



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de un rehabilitador  
mecatrónico para esguince de  
tobillo**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Mecatrónica**

**P R E S E N T A N**

Ruth Yunuen Guzmán González  
Ana Laura Matías Duvinán

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Octavio Díaz Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

# **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso y de muchos otros en mi vida: sin ustedes nada de lo que he logrado habría sido posible.

En segundo lugar, a Paola Monserrat por su paciencia, aliento y ayuda en los momentos más inesperados y en las ocasiones más inoportunas: de no haber estado ahí ninguna de esas experiencias sería de la manera que fue.

A Alejandro Duvinán por nunca dejar de creer en mí y alentarme a continuar, así como apoyarme incondicionalmente en cada una de las decisiones que han sido trascendentales tanto en mi desarrollo profesional como en el personal.

A Ruth por su amplísimo apoyo, decisión, tenacidad, temple y paciencia a lo largo del desarrollo de este trabajo y del tiempo que pasamos juntas en la Facultad y en la Universidad: sin ti ninguna de las situaciones que hemos vivido significaría lo mismo.

Al Dr. Octavio Díaz por su dedicación, paciencia, asesoría, consejo y palabras de aliento a lo largo de la realización de este trabajo.

A Francisco Muñoz, simplemente por estar y ser parte de mi existencia.

A mis amigos de la Prepa 6 por recordarme que no debemos dejar de esforzarnos y luchar por nuestros sueños, sobreponiéndonos a las dificultades y asegurándonos que contamos unos con otros tanto en las adversidades como en los buenos tiempos.

Agradezco también a las Abejas Mecatrónicas por todas las experiencias que vivimos a lo largo de nuestro paso por la Facultad de Ingeniería y por las lecciones que cada uno de ellos aportó a mi persona.

A Michel, Christian, Ernesto y Salvador por todos los momentos que hemos pasado juntos y por las que nos faltan.

A Ale, Angie y Danny por el apoyo y conocimientos proporcionados, así como los gratos momentos que vivimos en PumaFit.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM por brindarnos los conocimientos, valores y principios sobre los cuales forjamos nuestro desarrollo profesional.

Atentamente  
Ana Laura Matías Duvinán

A mis padres, que día con día me apoyaron y me animaron a seguir adelante en cada etapa de mi vida, este logro es una realidad gracias a ustedes.

A mi hermana, Viridiana quien ha sido incondicional para mí, por cuidarme y siempre hacerme sonreír, por tantas cosas que hemos compartido, las risas a media noche, por entenderme y apoyarme en cada locura. Te agradezco con el alma todo lo que haces por mí, sin ti no sería la persona que soy ahora.

A Jesús Díaz, por ser mi razón de ser mejor cada día, quien me ha enseñado que no todo está perdido y siempre hay una luz al final del camino. Por ayudarme a ser la mejor versión de mi misma, por tu enorme paciencia y el amor que me brindas día con día. Millones de gracias por confiar en mí, por no soltar mi mano y nunca dejarme caer.

Para mi gran amiga Ana, sin tu ayuda nada de esto sería posible. Te agradezco enormemente tu amistad, y el apoyo incondicional que siempre me has brindado. Gracias por todo el esfuerzo, determinación y entusiasmo que has puesto en este trabajo, eres alguien a quien admiro muchísimo, y te agradezco por cada momento que compartimos en la Facultad, sin duda son los mejores recuerdos de la Universidad.

Al Dr. Octavio Díaz, quien confió en nosotras y nos brindó su apoyo desde que éramos sus alumnas. Por su paciencia y por todos los consejos que nos brindó durante la realización de este proyecto, muchísimas gracias.

Para mis amigos que tanto quiero y admiro, las Abejas Mecatrónicas: Ana, Diego, Eduardo y Francisco. Les agradezco enormemente cada momento que disfrutamos dentro y fuera de clases, las salidas, las largas pláticas y bromas, tantos recuerdos divertidos que creamos juntos y que siempre estarán en mi corazón, gracias por todo.

A todo el equipo Puma Fit: Angie, Ale, Eira y Danny. Por su enorme paciencia en cada clase, las risas, las bromas y los momentos divertidos. Por todo lo que nos enseñaron y el apoyo que nos brindaron para la realización de este trabajo. Muchas gracias por todo.

Al profesor Carlos Zamora, quien nos brindó su ayuda asesorándonos en el desarrollo del proyecto.

Por último, a la Facultad de Ingeniería que nos dio la oportunidad de formarnos como ingenieras en sus aulas, brindándonos los conocimientos necesarios para desarrollarnos profesionalmente y así poder ayudar a nuestro entorno y a la sociedad.

Atentamente  
Ruth Yunuen Guzmán González

# CONTENIDO

OBJETIVOS Y ALCANCES.....	6
INTRODUCCIÓN .....	7
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	8
1.1.1 Clasificación de los agentes físicos en la rehabilitación .....	8
1.1.2 Ejercicio terapéutico.....	10
1.2 Anatomía del tobillo y lesiones más comunes .....	12
1.3 Esguince de tobillo.....	15
1.4 Rehabilitación del tobillo.....	17
1.4.1 Clasificación de los ejercicios empleados en la rehabilitación del tobillo.....	17
1.5 Esguince de tobillo en México .....	19
1.6 Normatividad de los dispositivos médicos en México .....	19
1.7 Estado del arte .....	20
CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL .....	24
2.1 Identificación de las necesidades .....	24
2.1.1 Planteamiento del problema.....	24
2.1.2 Necesidad básica .....	24
2.2 Requerimientos de diseño .....	24
2.3 Especificaciones de diseño .....	25
2.4 Proceso de selección de conceptos.....	26
2.4.1 Descripción de funciones y generación de conceptos .....	27
2.4.2 Conceptos solución .....	36
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE CONFIGURACIÓN .....	38
3.1 Diseño de configuración del rehabilitador .....	38
3.1.1 Configuración 1.....	40
3.1.2 Configuración 2.....	40
3.1.3 Configuración 3.....	41
3.2 Selección de configuración.....	42
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE DETALLE .....	42
4.1 Parámetros de la carga y características de los actuadores.....	43

4.2 Diseño mecánico del rehabilitador.....	46
4.2.1 Selección de materiales mediante el método Ashby para soporte de la pantorrilla y del dispositivo completo .....	46
4.1.2 Selección de materiales mediante el método Ashby para la plantilla .....	49
4.3 Análisis FEM.....	49
4.3.1 Deformaciones nodales sobre la base para el pie.....	50
4.3.2 Deformaciones nodales sobre el eje .....	50
4.3.3 Deformaciones nodales sobre la base de la pantorrilla .....	51
4.4 Análisis de esfuerzos de la base para el pie, el eje y el soporte de la pantorrilla .....	52
4.5 Diseño electrónico del rehabilitador .....	54
4.5.1 Control del dispositivo.....	55
4.6 Programación del dispositivo .....	58
4.6.1 Uso del dispositivo de manera automática sin resistencia .....	58
4.6.2 Uso del dispositivo de manera manual con resistencia .....	59
CAPÍTULO 5. RESULTADOS .....	60
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....	61
6.1 Trabajo a futuro.....	62
Anexos .....	63
Apéndice.....	67

# OBJETIVOS Y ALCANCES

## Objetivo

Diseñar un dispositivo de dos grados de libertad que coadyuve a la rehabilitación de las lesiones del tobillo causadas por esguinces de primer, segundo y tercer grado en personas que realizan alguna actividad física con regularidad (de 4 a 6 horas a la semana).

## Objetivos particulares

- El dispositivo permitirá realizar los ejercicios usados en la rehabilitación del tobillo, es decir, dorsiflexión, flexión plantar, inversión y eversión.
- El usuario podrá realizar ejercicios para recuperar movilidad o bien, de fortalecimiento, de acuerdo con su avance en la terapia y como indique el fisioterapeuta.
- El dispositivo permitirá al usuario recibir la terapia mientras está sentado.
- El dispositivo contará con una interfaz que permitirá al usuario monitorear el estado de la sesión.

## Alcances

- Se generará un modelo funcional del dispositivo de rehabilitación a nivel diseño de detalle.

## **INTRODUCCIÓN**

El esguince de tobillo en cualquiera de sus grados es una de las lesiones que se presentan con mayor frecuencia de manera cotidiana y entre las personas que realizan alguna actividad física con regularidad, teniendo como consecuencia ausentismo laboral y escolar. Su tratamiento se basa principalmente en fármacos y en la ejecución de ejercicios de rehabilitación que ayuden a los individuos afectados a recuperar la movilidad del tobillo y fortalecer los ligamentos involucrados. Sin embargo, en nuestro país se observa que en la mayoría de los casos se omite la terapia una vez que se ha recuperado la capacidad de caminar sin presentar dolor, lo cual provoca un aumento en la probabilidad de sufrir una recaída debido a que el padecimiento no ha sido tratado de manera adecuada.

Actualmente existen en el mercado diferentes rehabilitadores que únicamente permiten al usuario realizar ejercicios de movilidad, haciendo a un lado los de fortalecimiento, otorgándoles una solución parcial al problema. Además, algunos de ellos sólo pueden utilizarse en una posición incómoda y no cuentan con la posibilidad de controlarse remotamente.

Es por ello que en este trabajo se propone el diseño de un dispositivo que admite llevar acabo ambas clases de ejercicios, teniendo como base los principios de la terapia pasiva y activa asistida, los cuales resultan indistintos para el tratamiento de cualquiera de los tres grados de esguince con el fin de sanar completamente la extremidad lesionada y reducir el índice de padecimientos derivados de una terapia inadecuada o inexistente.

# **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

## **1.1 Concepto de rehabilitación**

La rehabilitación se refiere al conjunto de medidas cuyo objetivo principal consiste en mejorar las capacidades de una persona para realizar por sí misma actividades necesarias para su desempeño físico, mental, social, ocupacional y económico, por medio de órtesis, prótesis, ayudas funcionales, cirugía reconstructiva o cualquier otro procedimiento que le permita reintegrarse a la sociedad.

Asimismo, constituye una especialidad médica que tiene como objetivo primordial restablecer al máximo alguna función del cuerpo humano que ha sido perdida por una enfermedad congénita o adquirida, reintegrando al individuo a su familia, trabajo y a la sociedad. De igual forma, busca que las personas con discapacidad adquieran un nivel de independencia, autonomía, integración y autorrealización acorde con sus condiciones generales.

Existen muchas modalidades y agentes físicos que son utilizados para obtener respuestas terapéuticas en los tejidos, los cuales deben considerarse como suplementos de la terapia; entre ellos se incluyen los siguientes: calor, frío, agua, sonido, electricidad y ondas magnéticas [1].

Así, los beneficios de utilizar agentes físicos radican en su fácil acceso y en sus efectos a corto plazo; además de permitir múltiples maneras de aplicación haciéndolos adaptables a casi cualquier lesión, enfermedad o afección.

### **1.1.1 Clasificación de los agentes físicos en la rehabilitación**

En la siguiente tabla se muestran los agentes físicos más usados en la rehabilitación, así como algunos ejemplos.



