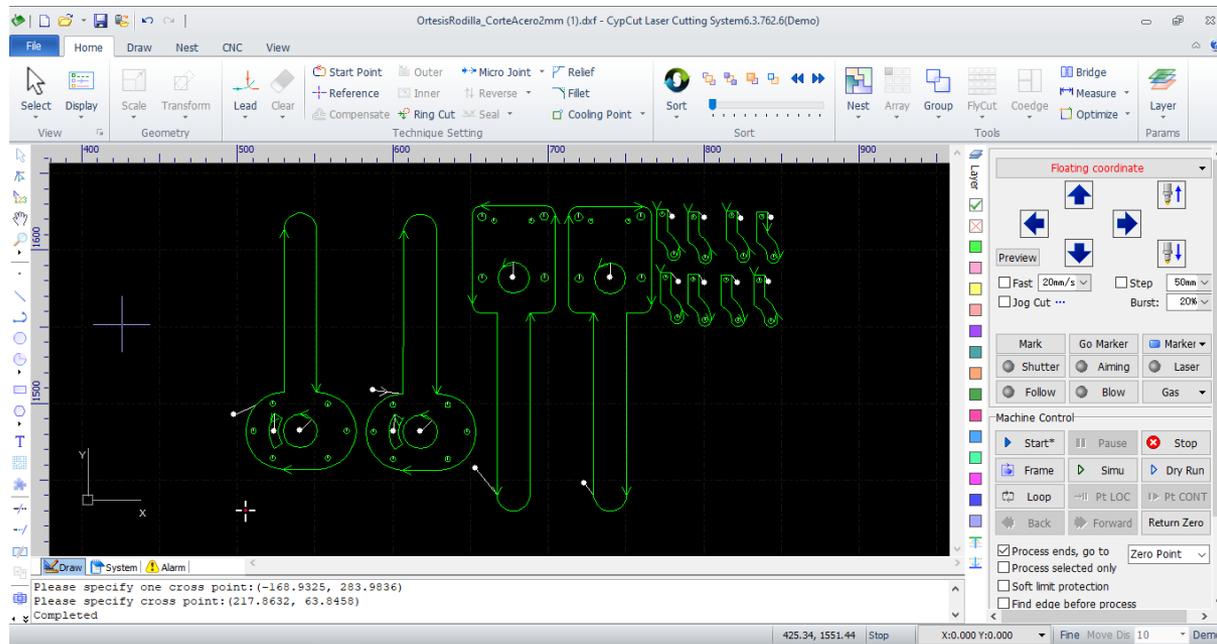
Se realizó un análisis CAE que conjunto con los cálculos mostro que la pieza no fallara y que el diseño es adecuado.



DISEÑO MECÁNICO

TÉCNICAS DE MANUFACTURA

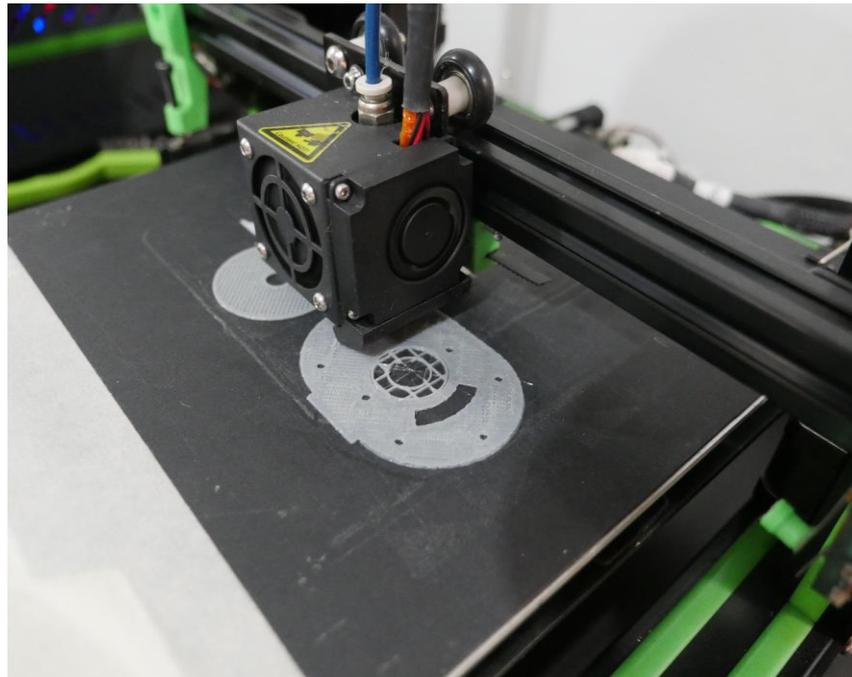
La técnica de manufactura seleccionada fue el corte laser



DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO ELEMENTOS MOVILES

Para el diseño y construcción de los elementos móviles se utilizó tecnologías de manufactura en impresión 3D



ELEMENTOS MECÁNICOS



DISEÑO ELECTRÓNICO

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para seleccionar el sistema adecuado se calcula el total de potencia requerida

Parte No	Nombre	Consumo [mA]
1	Servomotor ASME-02B + Placa de control	500
2	Módulo Bluetooth HC-05	30
3	Pantalla OLED 0.96in	18.18
4	Teensy 3.2	250
	Total	798.18



DISEÑO ELECTRÓNICO

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Calculamos los amperios hora necesarios para el funcionamiento del prototipo.

$$C = x * T$$

C = es la capacidad (Amperios - Hora) que se suplirá

x = es el número de amperios calculados

T = es el tiempo que se desea esté en funcionamiento el dispositivo

$$C = 1995.45[mAh]$$



DISEÑO ELECTRÓNICO

SISTEMA DE CONTROL

Calculamos los amperios hora necesarios para el funcionamiento del prototipo.