**Tabla 1***Agentes físicos en la rehabilitación*

Agente físico	Nombre de la terapia	Descripción	Ejemplos
Calor	Termoterapia	Se refiere a la aplicación de calor en donde se localiza la lesión. Se clasifica en superficial (cuando la penetración es baja) o profunda (cuando se dan efectos biológicos gracias al calentamiento de tejidos profundos)	Aplicación de compresas calientes
Frío	Crioterapia	Consiste en disminuir la temperatura periférica de la lesión	Inmersión en agua helada, aplicación de bolsas de hielo
Agua	Hidroterapia	Se refiere al medio físico utilizado para efectos de calentamiento, enfriamiento, analgesia y relajación muscular	Tanque de remolino (cuando se requiere sumergir únicamente las extremidades) y tanque tipo Hubbard (requiere la inmersión de todo el cuerpo)
Masajes	Masoterapia	Terapia manual destinada a producir una serie de reacciones fisiológicas controladas en el sistema músculo esquelético y/u otros sistemas del cuerpo	Masajes descontracturantes, relajantes, entre otros.

Nota. [1, 2].

### 1.1.2 Ejercicio terapéutico

Consiste en la prescripción y ejecución del movimiento corporal con el fin de corregir, mejorar o mantener una función, sea la de un grupo muscular específico o la de todo el cuerpo. Es importante considerar: la carga, número de repeticiones, número de series, veces por semana, y forma cómo se debe incrementar. Además, debe ser agradable para asegurar el cumplimiento adecuado por parte del individuo y debe modificarse según evolucione la condición del mismo. Antes de realizar el ejercicio, el individuo debe realizar un periodo de calentamiento previo y otro de enfriamiento al finalizar [1].

Según su forma de realización, los ejercicios se clasifican en:

-Ejercicio pasivo. El individuo no realiza ningún esfuerzo, éste es realizado por el terapeuta, otra persona o una máquina. Generalmente se utiliza en casos de parálisis.



Figura 1. Ejercicio pasivo [3].

-Ejercicio activo asistido. Una parte del esfuerzo es realizado por el individuo y otra por el terapeuta por medio de poleas o por la fuerza de gravedad o bien se facilita por la inmersión en el agua.

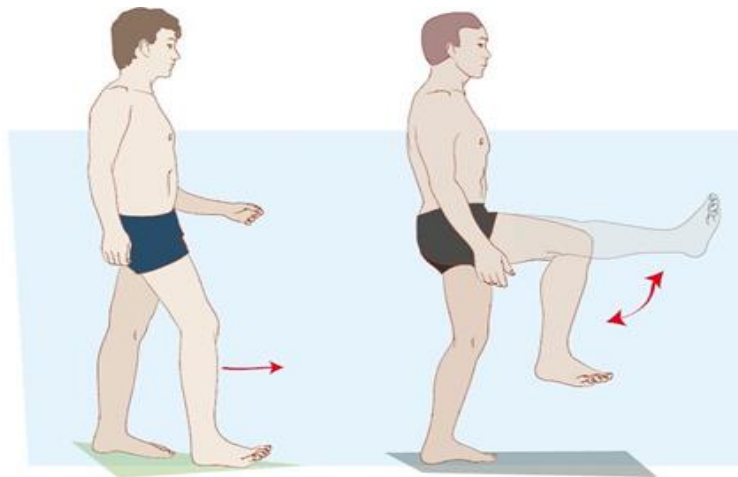


Figura 2. Ejercicios de movilidad en el agua [4].

-Ejercicio activo. El individuo es quien realiza todo el esfuerzo.



Figura 3. Ejercicios de movilidad del tobillo [4].

-Ejercicio activo resistido. Se coloca una resistencia al movimiento por medio de pesas o de una fuerza ejercida por el terapeuta u otra persona. En la figura 4 se ilustran algunos de estos ejercicios realizados en la terapia: en el inciso a, se muestra al usuario realizando la flexión/extensión del pie con una liga que se opone al movimiento; en el inciso b, se realiza el movimiento de abducción/aducción con liga, este ejercicio debe realizarse sentado en una silla y para el inciso c, el usuario debe pararse con la punta de los pies sobre un banco para estirar los gemelos.

Cuando el usuario ha fortalecido la articulación, puede realizar ejercicios en los que deberá realizar un esfuerzo mayor comparado con los mencionados anteriormente. En los incisos d, e y f (igualmente de la figura 4), la persona deberá subir y bajar de un banco más alto que el del inciso c; realizar sentadillas colocando una liga a la altura de las rodillas

manteniendo la espalda recta, y por último, realizar una sentadilla con salto, respectivamente.

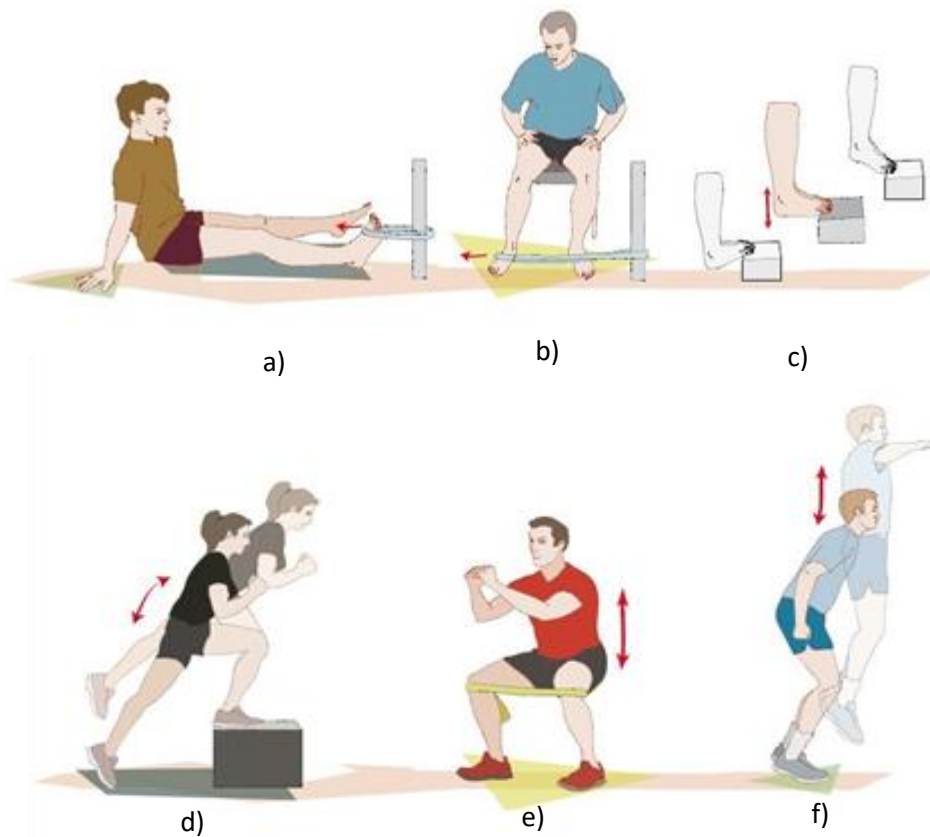


Figura 4. Ejercicios progresivos de fortalecimiento muscular [4].

## 1.2 Anatomía del tobillo y lesiones más comunes

El tobillo está formado por las articulaciones tibio-astragalina, peroneo-astragalina y tibio-peronea. Es una articulación de bisagra cuya estabilidad depende de la congruencia articular y de los ligamentos externos e internos. Su función se refiere a la transferencia de la carga de la extremidad inferior al pie e influye íntimamente en la orientación de éste con el suelo [5]. Los ligamentos, que conectan los huesos entre sí, estabilizan y dan soporte a la articulación, mientras que los músculos y tendones son responsables de su movimiento.

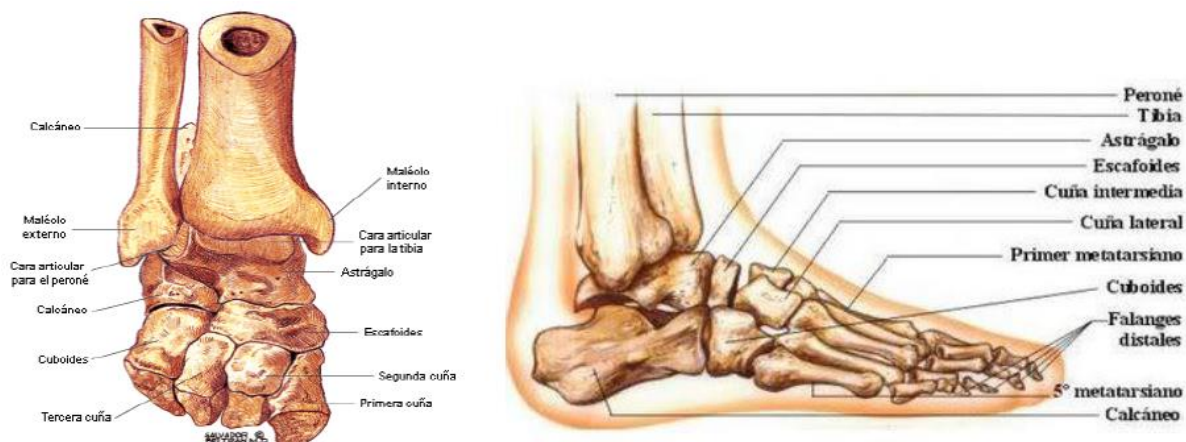


Figura 5. Vista frontal y lateral del tobillo [6].

Los principales movimientos angulares del tobillo con respecto a los tres ejes se muestran en la figura 6.

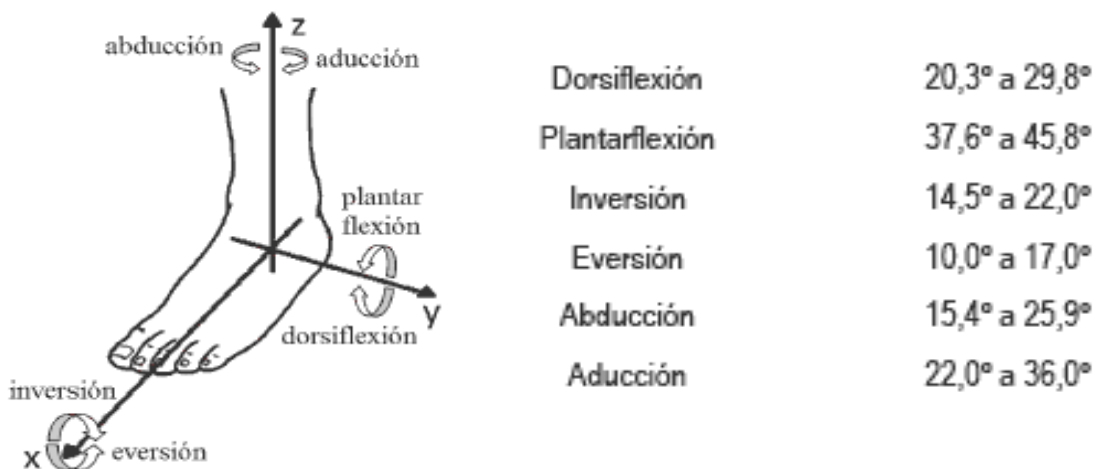


Figura 6. Intervalos de valores máximos para los movimientos del tobillo [7].

Las lesiones de tobillo en sus diferentes formas (afectación ósea, articular y/o partes blandas), varían en función de su gravedad y están condicionadas por factores tales como la edad, la actividad laboral habitual y la existencia o no de otras patologías asociadas [8].