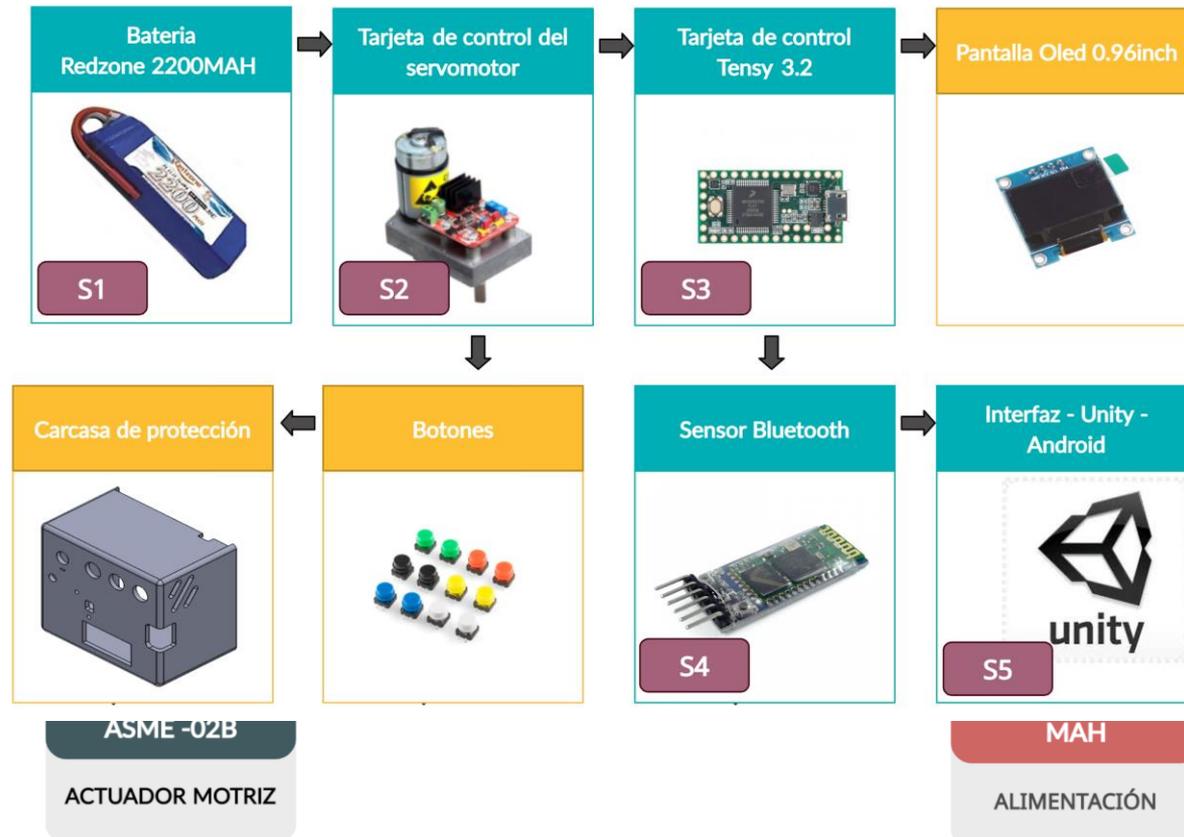
El control necesita una lógica semi automática, esto se traduce como un control que intuya y siga los movimientos del usuario antes que una secuencia propia de la marcha humana

En el diagrama de bloques se muestra la lógica para la construcción del sistema.