A continuación, se muestra un cuadro con los principales tipos de lesiones y su clasificación:

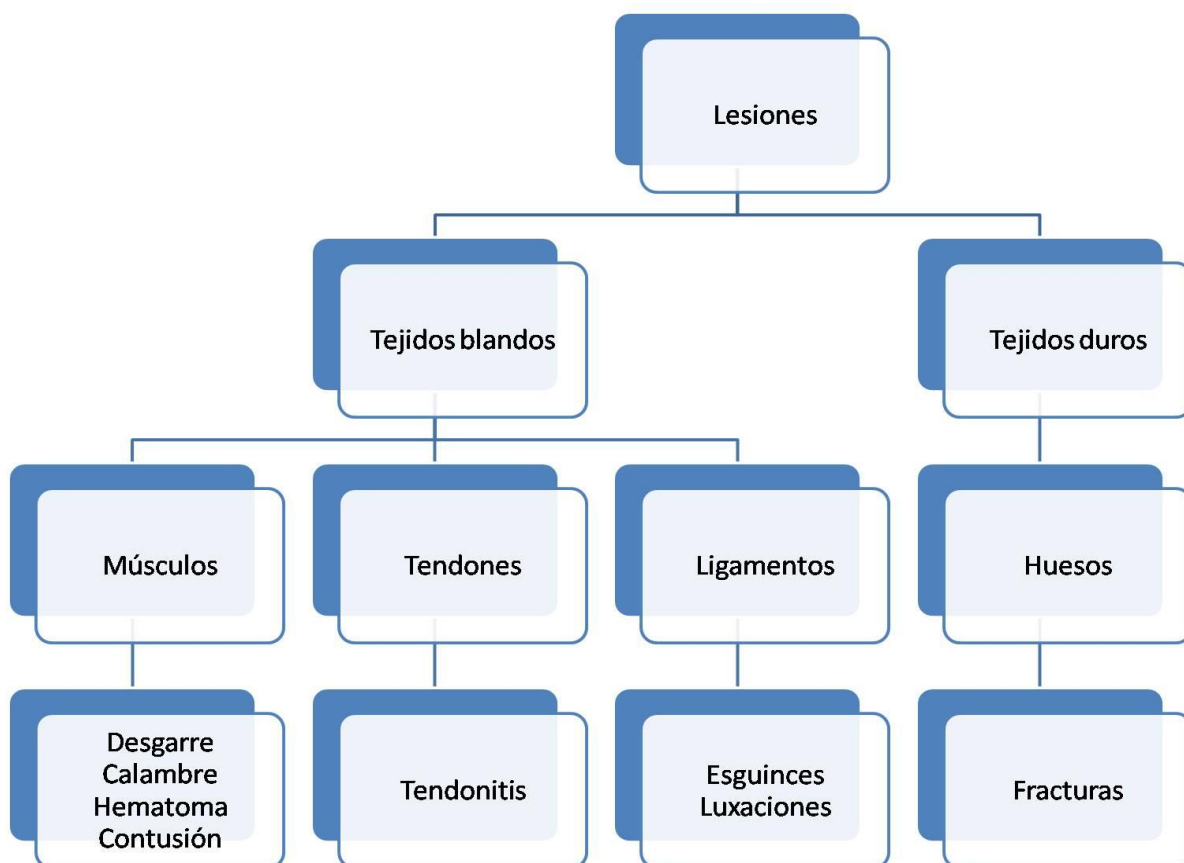


Figura 7. Tipos de lesiones [8, 9].

Las lesiones ligamentarias del tobillo son las más frecuentes que se presentan en las actividades cotidianas y del deporte; se conocen con los términos de esguince, torcedura o entorsis del tobillo. Estas lesiones representan uno de los principales motivos de consulta en los servicios de urgencia; se estima alrededor de un caso por cada 10 mil personas que son atendidas por día. El mecanismo de lesión más común es la supinación con una combinación de aducción e inversión del pie en flexión plantar; el cual se produce por medio de un golpe directo, una caída o un movimiento incorrecto del tobillo [10].

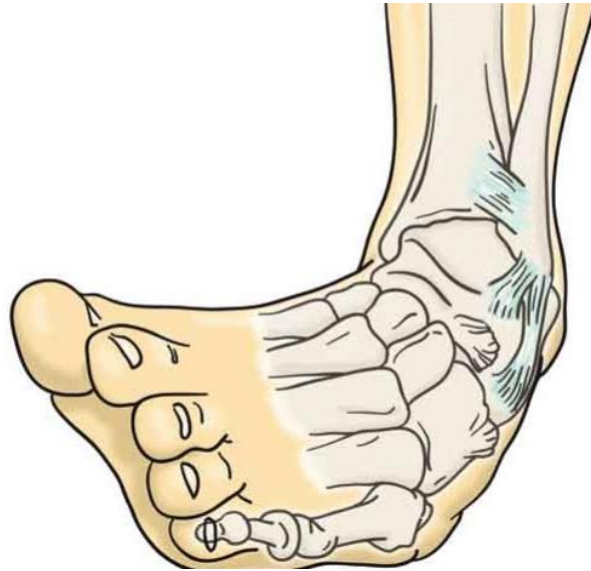


Figura 8. Mecanismo de lesión del esguince de tobillo [11].

### **1.3 Esguince de tobillo**

El esguince de tobillo es la lesión de los ligamentos alrededor del mismo; se clasifica dependiendo del grado de severidad y las estructuras afectadas. Consiste en la ruptura parcial o total de uno o más de los ligamentos en la articulación del tobillo y se caracteriza por dolor, hinchazón y limitación funcional. La atención oportuna de este tipo de lesiones ligamentarias en las primeras 72 horas conlleva a mejores resultados en salud y menores repercusiones sociales y económicas [2].

De acuerdo con la gravedad de la lesión, los esguinces pueden clasificarse como se muestra a continuación:



**Tabla 2**

*Clasificación de los esguinces*

Grado	Manifestaciones clínicas	Ejemplo
Grado I	Lesión parcial de un ligamento sin pérdida funcional o con limitación leve; hinchazón leve y las fibras del ligamento están distendidas pero intactas	La persona es capaz de caminar con apoyo total y dolor mínimo
Grado II	Lesión incompleta de un ligamento, dolor e hinchazón moderados. Con discapacidad funcional moderada, equimosis (hematoma) leve o moderada, limitación parcial de la función y el movimiento. Algunas fibras del ligamento están parcialmente desgarradas	La persona tiene dolor cuando apoya o camina
Grado III	Lesión completa y pérdida de la integridad del ligamento, inflamación (más de cuatro centímetros por arriba del peroné) y equimosis severa. Pérdida de la función y el movimiento. Los ligamentos están completamente desgarrados y no son funcionales	La persona es incapaz de caminar o apoyarse

Nota. [12].

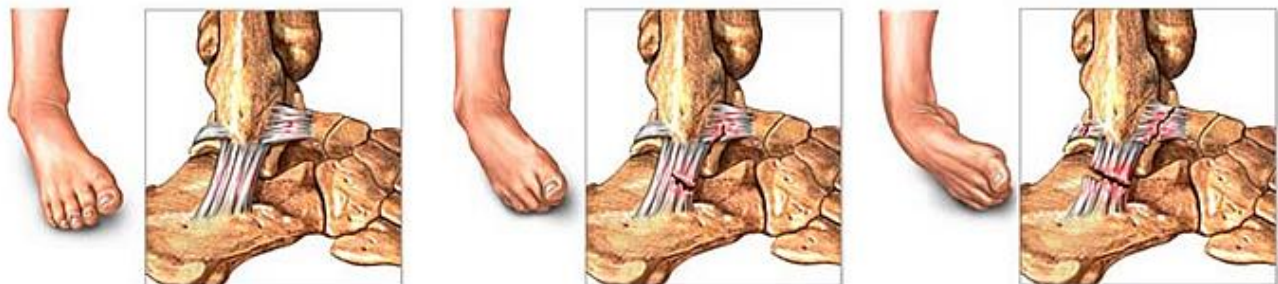


Figura 9. Esguince de tobillo: grado I, II y III [13].



## **1.4 Rehabilitación del tobillo**

La articulación del tobillo es una de las estructuras de mayor soporte de peso del cuerpo humano y como resultado de su función y estructura, es la articulación más comúnmente lesionada. Una lesión en el tobillo puede aumentar el riesgo de una nueva lesión o lesiones repetitivas entre un 40% y un 70%. Por esta razón es importante trabajar el fortalecimiento y el estiramiento de las estructuras cercanas a la articulación del tobillo luego de una lesión para disminuir el riesgo de sufrir una nueva. Un efectivo programa de rehabilitación empieza con ejercicios sin resistencia, progresando a ejercicios de resistencia y finalmente a actividades contra resistencia.

La fase primaria el tratamiento consta en guardar reposo, aplicar hielo en la lesión, comprimir ésta con un vendaje uniforme y elevar la zona lesionada por encima del nivel del corazón.

La fase secundaria consiste en la rehabilitación, la cual está conformada por tres clases de ejercicios: los de movilidad articular, los de potenciación muscular (fortalecimiento) y los de propiocepción.

### **1.4.1 Clasificación de los ejercicios empleados en la rehabilitación del tobillo**

En la tabla 3 y en la figura 10 se muestran únicamente los principales ejercicios pasivos empleados en la segunda etapa de rehabilitación del tobillo para los tres grados de esguince y la forma de realizar éstos, respectivamente, dado que es la única etapa del tratamiento que se abordará en este proyecto.

**Tabla 3**

*Ejercicios pasivos usados en la rehabilitación del tobillo*

Tipo de ejercicio	Descripción	
Movilidad articular	Su principal función radica en recuperar rango de movimiento. Deben realizarse sentados en una cama, camilla o colchoneta con las piernas extendidas y las rodillas rectas	Dorsiflexión Flexión plantar Inversión Eversión Movimientos circulares
Isométricos de fuerza	Se realizan con el fin de fortalecer los músculos cercanos a la articulación del tobillo, lo cual brindará mayor y mejor soporte a la articulación.	Eversión Inversión .
De resistencia para el aumento de fuerza	Se emplean para fortalecer los músculos cercanos a la articulación del tobillo, consiguiendo que éste adquiera mayor soporte. A diferencia de los isométricos de fuerza, estos ejercicios deben realizarse con una liga para ejercicio, una <i>theraband</i> o aplicando resistencia manual alrededor del tobillo	Dorsiflexión Flexión plantar Inversión Eversión

Nota. [14].