DISEÑO ELECTRÓNICO

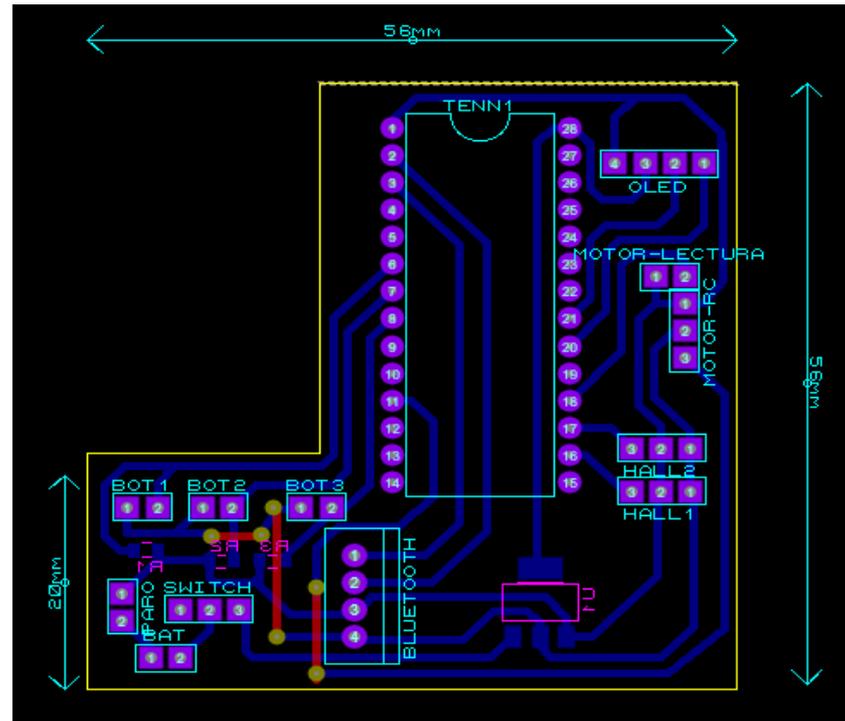
SISTEMA DE CONTROL- DIAGRAMA DE BLOQUES



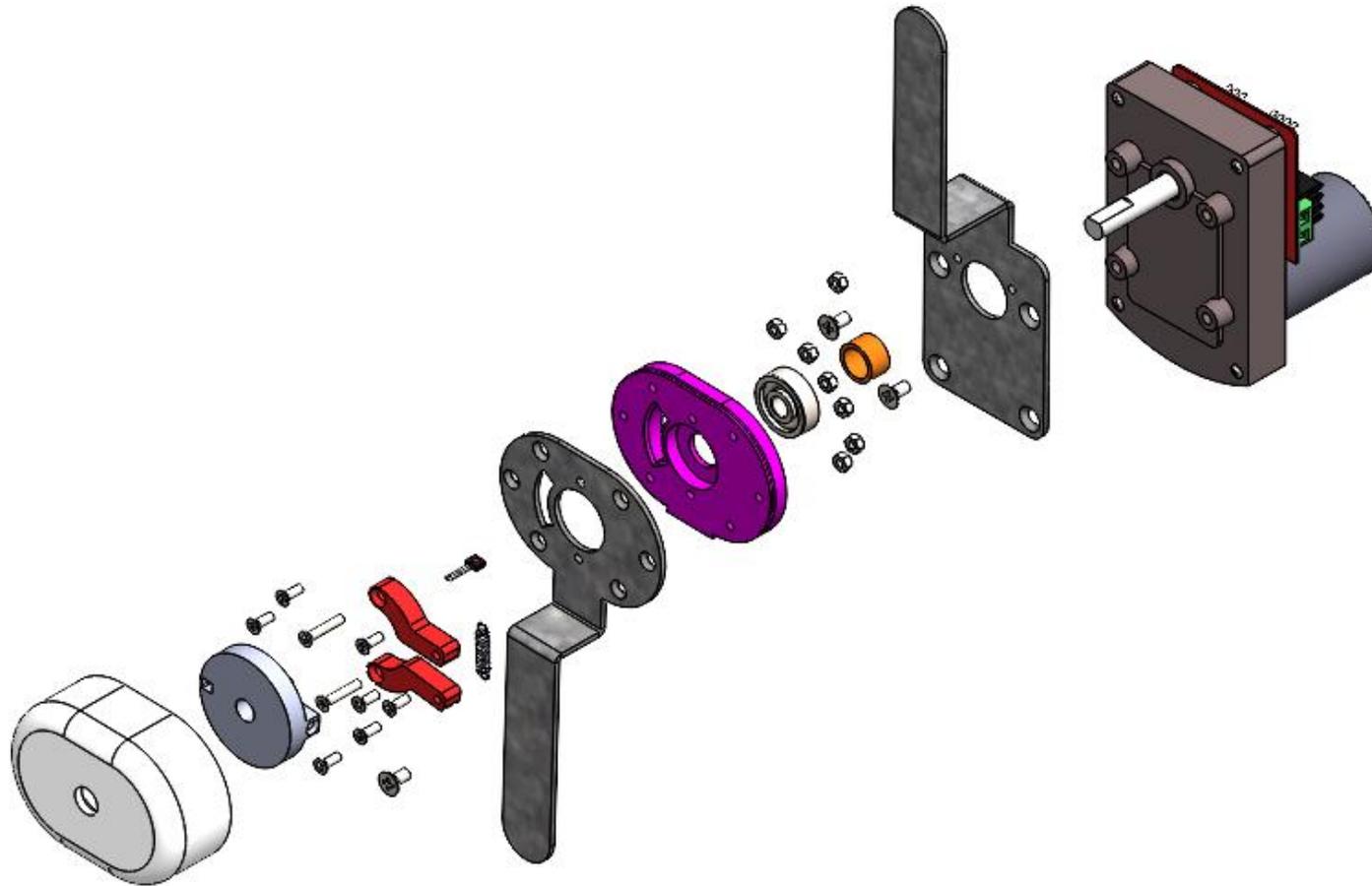
DISEÑO ELECTRÓNICO

DISEÑO PLACA PCB

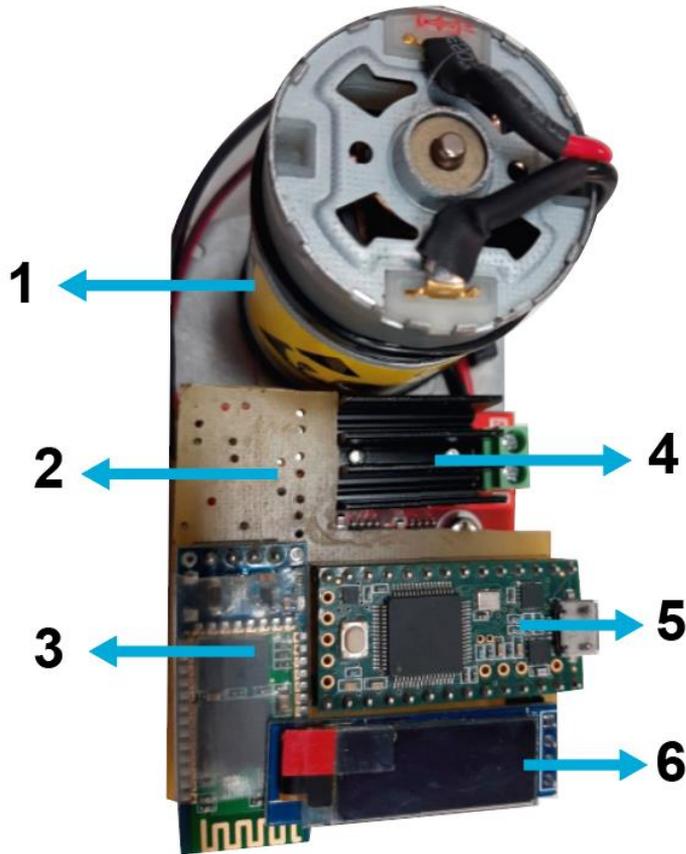
Utilizando herramientas de diseño y un software de diseño PCB realizamos la simulación de la placa general de control para su fabricación.



ENSAMBLE DEL PROTOTIPO



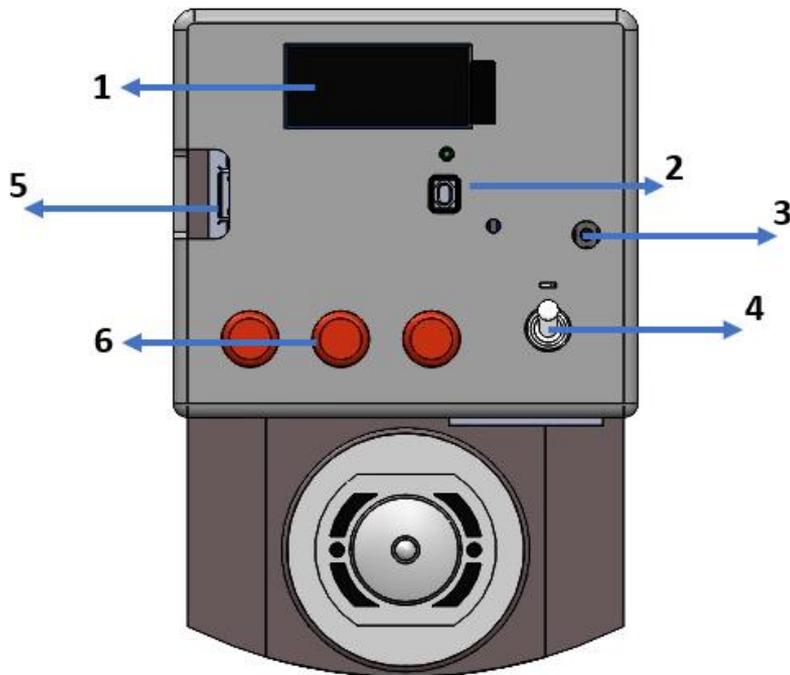
COMPONENTES ELECTRONICOS



Item	Descripción
1	Motor
2	Entradas para Botones
3	Módulo Bluetooth
4	Puente H (Driver)
5	Teensy 3.2
6	Pantalla Oled



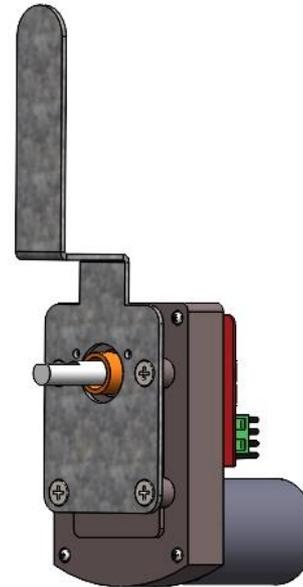
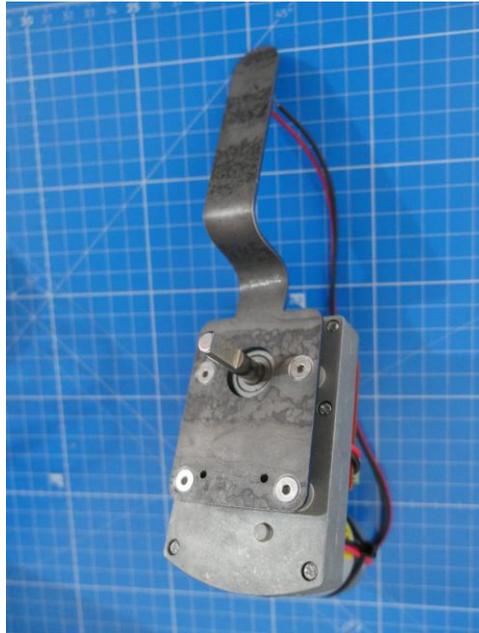
COMPONENTES EXTERNOS