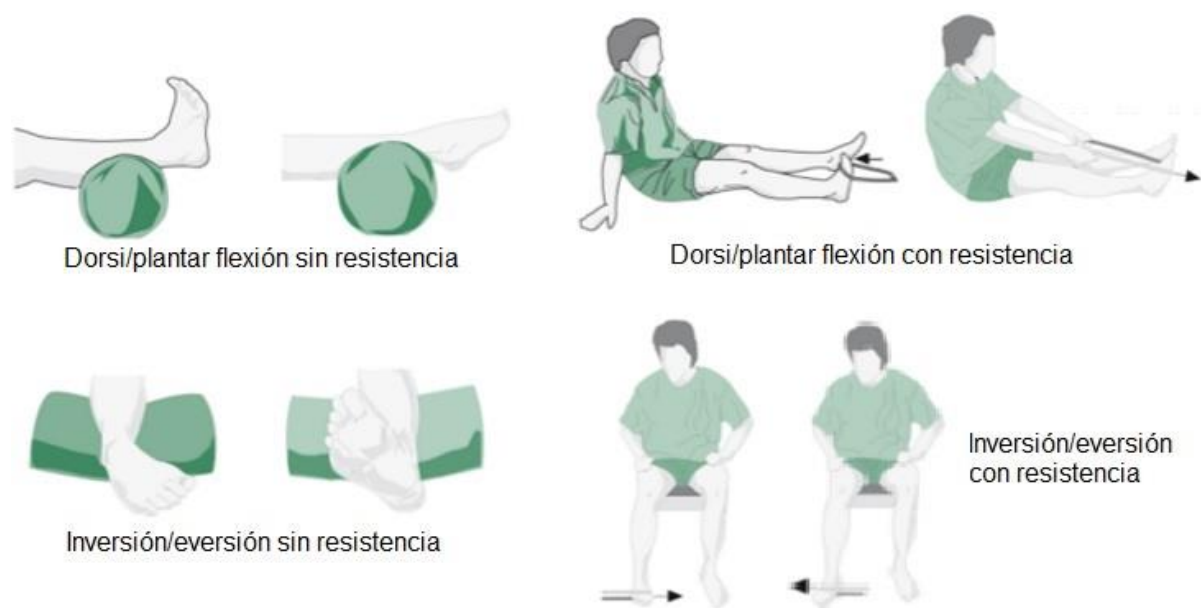


Figura 10. Realización de los ejercicios en la rehabilitación de tobillo [15].

## **1.5 Esguince de tobillo en México**

Anualmente, en el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) alrededor de 275,639 personas con esguince de tobillo son tratadas en los servicios de medicina familiar como parte de su tratamiento requieren varios días de incapacidad para la recuperación de la extremidad lesionada. Esto ocasiona ausentismo laboral lo que conlleva a consecuencias sociales y económicas. Dicha lesión es de las más frecuentes en la población: 85% de los casos se presentan en las actividades cotidianas mientras que el 15% son asociadas con la práctica deportiva y, como se mencionó anteriormente, entre 40 y 70% de los esguinces ocurren en un tobillo previamente lesionado.

Como ya se mencionó, el mecanismo de lesión más común es la supinación con una combinación de aducción e inversión del pie en flexión plantar; el cual se produce por medio de un golpe directo, una caída o un movimiento incorrecto del tobillo.

Por otro lado, las personas con alteraciones anatómicas del pie, sobrepeso y aquellas que presentan enfermedades como procesos neuropáticos, trombosis venosa, trastornos hematológicos y uso crónico de anti-inflamatorios o anticoagulantes poseen mayor riesgo de sufrir un esguince de tobillo [10].

Los tratamientos de los procesos patológicos de la región del tobillo pueden variar dependiendo de la gravedad de la lesión y de factores como edad, sexo, actividad laboral/deportiva y de la existencia o no de patologías asociadas.

## **1.6 Normatividad de los dispositivos médicos en México**

La industria de equipos médicos se ve afectada por una serie de sistemas reguladores, normas nacionales e internacionales y otros requisitos.

En México se publicó en el diario oficial de fecha 11 de octubre de 2012 la NOM 241-SSA1- 2012, Buenas Prácticas de Fabricación para establecimientos dedicados a la fabricación de dispositivos médicos, cuyo campo de aplicación es de observancia obligatoria en el territorio nacional para todos los establecimientos dedicados al proceso de dispositivos médicos comercializados en el país. Asimismo, la COFEPRIS (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios) es el órgano asignado para su control, verificación y otorgar los registros de cumplimiento a quienes implementen esta norma [16, 17].

Conforme a los estatutos de CANIFARMA (Cámara Nacional de la Industria Farmacéutica), la industria de dispositivos médicos se encuentra representada por dos secciones:

- Dispositivos Médicos PAPS. Agrupa a fabricantes y distribuidores autorizados de las distintas categorías de dispositivos médicos (material de curación desechable, bolsas para diálisis, guantes, vestimenta para cirugía, algodón, vendas, abatelenguas, materiales plásticos y metálicos requeridos en cirugía), así como material para la aplicación de medicamentos (jeringas, viales, bolsas, catéteres), o de carácter ortopédico.
- Reactivos y Sistemas de Diagnóstico (RSD). Representa a las compañías dedicadas a la industria del diagnóstico, cuya tecnología facilita por ejemplo la obtención de indicadores biométricos de los pacientes a través de pruebas clínicas, que son fundamentales en las etapas pre y post-operatorios. Así mismo representa también a fabricantes y distribuidores autorizados de Dispositivos Médicos [18].

En los últimos años, México se ubicó como el sexto exportador mundial de instrumentos y aparatos de medicina, cirugía, odontología y veterinaria (Global Trade Atlas), pues la producción de dispositivos médicos alcanzó un valor de 5,066 miles de dólares en 2009 y empleó a más de 99,500 personas.

En 2010 operaron en México 2,321 unidades económicas especializadas en dispositivos médicos, de las cuales aproximadamente 400 empresas son exportadoras; la mayoría de ellas, dedicadas a la manufactura y el ensamble.

Los principales estados de manufactura de dispositivos médicos son: Baja California, Chihuahua, Distrito Federal, Jalisco, Sonora, Nuevo León, Morelos, Tamaulipas y Estado de México [19].

## **1.7 Estado del arte**

En la figura 11 se muestra el dispositivo denominado “*TobiBot*” el cual sólo permite el movimiento de dorsiflexión y flexión plantar de tobillo. Asimismo, contiene una interfaz virtual con el usuario.



Figura 11. Sistema de Rehabilitación para el tobillo *TobiBot* [20].

En la figura 12, se muestra una máquina rehabilitadora de tobillo capaz de proporcionar el rango completo de los movimientos de dorsiflexión/flexión plantar e inversión/eversión.



Figura 12. Máquina de rehabilitación de tobillo [21].

En la figura 13 se muestra un prototipo virtual de un rehabilitador de tobillo basado en una configuración de robot paralelo de manera que proporcione los movimientos de dorsiflexión/flexión plantar e inversión/eversión, asimismo, cuenta con una plataforma fija y otra móvil donde se apoyará el pie del tobillo a rehabilitar.



Figura 13. Prototipo virtual de rehabilitador de tobillo [22].

En la figura 14 se muestra un rehabilitador de tobillo que permite realizar los movimientos de inversión/eversión y dorsiflexión/flexión plantar usando un solo actuador, además posee un mando que permite al usuario o profesional de la salud controlar los rangos de angulación de los movimientos antes mencionados, su velocidad y tiempo de trabajo. Cabe mencionar que permite al usuario recibir la terapia mientras está acostado o sentado.



Figura 14. Rehabilitador de tobillo [8].

En la figura 15 se muestra un rehabilitador de tobillo con el cual el usuario puede realizar los movimientos de inversión/eversión y dorsiflexión/flexión plantar mientras está en cama o sentado en una silla. El usuario es quien controla la velocidad y el rango de movimiento.



Figura 15. Kinetec breva máquina recuperación tobillo [23].

Al analizar el estado del arte, se observa que los dispositivos existentes en el mercado comparten la característica de realizar los movimientos de dorsiflexión y flexión plantar de manera libre y permiten establecerla duración de la sesión de ejercicios. También se observa que la tendencia de estos rehabilitadores radica en que el usuario pueda manipular más funciones de los mismos para mejorar la calidad de la terapia que recibirá.

## **CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL**

### **2.1 Identificación de las necesidades**

#### **2.1.1 Planteamiento del problema**

Como ya se mencionó, más de 270,000 personas son atendidas en los servicios de medicina familiar del IMSS debido al esguince de tobillo, siendo los más frecuentes los derivados de alguna actividad cotidiana. Además del tratamiento farmacológico, se recomienda realizar ejercicios de rehabilitación con el propósito de fortalecer los ligamentos afectados, mejorar el rango de movilidad y recuperar la propiocepción del pie afectado, evitando con esto que la persona presente alguna recaída. Por otro lado, el tratamiento también incluye de 7 a 21 días de incapacidad para la recuperación de la extremidad lesionada, lo cual implica ausentismo laboral y trae consigo consecuencias sociales y económicas.

#### **2.1.2 Necesidad básica**

Dado lo anterior, es necesario que la persona que ha sufrido esta lesión reciba una adecuada terapia de rehabilitación, para lo cual se requiere de un sistema capaz de proporcionar la rutina que el terapeuta considere conveniente para así evitar lesiones futuras en el mismo tobillo.

### **2.2 Requerimientos de diseño**

Luego de analizar los productos existentes en el mercado, se encontró que los dispositivos actuales únicamente permiten realizar sólo un tipo de ejercicio, no permiten realizar ejercicios de fortalecimiento y poseen grandes dimensiones, lo cual resulta poco práctico para el usuario. Es por ello que se propone el diseño de un dispositivo que permita realizar diversos tipos de ejercicios a lo largo de la terapia, ajustando el tiempo y el grado de resistencia que tendrán éstos, con la finalidad de ofrecer además de la recuperación del rango de movimiento, el fortalecimiento del tobillo.

Con el fin de conocer la opinión de los usuarios con respecto al uso de un dispositivo electrónico que los asistirá durante la rehabilitación, se aplicó una encuesta (ver apartado de anexos) cuya población objetivo consistió en hombres y mujeres de entre 17 y 66 años de edad que realizan actividad física con regularidad (6 horas a la semana en promedio), que han sufrido algún tipo de lesión en el tobillo y recibido rehabilitación o fisioterapia, ya sea de manera formal o informal. En la tabla 4 se muestran las características ordenadas de mayor a menor importancia, de acuerdo con el criterio de los usuarios.



**Tabla 4***Jerarquización de las características del dispositivo*

El dispositivo...	Fundamental	Muy importante	Importante	Poco importante	Nada importante
Realiza ejercicios para recuperar la movilidad	X				
Es pequeño (tamaño)		X			
Permite programar mis ejercicios de la sesión		X			
Permite ajustar la intensidad de los ejercicios		X			
Guarda el avance de mi terapia		X			
Tiene un programa de rehabilitación preestablecido		X			
Puedo usarlo en el pie derecho o en el izquierdo		X			
Sólo realiza un ejercicio				X	
Es ligero		X			
Funciona de forma automática		X			
Me permite ajustar el tiempo de mi terapia		X			
Es seguro	X				
Es pesado				X	
Indica la duración de mi terapia			X		
Es grande (tamaño)				X	
Realiza ejercicios de fortalecimiento		X			
Es portátil		X			

Con base en la jerarquización anterior, en el siguiente apartado se establecerán las especificaciones de diseño.