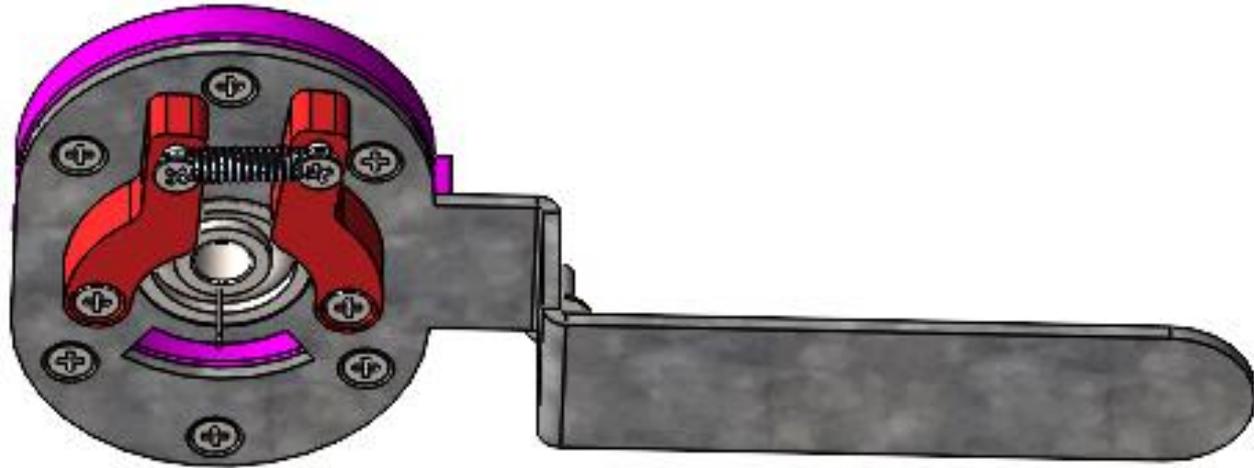
Item	Descripción
1	Pantalla oled
2	Botón de alimentación Tensy 3.2
3	Paro de emergencia
4	Switch On/Off
5	Puerto de Programación
6	Botones



ENSAMBLE MOTOR - ESLABON 1

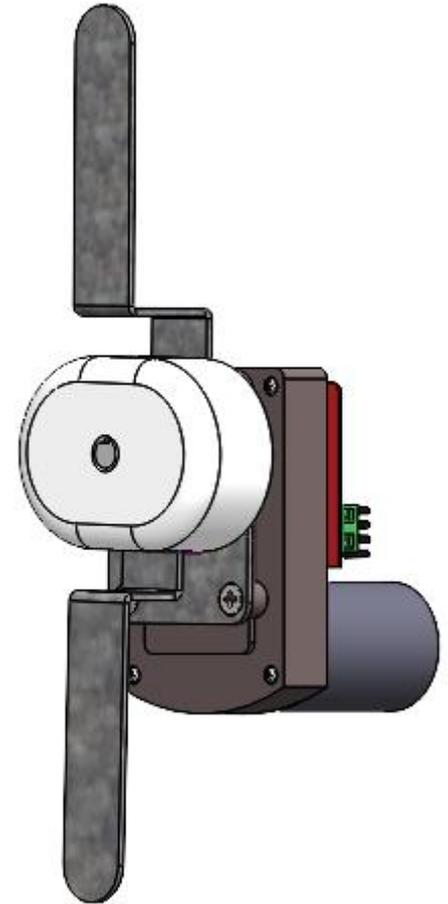
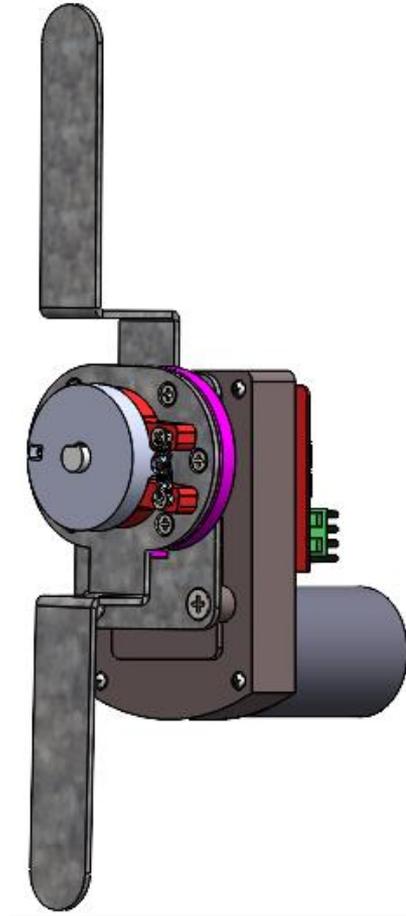
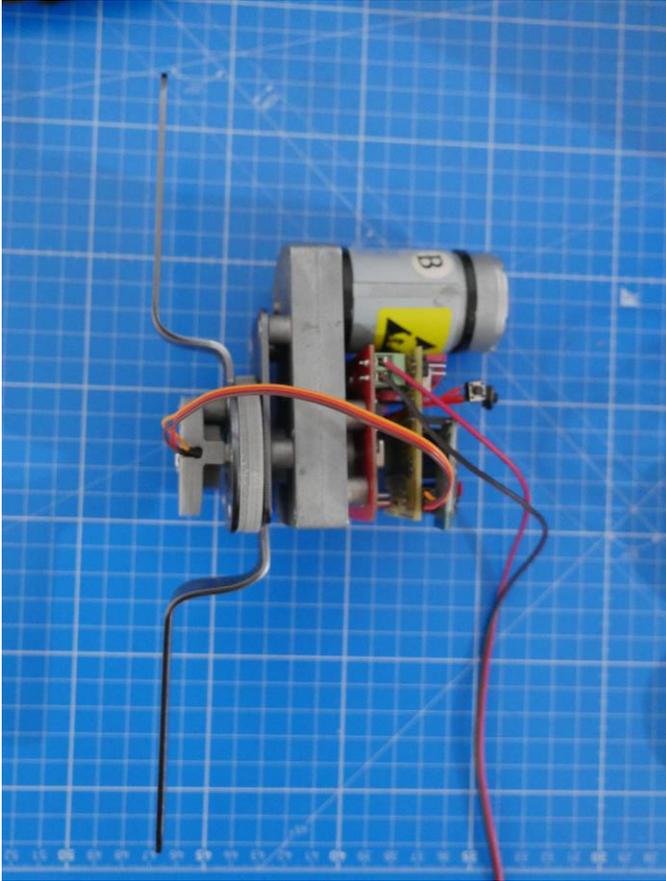