**2.3 Especificaciones de diseño**

Una *especificación* consiste en una métrica y un valor, el cual puede tomar varias formas, incluyendo un número particular, un rango o una desigualdad [24]. De acuerdo con la jerarquización de la tabla 4, las especificaciones se enlistan a continuación:

**Tabla 5***Especificaciones de diseño*

Variable a medir	Unidades	Rango de medición
Peso de la extremidad inferior	Kilogramos [kg]	5-9 [kg]
Ejercicios por movimiento articular	Número de ejercicios	1-2 ejercicios
Dimensiones del dispositivo	Centímetros [cm]	Largo: entre 60 y 70 [cm] Ancho: entre 25 y 30 [cm] Altura: entre 40 y 50[cm]
Rutinas de ejercicios	Series de ejercicios	1-3 series
Dificultad del ejercicio	Tipos de ejercicios	Libres y con resistencia
Resistencia ajustable	Kilogramos [Kg]	Entre 0.1 y 3 [kg]

Sujeción del pie	Número de elementos de sujeción	2-3 elementos
Rango de movimiento del sujetador de pie	Grados [°]	Dorsiflexión 20-29° Flexión plantar 37-45° Inversión 14-22° Eversión 10-17° Abducción 15-29° Aducción 22-36°
Base para el pie	Centímetros [cm]	Largo: entre 25 y 30 [cm] Ancho: entre 20 y 30 [cm] Altura: entre 5 y 10 [cm]
Peso del dispositivo	Kilogramos [kg]	5-15[kg]
Duración de la sesión	Minutos	15-30 minutos
Duración de la batería	Horas	3-6 horas

Es importante mencionar que el dispositivo contará con protecciones para evitar el riesgo de descargas eléctricas y daños en sus circuitos de funcionamiento; asimismo, se considera el uso de materiales antiderrapantes y aislantes para la sujeción del pie lesionado: lo anterior y la postura del usuario permitirán que éste conserve la posición correcta durante todo el tiempo que el rehabilitador se encuentre en operación. Por otra parte, el dispositivo se detendrá en caso de detectar alguna anomalía en su funcionamiento, o bien, el usuario podrá decidir en qué momento pausarlo de manera manual.

## 2.4 Proceso de selección de conceptos

El concepto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto que se diseña. Por lo general se expresa como un bosquejo o como un modelo tridimensional aproximado y a veces es acompañado de una breve explicación de su funcionamiento. El proceso de generación de conceptos empieza con las necesidades del cliente y su traducción a especificaciones, lo cual produce un conjunto de conceptos de los que se hará una selección final.

Asimismo, es conveniente dividir el desarrollo del producto de acuerdo con las funciones o aspectos que debe desempeñar con la finalidad de facilitar la búsqueda de soluciones y su posterior análisis [24].

Con base en lo anterior, a continuación se muestra el esquema general del proyecto, el cual tiene como entrada al sistema la presencia de una lesión causada por esguince en el tobillo, el sistema se representa como una caja negra y el fortalecimiento de los ligamentos como salida del mismo.

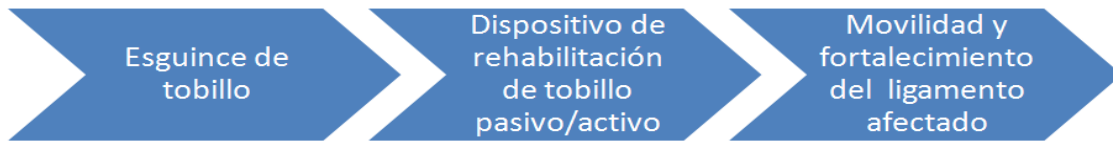


Figura 16. Esquema general del proyecto.

### 2.4.1 Descripción de funciones y generación de conceptos

En la figura 17 se presenta la descomposición del sistema en las principales funciones que debe desempeñar el dispositivo, las cuales se explicarán a detalle más adelante; asimismo, se muestran los posibles conceptos solución para cada una de ellas.

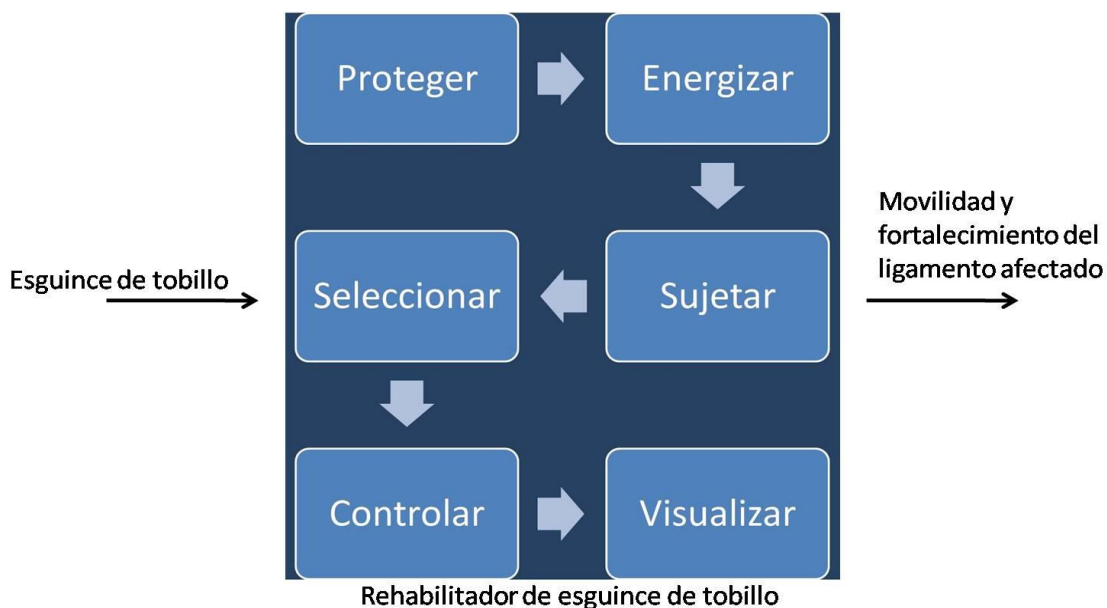


Figura 17. Identificación de las funciones del rehabilitador de tobillo.

- **Sujetar:** esta función está enfocada en la sujeción de la pierna al dispositivo para asegurar que el ejercicio será realizado por las áreas afectadas y la sujeción del pie al elemento que servirá como interfaz entre el dispositivo y la extremidad lesionada. A continuación, se muestran las ventajas y desventajas de los posibles conceptos solución.

**Tabla 6***Selección de conceptos para la sujeción*

Sujeción	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Estructura de metal	El material es resistente y permite una sujeción adecuada del pie	Estructura rígida y pesada, resulta difícil que se adapte a la forma del pie	La sujeción de la extremidad lesionada debe ser cómoda y segura para el usuario
Bandas de tela	Material agradable al tacto y ligero	Poca resistencia y durabilidad	
Velcro	Fácil de usar, resistente y ligero	Con el tiempo, se desgasta el material de unión	
Correas	Se pueden conseguir fácilmente; el ajuste se puede realizar de una manera sencilla	Se deben hacer varios nudos para asegurar que no se suelten, se desgastan rápidamente	
Resorte textil	Existen de diferentes tamaños y varía la resistencia que poseen	Puede causar irritación y lastimar la piel del usuario	

- Energizar: el dispositivo debe ser alimentado por alguna fuente de energía eléctrica para su funcionamiento. Debido a que las especificaciones indican que la alimentación debe ser de al menos 4 horas y no debe presentar ningún riesgo para el usuario ni para el circuito, a continuación, se mencionan las posibles soluciones, indicando sus ventajas y desventajas de uso.

**Tabla 7***Selección de conceptos para energizar el dispositivo*

Fuentes de alimentación	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Baterías desechables	Fácil adquisición y son de un tamaño conveniente para el dispositivo	El tiempo de vida útil es muy corto, además de contaminar el ambiente	
Baterías recargables	Su tiempo de vida útil es mayor respecto a las desechables, suministran diversos voltajes, son de diversos tamaños y formas	Con el tiempo pierden la capacidad de retener la carga, necesitan un dispositivo adicional para la recarga	Su capacidad en [mAh] varía según el tiempo de vida respecto al tiempo de uso

Eliminador	Fácil de usar, ligero, bajo costo de manufactura	Necesita estar conectado todo el tiempo a la corriente eléctrica, el cable se puede romper por el uso	
Celdas solares	Usan una fuente de energía limpia, no contamina el ambiente, son de diferentes tamaños, producen diversos voltajes	Necesitan un dispositivo adicional para conservar la carga, requieren un mantenimiento específico, el dispositivo tendría que estar al exterior para cargarse	
Generador de energía	Permite regenerar su energía por medio del movimiento del dispositivo, son de larga durabilidad	Su precio es elevado, suelen ser de grandes dimensiones	

- Seleccionar: el dispositivo permitirá realizar dos variantes de los ejercicios para el usuario: libres y con resistencia. Los ejercicios libres serán llevados a cabo de manera automática por el dispositivo con el fin de recuperar la movilidad, mientras que los de resistencia ayudarán al fortalecimiento del tobillo y se ajustarán al avance del usuario de manera gradual, bajo la supervisión del terapeuta.

Como ya se mencionó, el ejercicio que se realizará en la terapia depende completamente del movimiento articular del tobillo, es por ello que deben considerarse los diversos actuadores que permitan que los ejercicios sean realizados dentro del mismo.

Dado que los ejercicios libres se realizarán de manera automática, es de suma importancia establecer algunas de las especificaciones que debe poseer el actuador que se utilizará, entre ellas están el par que suministran, su demanda de corriente y el voltaje de operación. En la tabla 8 se muestran dichos parámetros.

**Tabla 8**

*Especificaciones que debe poseer el actuador*

Par suministrado	Entre 10 y 20 [Nm]
Demanda de corriente	Entre 4 y 6 [A]
Voltaje de operación	Entre 24 y 36[V]

Con base en lo anterior, la tabla 9 muestra las ventajas y desventajas de los posibles conceptos solución.

**Tabla 9**

*Selección de conceptos para el actuador*

Actuador	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Motor DC	Se puede controlar fácilmente, fácil instalación y adquisición	No son motores precisos, el par que proporcionan no es considerable	
Servomotor	Permite un mejor control de la velocidad del motor, posicionamiento preciso, existen servomotores con diferentes capacidades de carga	Rango de movimiento limitado (0° a 180°, ida y vuelta)	
Motor a pasos	Es posible controlar su velocidad y su posicionamiento es más preciso respecto a los motores de corriente directa	Requieren de un circuito de potencia externo, funcionan con diferentes voltajes	El sensado de la posición debe ser lo más exacto posible y se puede realizar sin ningún elemento adicional; el control de la velocidad debe permitir realizar movimientos suaves
Motorreductor	Se puede controlar fácilmente, fácil instalación y adquisición	No son motores precisos, el par que proporcionan no es considerable	

Ahora bien, los ejercicios con resistencia deben adaptarse al avance y condición del usuario. Asimismo, una de las especificaciones de diseño se refiere al ajuste de dicha resistencia, la cual debe estar entre 0.1 y 3 Kg. A continuación, se muestran los elementos que permitirán solucionar lo anterior, mencionando sus ventajas y desventajas.

**Tabla 10***Selección de conceptos para la resistencia*

Resistencia	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Resortes a tensión	Poseen diferentes formas, están manufacturados con diferentes materiales, absorben y guardan energía, funcionan con cargas contrarias	Poseen una constante de resorte única, requieren equipo adicional para su caracterización, es necesario más de un resorte para ajustar la resistencia del ejercicio	
Bandas	Fáciles de implementar, existen muchas clases para desarrollar diversas tareas, fáciles de conseguir	Se usan principalmente para transmitir potencia, son flexibles	
Pesas	Pueden ser de diferente masa, permiten ser intercambiadas, se mantienen estáticas durante toda la sesión	Deben incluirse por separado del dispositivo, necesitan un espacio adicional en el dispositivo, dificultan la transportación del dispositivo	El elemento que ofrece resistencia debe ajustarse al usuario y ser fácil de establecer y modificar
Poleas	Se puede ajustar la distancia entre ellas, fácil implementación	Se usan para transmitir potencia, funcionan con otros elementos como las bandas, son flexibles	

- Controlar: el usuario podrá ingresar los parámetros para que el dispositivo funcione de manera *automática*, tales como la duración de la sesión y la serie de ejercicios a realizar, o bien, el periodo de ejercicios y descansos cuando se selecciona el modo *con resistencia*. De la misma forma, esta función hace referencia al microcontrolador que se encargará de la operación del dispositivo de manera automática.

Para el ingreso de los parámetros de funcionamiento, debe considerarse que el usuario se encargará de establecerlos de acuerdo a sus necesidades, por lo tanto, los elementos para dicha configuración deben ser de fácil acceso y manipulación, además de estar a su alcance durante todo el tiempo que el dispositivo se encuentre en operación. Éstos se muestran en la tabla 11, indicando sus ventajas y desventajas.

**Tabla 11***Selección de conceptos para el control del dispositivo*

Ingreso de parámetros	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Teclado numérico	Permite ingresar números al dispositivo, fácil implementación, es un elemento que le resulta familiar al usuario	Generalmente poseen grandes dimensiones, con el uso constante los números se borran de las teclas	
Botones	Hay de diversos tamaños, son resistentes al mal uso del usuario, son de fácil acceso, son de colores	Suelen usarse para realizar una sola función, si se dañan tienen que reemplazarse	
Pantalla <i>touch</i>	Permite ingresar y desplegar datos, el usuario está familiarizado con este elemento	No son resistentes, en ocasiones los caracteres no se pueden ingresar correctamente, algunas necesitan un dispositivo adicional para funcionar correctamente, no se ve bien sin la iluminación adecuada, si no se tiene el cuidado adecuado, la pantalla se puede dañar (rompimiento de la pantalla, pérdida de la sensibilidad de la misma)	
Aplicación para <i>Smartphone</i>	El usuario puede controlar todo el dispositivo con su <i>smartphone</i> , la aplicación se instala una sola vez, permite guardar el avance del usuario y llevar un registro de las actividades realizadas, proporciona <i>feedback</i> visual y auditivo, está con el usuario todo el tiempo, funciona de forma inalámbrica	Compatibilidad de software, requieren un lenguaje de programación especial, si se termina la batería del <i>smartphone</i> , el dispositivo deja de funcionar a menos que éste cuente con su propio sistema de control, durante la operación del dispositivo pueden surgir fallas con la conexión inalámbrica	



Control remoto	Permite controlar el dispositivo a distancia (al menos 5 metros), el usuario puede tener consigo el mando mientras recibe la terapia	Es necesario ingresar y desplegar la información al mismo tiempo en el mismo dispositivo, requiere un dispositivo adicional, puede extraviarse. Siendo así, el dispositivo deberá contar con un sistema de control manual	
----------------	--	---	--

Respecto a la programación del dispositivo, se realizó una tabla comparativa con las principales características de Arduino Uno y el PIC16F877A para analizar a detalle las ventajas que proporciona el uso de cada uno de estos microcontroladores y poder seleccionar el que mejor se adapte a los requerimientos del dispositivo. Debido a que el lenguaje de programación que se utiliza al trabajar con Arduino está basado en C++, es más sencillo realizar el código para el dispositivo, además de tener la ventaja de no necesitar un quemador en particular para poder cargar el programa al microcontrolador. Otra de las ventajas de Arduino, es que permite hacer correcciones en el código de tal manera que se puede probar la funcionalidad del programa casi de manera inmediata.

### Tabla 12

*Características de Arduino ATmega328P y el microcontrolador PIC16F877A*

	Arduino Uno	PIC16F877A
Microcontrolador	ATmega328P	PIC16F877A
Voltaje de operación	5 V	2-5.5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V	2-5.5 V
Voltaje de entrada (límites)	6-20 V	2-5.5 V
Puertos digitales I/O	14 (de los cuales 6 son salidas PWM)	5 (2 módulos de captura/comparación/PWM)
Puertos analógicos	6	8
Corriente continua por I/O puertos	20 mA	
Corriente continua para 3.3V puertos	50 mA	
Memoria flash	32KB de los cuales 0.5 KB son usados para el arranque	256 Bytes- 256 KB
SRAM	2 KB	368 Bytes
EEPROM	1 KB	256 Bytes
Velocidad del reloj	16 MHz	20 MHz

Nota. [25, 26].

- Visualizar: una vez establecidos todos los parámetros de operación, se inicia la terapia y éstos son desplegados para que el usuario esté al tanto de la selección realizada. A continuación, se muestran en la tabla 13 las posibles soluciones, indicando sus ventajas y desventajas.

**Tabla 13**

*Selección de conceptos para la visualización*

Visualización	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Aplicación para <i>smartphone</i>	El usuario puede controlar todo el dispositivo con su <i>smartphone</i> , la aplicación se instala una sola vez, permite guardar el avance del usuario y llevar un registro de las actividades realizadas, proporciona <i>feedback</i> visual y auditivo, está con el usuario todo el tiempo	Compatibilidad de software, requieren un lenguaje de programación especial, si se termina la batería del <i>smartphone</i> , el dispositivo deja de funcionar a menos que éste cuente con su propio sistema de control	
Computadora	Permite ingresar y desplegar datos, proporciona <i>feedback</i> visual y auditivo	No permite que el dispositivo sea portátil, es necesario crear una interfaz de usuario y comunicarse con el dispositivo alámbrica y/o inalámbricamente	
Pantalla <i>touch</i>	Permite ingresar y desplegar datos, el usuario está familiarizado con este elemento	No son resistentes, en ocasiones los caracteres no se pueden ingresar correctamente, algunas necesitan un dispositivo adicional para funcionar correctamente, no se ve bien sin la iluminación adecuada, si no se tiene el cuidado adecuado, la pantalla se puede dañar (rompimiento de la pantalla, pérdida de la sensibilidad de la misma)	

Pantalla LCD	Son pequeñas, fácil programación e implementación	Despliegan pocos caracteres, sólo ofrecen <i>feedback</i> visual, no se ve bien sin la iluminación adecuada, no permiten ajustar el brillo fácilmente	
Sistema de diodos led y <i>buzzers</i> indicadores	Proporcionan <i>feedback</i> visual y auditivo, fáciles de conseguir, no requieren mantenimiento, existen en diferentes tamaños	Necesitan una configuración especial en el dispositivo, el <i>buzzer</i> puede producir un sonido poco agradable para el usuario	

- Proteger: el rehabilitador debe garantizar la seguridad del usuario durante toda su operación, de este modo, dicha función puede dividirse como se muestra en la figura 18.

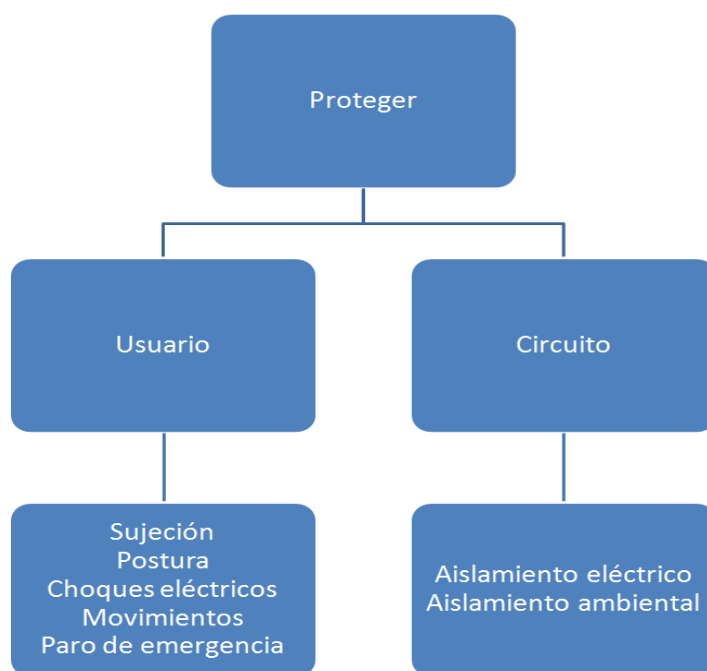


Figura 18. Aspectos de seguridad que debe cumplir el dispositivo.

Es de suma importancia recalcar que la seguridad se ha considerado a lo largo de toda la selección de conceptos de acuerdo con la función en la cual debe estar presente. La protección del circuito consistirá en elementos electrónicos que garanticen que no se presentarán descargas eléctricas, regresos de corriente ni sobrecarga de la batería, además, contará con una carcasa fabricada con un material aislante, consiguiendo que el

circuito esté protegido contra las condiciones ambientales donde se use el dispositivo y evitando que éste sea manipulado por el usuario. De igual forma, el rango de movilidad será limitado tanto por los elementos mecánicos como por la programación del dispositivo, asegurando su correcta operación dentro del rango establecido en las especificaciones de diseño.

#### **2.4.2 Conceptos solución**

Luego de considerar las ventajas y desventajas de las posibles soluciones para cada una de las funciones que tendrá el dispositivo, a continuación, se muestran los conceptos solución para cada una de ellas.

- Se propone una estructura metálica para colocar la pierna con la finalidad de tener la posición adecuada al realizar la terapia cuyas dimensiones permitan al usuario estar sentado mientras realiza los ejercicios. Para la base donde deberá colocarse el pie, se propone el uso de una estructura adicional que posea una plantilla de algún material que brinde confort al usuario y cuente con espacios donde colocar las pesas para realizar los ejercicios de resistencia.
- La sujeción de la pierna y el pie a sus respectivas estructuras, se realizará se realizará a través de correas ajustables mediante velcro ya que le permiten al usuario elegir aquel que le brinde comodidad para usar el rehabilitador.
- Para energizar al dispositivo se seleccionaron el eliminador y las baterías recargables, puesto que el usuario puede elegir utilizar el dispositivo mientras se carga la batería o bien, cuando la batería está completamente cargada; además, permiten que el dispositivo sea portátil.
- Respecto a la función seleccionar, es importante mencionar que esta se refiere tanto a los ejercicios libres como a los que llevan resistencia. Así, para la ejecución automática de los ejercicios libres se seleccionó como actuador el motor a pasos puesto que se controlará con la tarjeta de programación Arduino Mega mediante PWM y se desactivará cuando el dispositivo funcione en la modalidad “*ejercicios con resistencia*”. De esta manera, el par que produce el motor no está presente y el eje gira libremente, sin comprometer el funcionamiento propio del motor ni demandar más corriente eléctrica para intentar mover la carga extra que aportan las pesas usadas en dichos ejercicios. Debido a que los motores a pasos aumentan sus dimensiones y en consecuencia, su peso, a medida que el par que suministran es mayor, es necesario que el actuador del dispositivo cuente con un sistema de transmisión, el cual consiste en engranes de reducción, consiguiendo que la relación de transmisión sea adecuada al movimiento del tobillo que desee ejecutarse (la descripción de los actuadores y su acondicionamiento electrónico se explicará a detalle en el capítulo 4). Para la realización de ejercicios con resistencia,

el dispositivo contará con pesas intercambiables las cuales se colocarán en la base para el pie de acuerdo con el ejercicio que se desee realizar (dorsiflexión o flexión plantar); de esta forma, la resistencia se podrá ajustar desde el inicio tomando como referencia la carga con la que el pie sano puede ser “rehabilitado” sin presentar molestias y de acuerdo con la valoración del terapeuta.