ENSAMBLE MECANISMO DE MEDICIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ENSAMBLE CON EL SERVOMOTOR



DISEÑO PROGRAMACIÓN

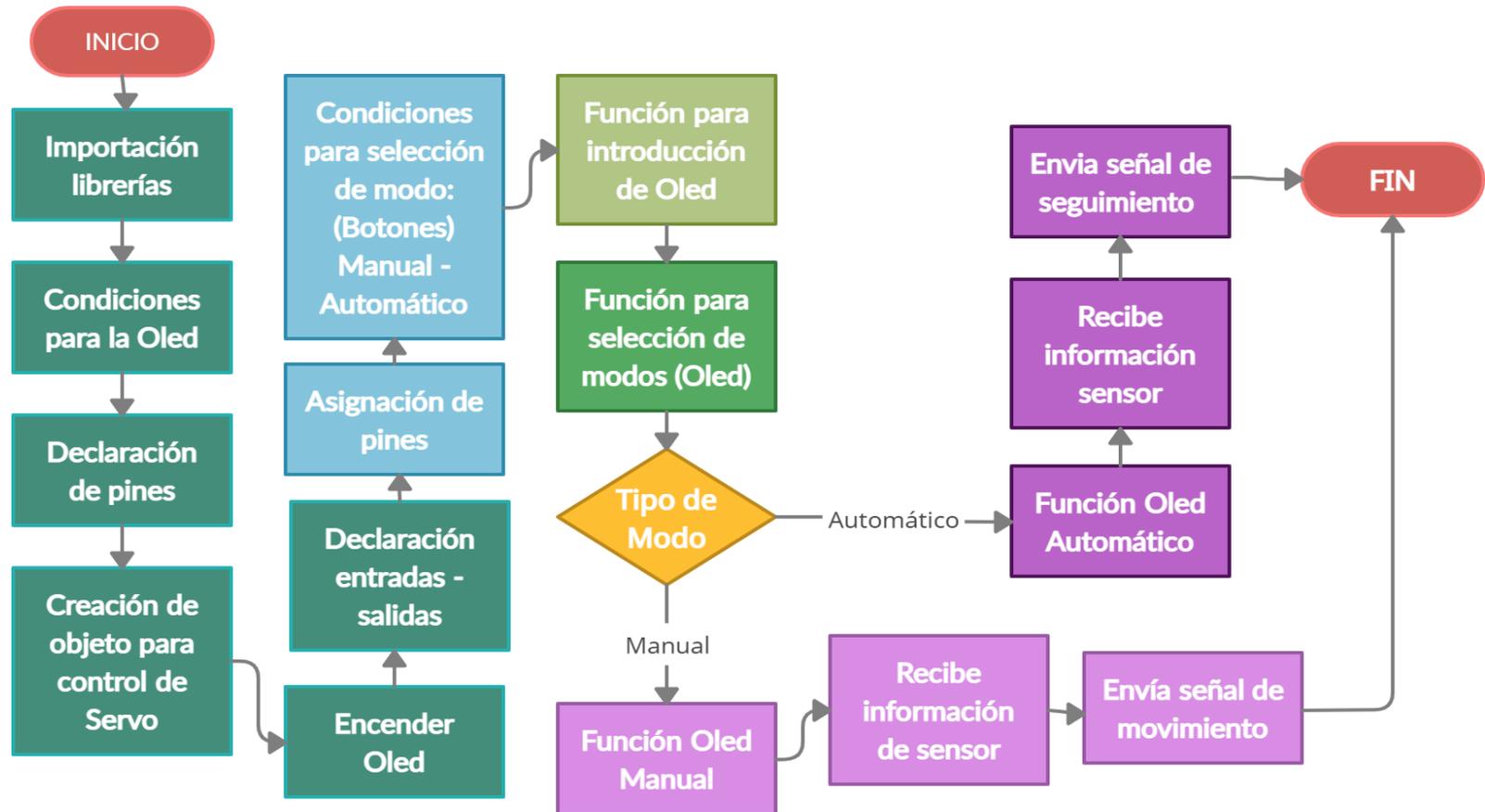
DIAGRAMAS DE FLUJO

Se muestra de forma general las partes que contendrá el código para diseñar el control automático considerando el modelo de un control seguidor frente a un evento y limitado por características que considera el terapeuta para la rehabilitación del paciente.