- Como ya se mencionó, la función controlar se divide en el microcontrolador que se usará en el dispositivo (el microcontrolador ATmega1280 de la tarjeta Arduino Mega) y la forma en la que el usuario ingresará los parámetros para que el dispositivo funcione según los ejercicios y terapia que se vaya a realizar. En este aspecto, los conceptos seleccionados son una aplicación para *smartphone* que se comunicará con el dispositivo vía *Bluetooth*, la cual se desarrollará para el sistema operativo Android, una pantalla LCD y tres botones: *Parar*, *Iniciar* y *Pausa*; con el fin de controlar el dispositivo de manera manual en caso de que se pierda la conexión inalámbrica.
- De la misma forma, la función visualizar utilizará como conceptos solución la aplicación para *smartphone*, una pantalla LCD y el arreglo de diodos led y *buzzers*, con el propósito de otorgar *feedback* visual y auditivo al usuario.

# Conceptos Solución

Sujetar	Base metálica con elementos antiderrapantes Correas ajustables de velcro	
Energizar	Eliminador Baterías recargables	
Seleccionar	Ejercicios libres (actuador)	Motor a pasos 
	Ejercicios con resistencia	Pesas intercambiables 
Controlar	Microcontrolador	Arduino 
	Interfaz de usuario	Aplicación para Smartphone 
Visualizar	Aplicación para smartphone Arreglo de diodos led y buzzers	

Fig. 19 Conceptos solución.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DE CONFIGURACIÓN

A través del diseño de configuración se analizan y evalúan las distintas alternativas para la asignación y distribución del espacio que será ocupado por los sistemas que conforman el prototipo. Algunas de las estrategias para distribuir dichos sistemas se refieren a la realización de bosquejos y esquemas de dibujo en papel o en CAD (*Computer-aided design*), con los cuales se busca establecer las bases para el diseño de detalle.

### 3.1 Diseño de configuración del rehabilitador

Como se mencionó en el capítulo 2, el dispositivo de rehabilitación consta de las siguientes funciones: sujetar, energizar, seleccionar, controlar y visualizar. Dichas funciones pueden englobarse en dos grandes sistemas: el sistema mecánico y el sistema electrónico. Dentro

de cada uno de ellos encontramos los siguientes elementos, tal como se ilustra en la figura 20.

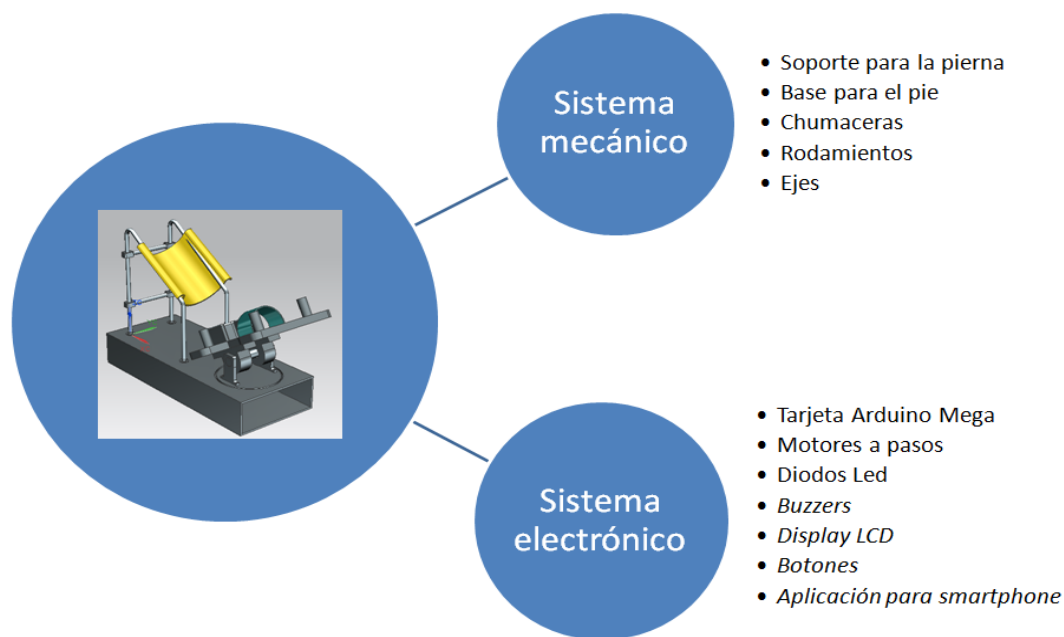


Figura 20. Sistemas y componentes del rehabilitador.

Es importante mencionar que el diseño de este dispositivo corresponde a un diseño mecatrónico, sin embargo, está resuelto principalmente para su parte mecánica puesto que es de suma importancia definir aspectos fundamentales como son la movilidad que debe tener la base para el pie, la sujeción de la extremidad al rehabilitador, los componentes que garantizan la correcta realización de los ejercicios, la selección de materiales, así como las geometrías y dimensiones de las piezas y del propio dispositivo; no obstante, se propone un sistema electrónico para el control del rehabilitador con el fin de explicar su funcionamiento y la manera en cómo podrá ser utilizado por el usuario.

Dentro de las diferentes configuraciones que se realizaron para el sistema mecánico, se tienen dos elementos que son fundamentales para el correcto funcionamiento del dispositivo: uno se refiere a la base para el pie, puesto que es donde se realizarán los ejercicios de la rehabilitación y debe permitir al usuario colocarlo en una posición que sea cómoda para el mismo y brinde la sujeción adecuada; mientras que la segunda corresponde a la base para la pierna lesionada: debido a que el dispositivo funcionará

cuando el usuario esté sentado, es fundamental que ésta sea colocada a 30° respecto al suelo sin cambiar de posición durante el tiempo que el rehabilitador sea utilizado.

De esta forma, el diseño de configuración de ambos elementos acompañado de aquellos que conforman el rehabilitador se muestran a continuación.

### 3.1.1 Configuración 1

Esta configuración consta de dos barras circulares dobladas colocadas en una base sólida mediante bridas; dichas barras cumplirán la función del soporte para la pierna que recibirá la terapia (Figura 21a).

Para la base para el pie (color verde), se propone una pieza triangular que tendrá una sección hueca por la cual se deslizará dicha base mediante un eje (color azul) para que el pie realice el movimiento de abducción/aducción. Además, se propone el uso de dos barras circulares: la primera funciona como soporte para las piezas ya mencionadas y el segundo, sujetará los actuadores del dispositivo (Figura 21b).

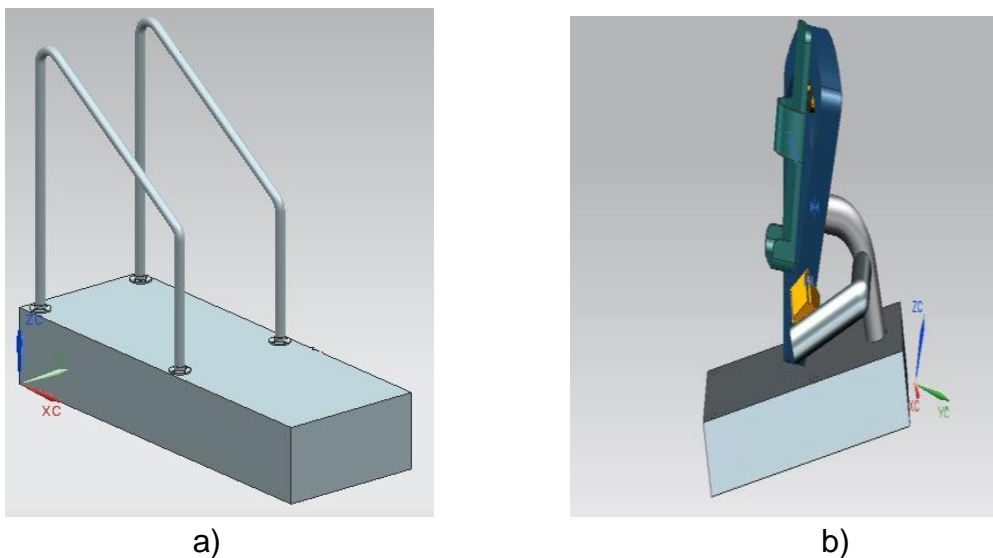


Figura 21. Configuración 1 del dispositivo.

### 3.1.2 Configuración 2

En la configuración 2, se conservan las barras circulares para el soporte de la pierna, sin embargo, se agrega un par de postes con sus respectivas abrazaderas en la parte posterior para brindar mayor soporte a la extremidad y como medida de seguridad para asegurar que la pierna siempre estará en la posición deseada. Asimismo, se propone una base hueca y más ancha, la cual posee una pieza adicional que permite la movilidad de toda la estructura de la base del pie para realizar el movimiento de abducción/aducción



(base móvil) y permite albergar el actuador correspondiente a dicho movimiento dentro de la base, sin necesidad de los soportes mencionados en la configuración 1 (Figura 22a).

Respecto a la base para el pie, se elimina la pieza triangular (color azul) puesto que su función es trasladada a la pieza adicional de la base del dispositivo y se agregan los compartimientos donde serán colocadas las pesas para realizar la terapia activa.

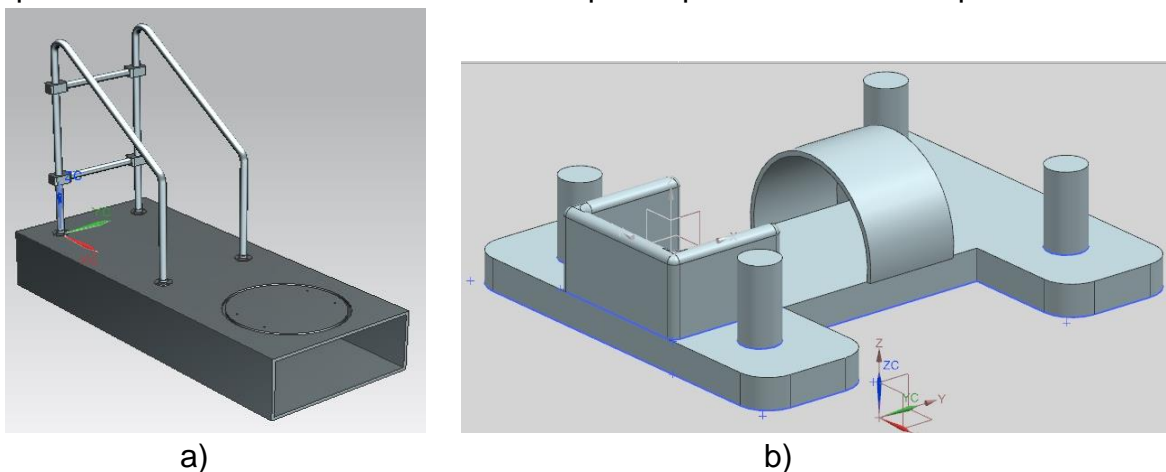


Figura 22. Configuración 2 del dispositivo.