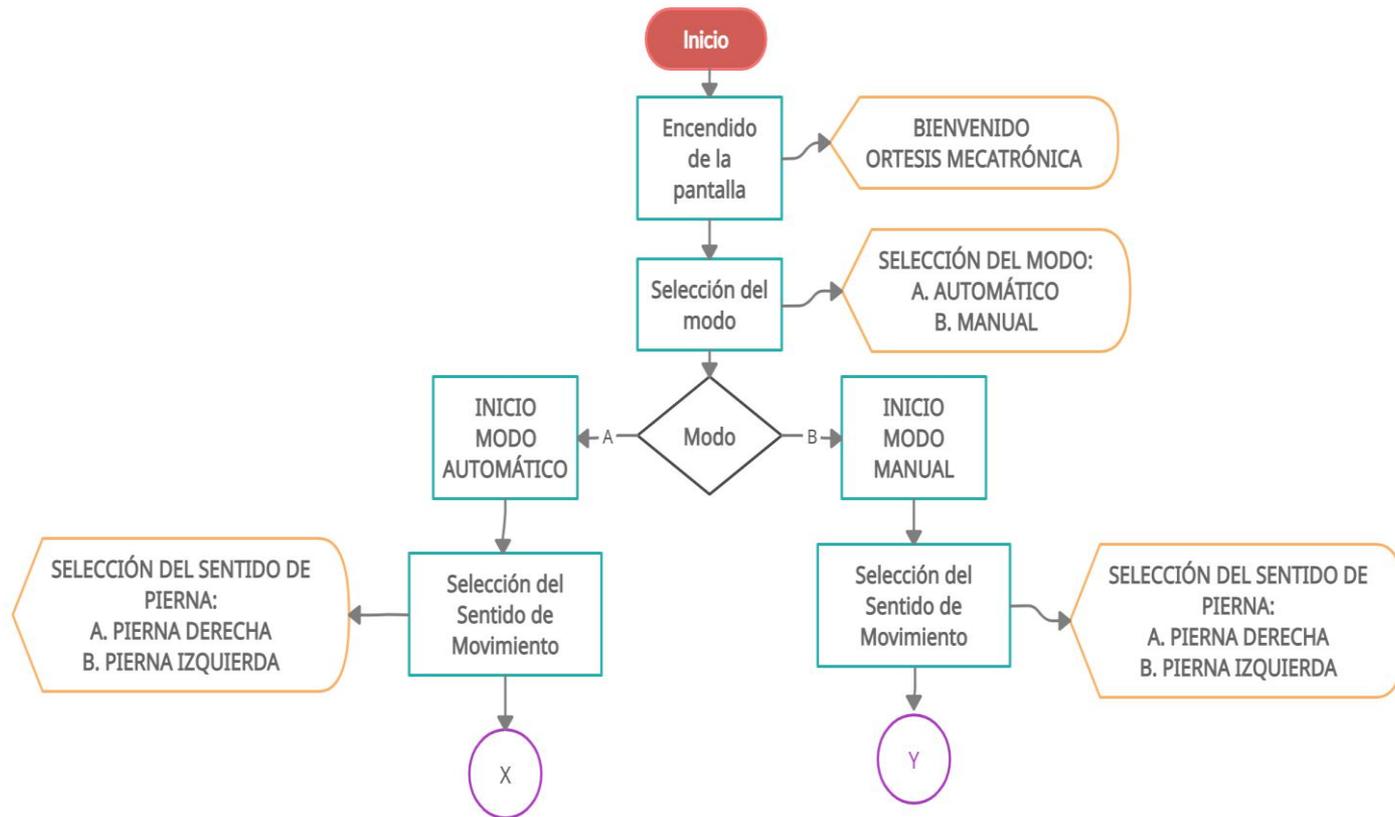
DISEÑO PROGRAMACIÓN

LÓGICA DE PROGRAMACIÓN



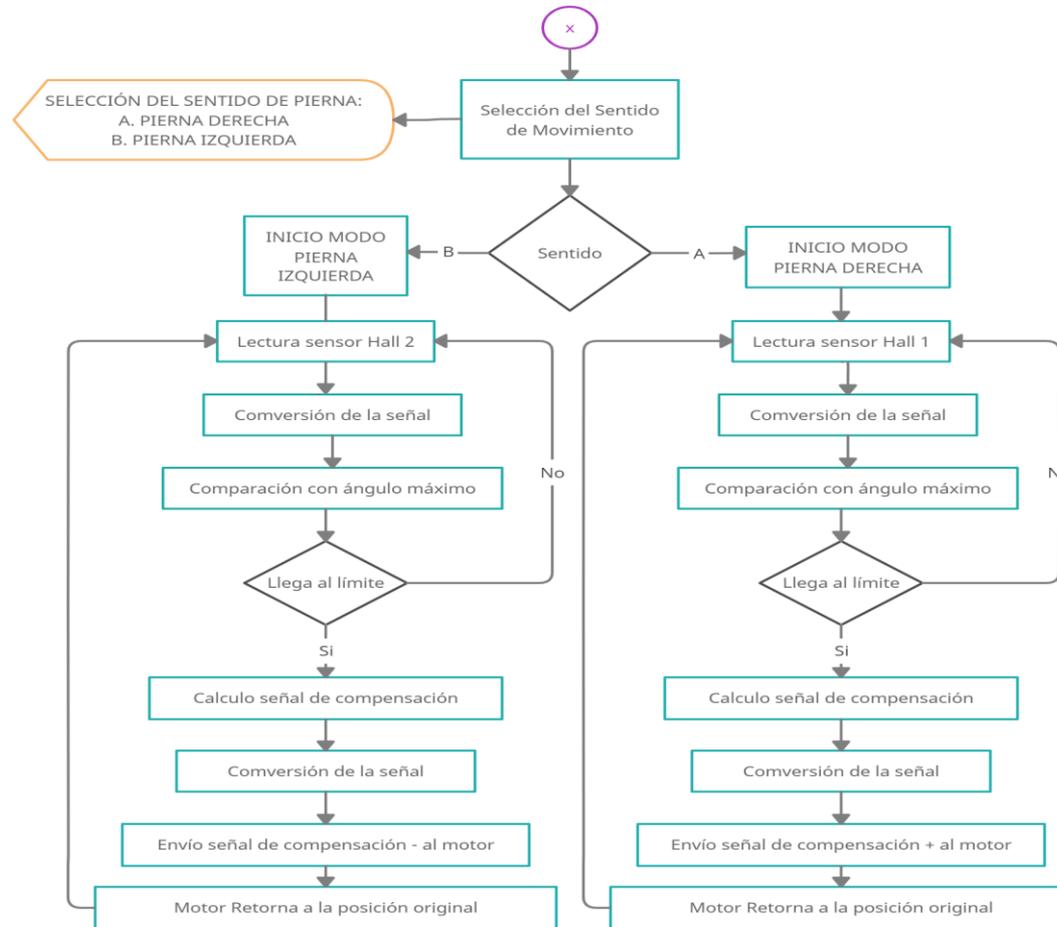
DISEÑO PROGRAMACIÓN

DIAGRAMAS DE FLUJO



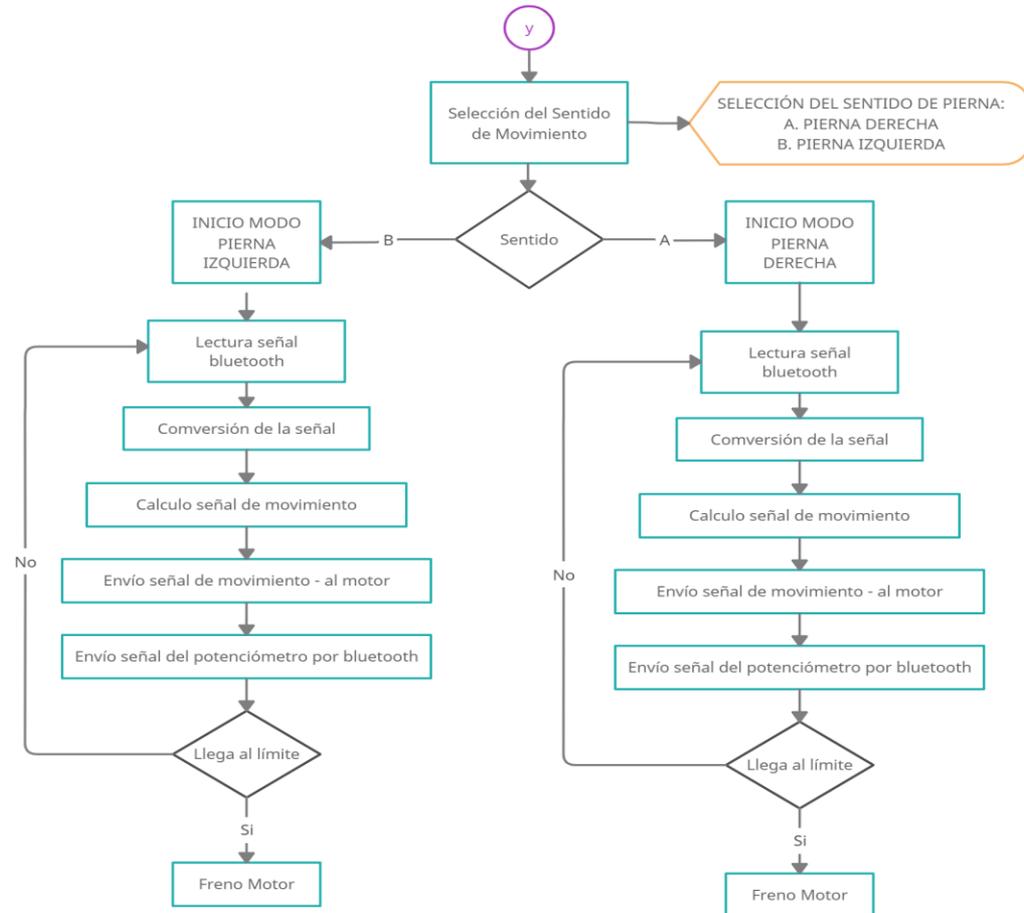
DISEÑO PROGRAMACIÓN

DIAGRAMAS DE FLUJO

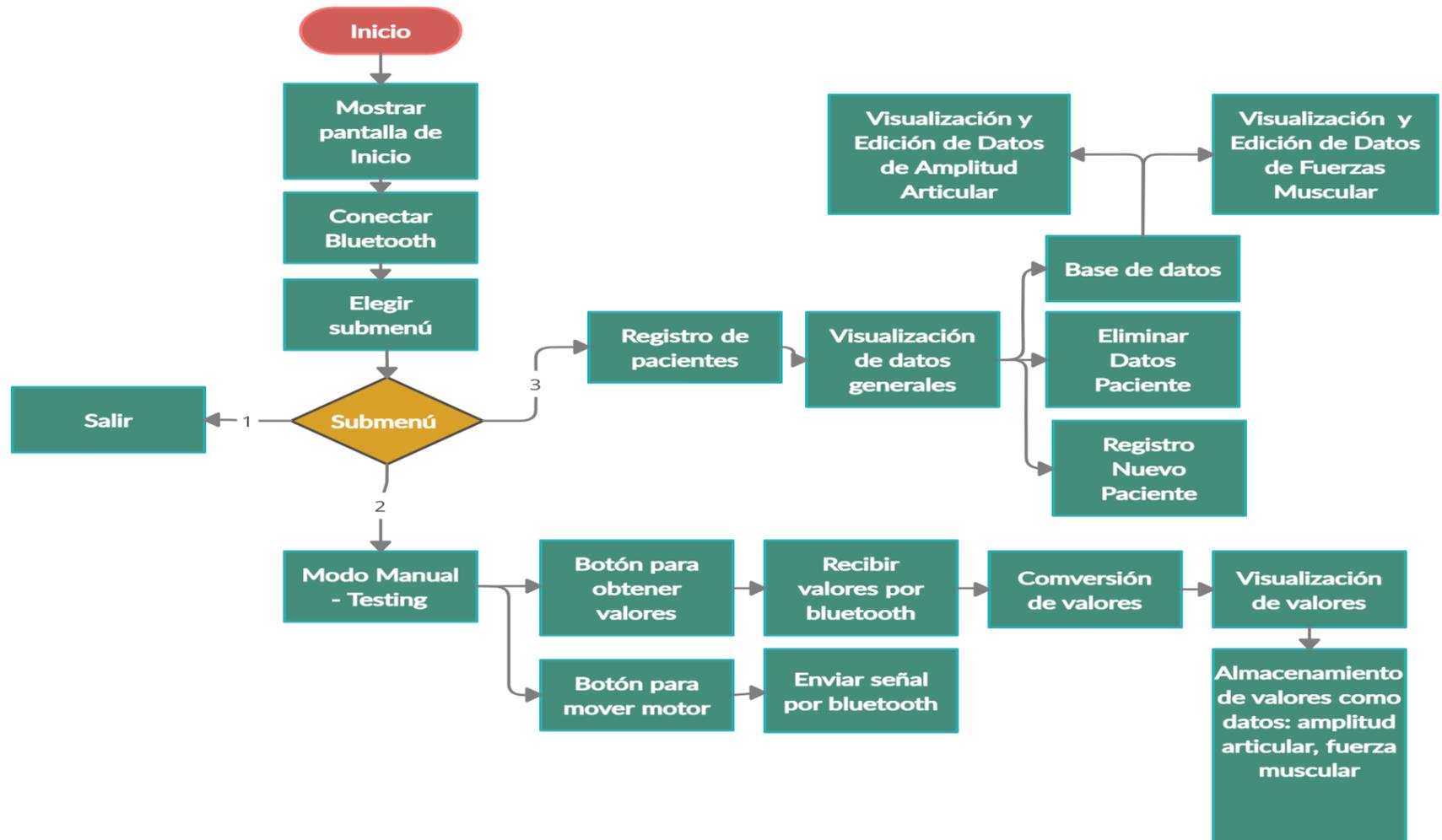


DISEÑO PROGRAMACIÓN

DIAGRAMAS DE FLUJO



DISEÑO PROGRAMACIÓN- INTERFAZ



INTERFAZ GRÁFICA



SISTEMA DE ÓRTESIS ROBÓTICA



PACIENTES

TESTING

SALIR



REGISTRO DE DATOS DEL PACIENTE

1

2

REGISTRO DE PACIENTES

No.	Hora/Fecha	Nombres-Apellidos	Cédula	Edad	Teléfono	Opciones
0.	10:19 19 febrero, 2021	Andres Balarezo	12345	25	0986564949	 
1.	10:21 19 febrero, 2021	Jose Perez	8956	30	65656898	 

5

4

3

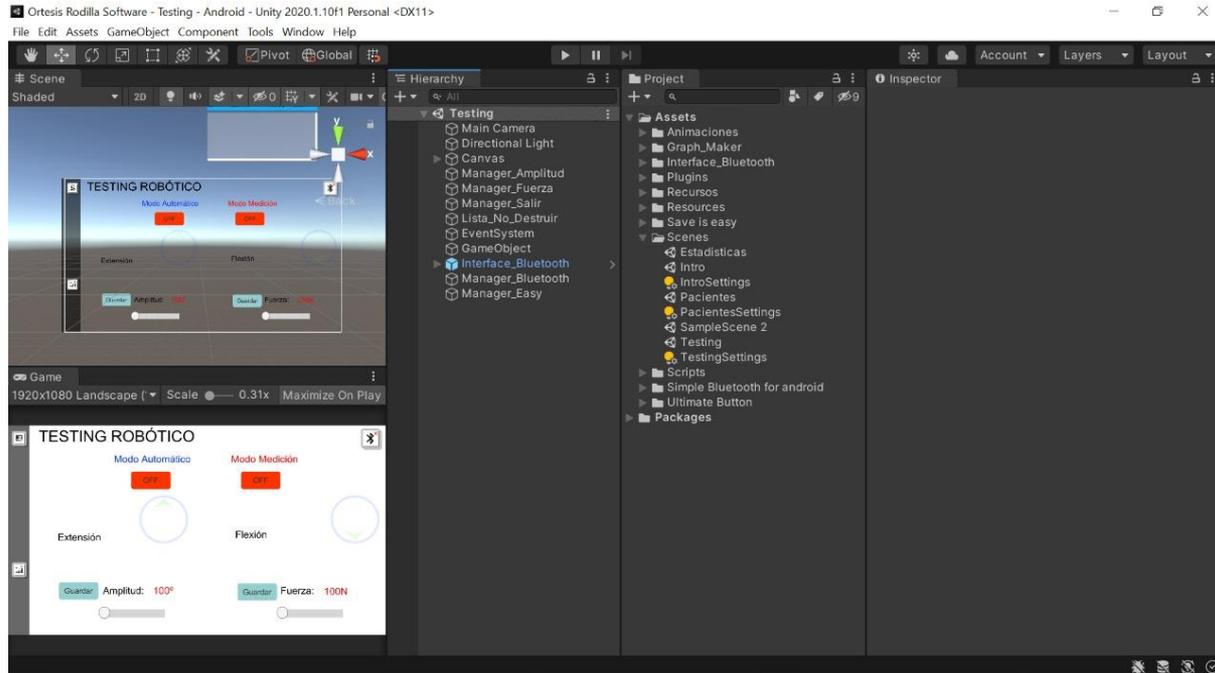


REGISTRO DE DATOS DEL PACIENTE

Ítem	Parte	Descripción
1	Título de ventana	Aquí se muestra el título de la ventana actual
2	Barra de títulos	<ul style="list-style-type: none">• No: Número de paciente• Hora/Fecha: Fecha y hora de ingreso del paciente• Nombres - Apellidos del paciente• Cédula del paciente• Edad del paciente• Teléfono del paciente• Opciones de edición
3	Registro	Redirecciona a la venta de Modo Testing (toma de datos y movimiento del motor)
4	Eliminar	Elimina todos los datos del registro del paciente
5	Ingreso de Datos	En estas casillas se escriben los datos del paciente



MODO DE PRUEBA



MODO DE PRUEBA

TESTING ROBÓTICO 1

Modo Automático

Modo Medición
 2

Extensión 3

Flexión

Amplitud: 100 ° 4

Fuerza: 100 N

No.	Hora-Fecha	Amplitud (°)	Opciones
0.	10:20 19 febrero, 2021	50,5	<input type="button" value="x"/>
1.	10:20 19 febrero, 2021	50,5	<input type="button" value="x"/>