### 3.1.3 Configuración 3

En esta configuración, se agrega una pieza al soporte de la pierna la cual busca ser más cómoda para el usuario puesto que permite su ajuste antes de recibir la terapia; también se agregan a la base móvil (mencionada en la configuración 2) un par de chumaceras para que pueda llevarse a cabo la dorsiflexión/flexión plantar (Figura 23a). De la misma forma, a la base para el pie se le agregan un par de chumaceras en la parte inferior y un eje el cual permitirá el movimiento antes mencionado.

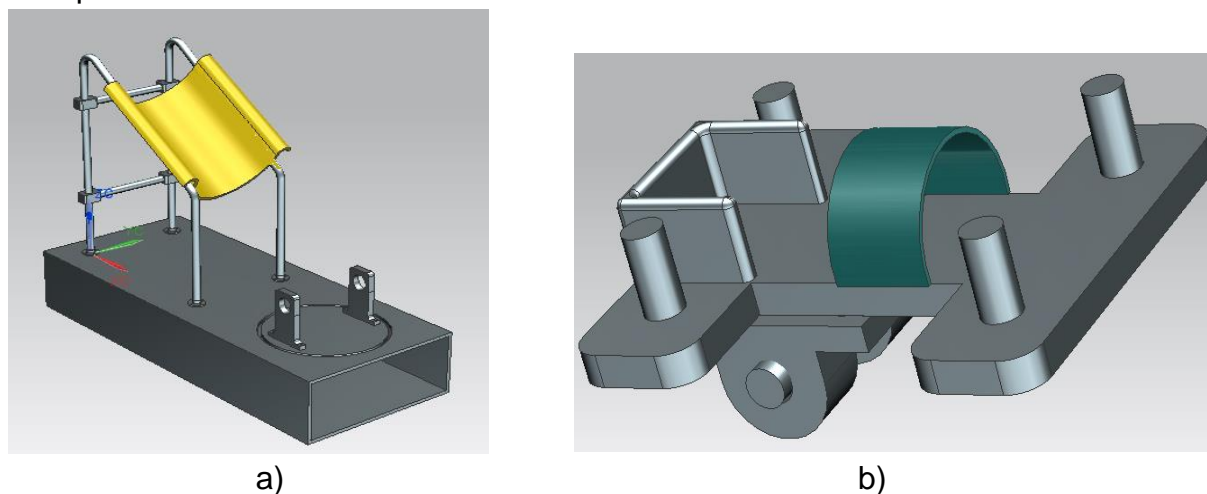


Figura 23. Configuración 3 del dispositivo.

### 3.2 Selección de configuración

La figura 24 muestra la configuración final del rehabilitador de tobillo, la cual consta de dos barras circulares unidas a una base hueca mediante bridas y separadas entre sí a través de un par de ejes con sus respectivas abrazaderas que servirán como soportes para la pierna; una pieza destinada a la sujeción de la pantorrilla al soporte de la pierna, la cual es ajustable mediante correas y velcro; la base para el pie (acondicionada con un segmento ajustable para la comodidad del pie, cuyo ajuste se realiza igualmente con correas y velcro para la comodidad del usuario) acondicionada con un par de chumaceras, su eje y su actuador, los cuales proporcionarán el movimiento de dorsiflexión /flexión plantar y se ensamblarán con las bridas colocadas en la base móvil para realizar en conjunto el movimiento de abducción/aducción, así como los espacios destinados para colocar las resistencias para realizar la terapia de fortalecimiento.

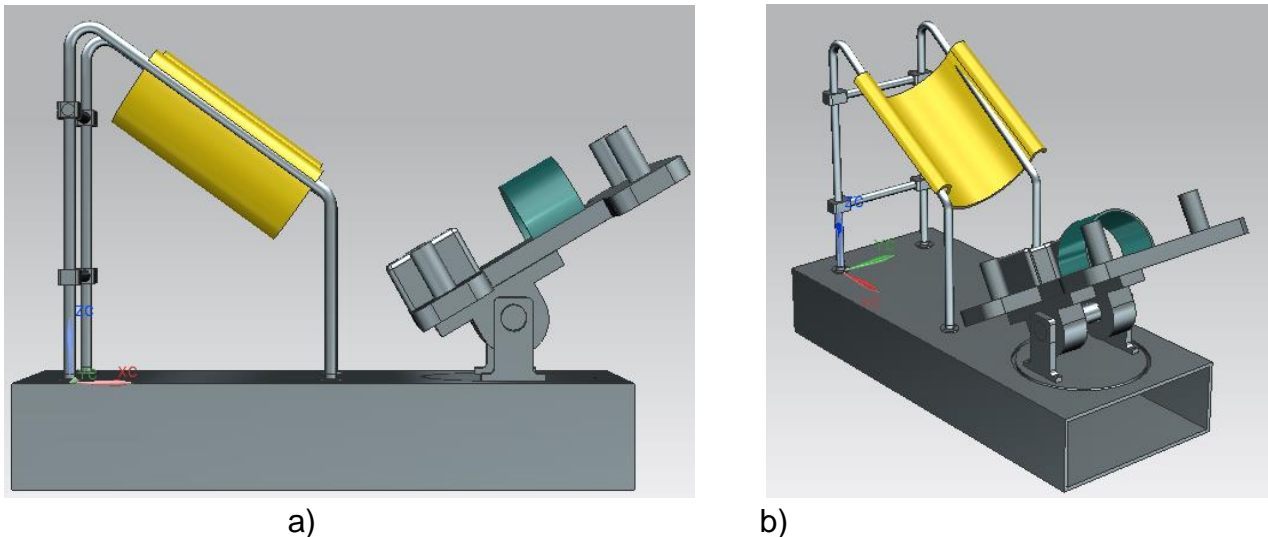


Figura 24. Ensamble del dispositivo de rehabilitación: a) Vista lateral b) Vista isométrica.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE DETALLE

La fase de diseño de detalle incluye la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto y la identificación de todas las partes estándar a ser adquiridas de proveedores [24].

En este capítulo se muestran los elementos finales que componen a los sistemas mecánico y electrónico, explicando el funcionamiento de cada uno; asimismo, se incluye un apartado donde se muestra la programación del dispositivo.

## 4.1 Parámetros de la carga y características de los actuadores

En primer lugar, es necesario establecer algunos parámetros adicionales que permitan realizar el cálculo del par necesario que debe proporcionar el actuador: tal es el caso del peso del pie y la distancia máxima del brazo de palanca existente entre el eje del motor y el punto más lejano de la base para el pie.

Con base en un estudio publicado en 2012, el hombre mexicano pesa 74.8 kilogramos, mientras que las mujeres pesan 68.7 kilogramos, en promedio [27]. Dado que el dispositivo está pensado para que sea utilizado por ambos géneros, se realiza el cálculo del promedio de los pesos como se muestra a continuación:

$$\text{peso promedio} = \frac{(74.8 [kg] + 68.7 [kg])}{2} = 71.75 [kg]$$

Debido a que en el diseño del rehabilitador se conocen las cargas, los esfuerzos presentes en sus piezas, el entorno donde operará el mismo (interiores) y se evaluaron las características de diversos materiales con la finalidad de obtener aquel que operará bajo las condiciones requeridas por el dispositivo, el factor de seguridad que se aplicará en los cálculos siguientes será de 1.5. Así, al multiplicar el peso promedio por el factor de seguridad se tiene:

$$\text{peso calculado} = 71.75 [kg] * 1.5 = 107.625 \approx 108 [kg]$$

Para determinar cuál es el peso correspondiente a las extremidades inferiores de la población mexicana, se tomaron como referencia los valores indicados en la tabla 14, los cuales corresponden a la población de Estados Unidos, debido a la ausencia de datos y parámetros validados por alguna institución nacional.

**Tabla 14**

*Porcentaje de peso corporal correspondiente a partes específicas del cuerpo*

Parte del cuerpo	Porcentaje
Tronco sin miembros	50
Mano	0.7
Antebrazo con mano	2.3
Antebrazo sin mano	1.6
Parte superior del brazo	2.7
Brazo completo	5
Pie	1.5

Parte inferior de la pierna con el pie	5.9
Parte inferior de la pierna sin el pie	4.4
Muslo	10.1
Pierna completa	16

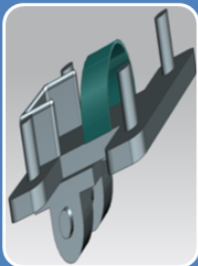
Nota, [28].

Como se puede observar, el porcentaje del peso corporal correspondiente al peso del pie y a la parte inferior de la pierna con el mismo es 1.5% y 5.9%, respectivamente, entonces:

$$Peso\ pie = 108 [kg] * 0.015 = 1.62 \approx 2 [kg]$$

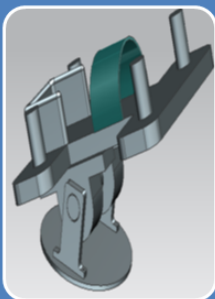
$$Peso\ pierna = 108 [kg] * 0.059 = 6.372 \approx 6 [kg]$$

Ahora bien, los componentes del dispositivo de rehabilitación asociados a cada uno de los movimientos se ilustran en la figura 25.



### Elementos mecánicos para las flexiones

- Base para el pie
- Eje
- Chumaceras (2)



### Elementos mecánicos para el movimiento combinado

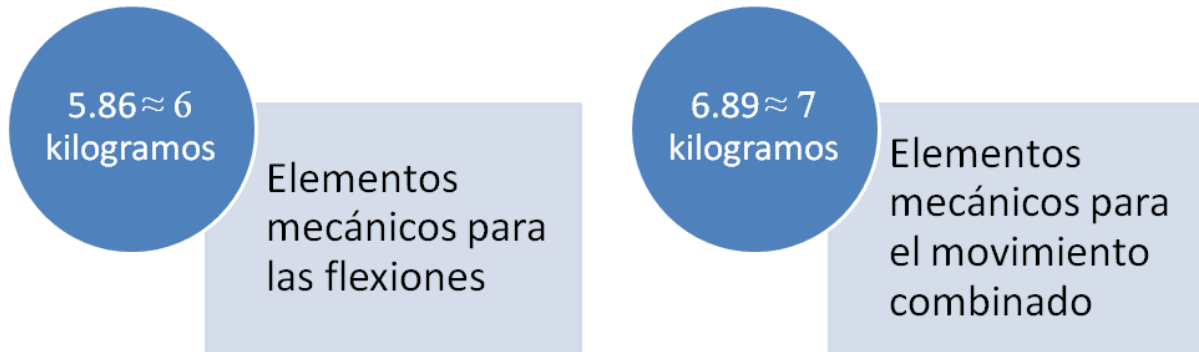
- Base para el pie
- Eje
- Chumaceras (4)
- Base giratoria

Figura 25. Elementos mecánicos de los movimientos

De la simulación realizada en el software *NX 8.5 Unigraphics*, una vez establecido el material de los componentes del dispositivo, se obtuvieron los siguientes resultados respecto al peso de los elementos mecánicos para cada uno de los movimientos, quedando como sigue:

**Tabla 15**

*Peso de los elementos mecánicos de los movimientos*



Así, el cálculo para el peso total que deben mover los actuadores se refiere a la suma del peso de los elementos mecánicos y el peso del pie, resultando ser 8 kilogramos para las flexiones y 9 kilogramos para el movimiento combinado.

Una vez que se determinaron los parámetros de carga, posteriormente se calcula el par de torsión necesario que deben proporcionar los motores para realizar los movimientos correspondientes. La figura 33 muestra el Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de las piezas involucradas en los mismos.