5

No.	Hora-Fecha	Fuerza (N)	Opciones
0.	10:20 19 febrero, 2021	50,5	<input type="button" value="x"/>
1.	10:20 19 febrero, 2021	50,5	<input type="button" value="x"/>

6

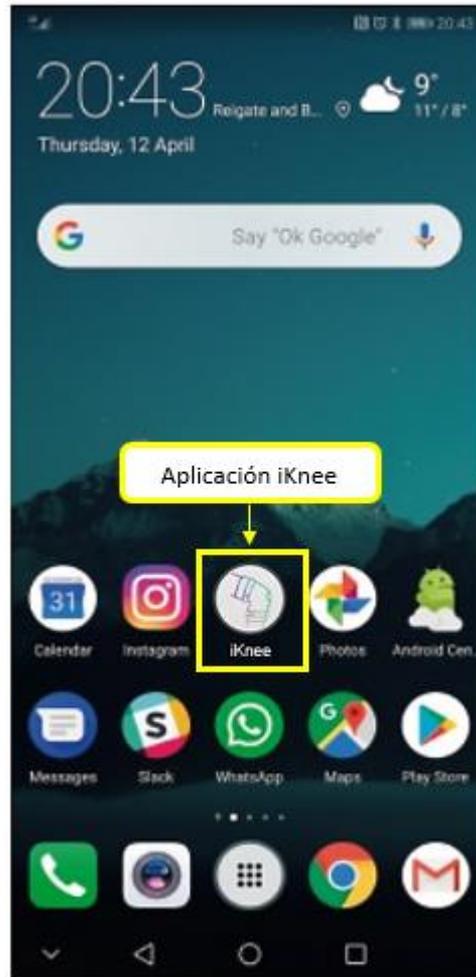


MODO DE PRUEBA

Ítem	Parte	Descripción
1	Título de ventana	Aquí se muestra el título de la ventana actual
2	Selección del modo	Coloca a la órtesis en un solo modo de funcionamiento: <ul style="list-style-type: none">• Modo Automático: Seguimiento del movimiento• Modo Manual: Control manual de la órtesis para registro de datos
3	Movimiento Motor	Redirecciona a la venta de Modo Testing (toma de datos y movimiento del motor)
4	Almacenamiento de datos	Cuando se da clic en uno de los dos botones guarda el valor mostrado en el registro.
5	Registro 1	Tabla de datos para la Amplitud Articular
6	Registro 2	Tabla de datos para la Fuerza Muscular



APLICACIÓN PARA ANDROID



PRUEBAS Y RESULTADOS

Validación Terapéutica

Con ayuda de los especialistas se realizan pruebas de funcionamiento, tanto como usuarios y como terapeutas.



PRUEBAS Y RESULTADOS

Validación con Pacientes

Para poder evaluar el prototipo de la órtesis mecatrónica de asistencia de rodilla se solicitó la ayuda por parte del equipo de rehabilitación de la Fundación San Miguel de Salcedo, con evaluadores especialistas en fisioterapia y rehabilitación.



PRUEBAS Y RESULTADOS

Validación de la Hipótesis

H1: El Prototipo de órtesis mecatrónica permitirá la asistencia en la evaluación y rehabilitación de pacientes sometidos a cirugía artroscópica de rodilla.

$$\lambda^2 = \sum_i \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$$

$$\lambda^2_{\text{Calculado}} \geq \lambda^2_{\text{Tabulado}}$$

$$1249,99999971 \geq 65.2471$$



CONCLUSIONES

- Existe solo un único procedimiento para la intervención artroscópica de rodilla, el tipo de procedimiento dentro del tejido es el que varía, éste consiste en retirar el ligamento dañado o un menisco desgastado y según el tipo de intervención da como resultado un grado de influencia significativo sobre el paciente el cual altera la amplitud articular máxima o la fuerza muscular promedio entre diferentes pacientes evaluados por un profesional.
- Entender la marcha humana y la dinámica de la caminata permitió elaborar un sistema de control en modo automático que asiste en la movilidad de la pierna para un paciente en rehabilitación, la lógica de programación es en esencia un seguidor de movimiento con una unidad de medición de campo magnético y un juego mecánico que desencadena la compensación por parte del motor.

CONCLUSIONES

- El prototipo incorporó un actuador motriz cuyo torque compensa las fuerzas que actúan sobre las piezas manufacturadas, el análisis de fuerzas determinó una resultante de 39.75N y un momento de 4.495Nm ejercidas sobre las piezas de transmisión de movimiento, el troque del motor cuyo valor es de 340kg*cm vence el momento inercial primario para realizar el movimiento de la articulación; por otro lado, el sistema sensorial se resolvió incorporando un seguidor de movimiento magnético.
- Todos los valores iniciales de los cálculos que involucran mediciones de partes del cuerpo humano se determinaron a partir de estudios ergonómicos para medidas antropométricas según el entorno de donde se realizó el estudio, el porcentaje de altura de la pantorrilla y el pie corresponden al 28.5% de la altura total (cerca de 1,7mts) el centro de masa se puede calcular teniendo en cuenta que la pantorrilla corresponde al 4.3% de la masa total, el muslo el 10.3% y sus centros de masas desde un extremo, el 37.05 y 37.19% respectivamente, estas medidas se utilizaron para realizar el corte en máquina de fibra láser, la fabricación de piezas en impresión 3D y la construcción de una rodillera cómoda y resistente para el usuario, dichos parámetros tuvieron un alto grado de aceptabilidad en las pruebas realizadas.



CONCLUSIONES

- La amplitud articular de una persona intervenida en cirugía artroscópica tiende a flexionar la pierna sin superar el grado de movilidad normal que es de 60 grados marcha; por otro lado, la fuerza muscular se mantiene alrededor de los 10N que corresponde al peso de la pantorrilla distribuido en la parte crítica de la pieza mecánica, todos estos valores son enviados mediante bluetooth a la aplicación móvil para su visualización y registro en una base de datos almacenada en el teléfono para la posterior evaluación por parte del terapeuta.
- El diagrama de la lógica de programación representa el método de programación utilizada en Arduino para la Teensy 3.2, mediante la selección de componentes se consideró a la placa controladora como el elemento central de los módulos del prototipo, por otro lado, la adquisición de datos funciona gracias a la solución propuesta de la extensión de un muelle con $k=2.646$ y la utilización del encoder del motor ASME 02B.



RECOMENDACIONES

- Antes de que el terapeuta proceda a utilizar la órtesis en sus pacientes es necesario brindar una capacitación del ajuste y funcionamiento de la misma por motivos de seguridad.
- Es recomendable no almacenar los valores límite de los parámetros de rehabilitación, más bien hacerlo con un pequeño margen menor para precautelar los movimientos que realiza el paciente.
- Se recomienda que el paciente realice movimientos leves en vacío hasta acostumbrarse a los movimientos de la órtesis antes de proceder a realizar movimientos complejos como caminar o ejercicios de rehabilitación.



RECOMENDACIONES

- Calibrar los parámetros límite cada vez que el paciente vuelve a colocarse la órtesis para poder controlar de mejor manera los movimientos de la articulación y ver el progreso de la recuperación.
- Diseñar más medidas standard del sistema de ajuste para que el sistema se pueda acoplar a cada paciente de manera más ergonómica y evitar que el prototipo tenga mediciones erróneas.

GRACIAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA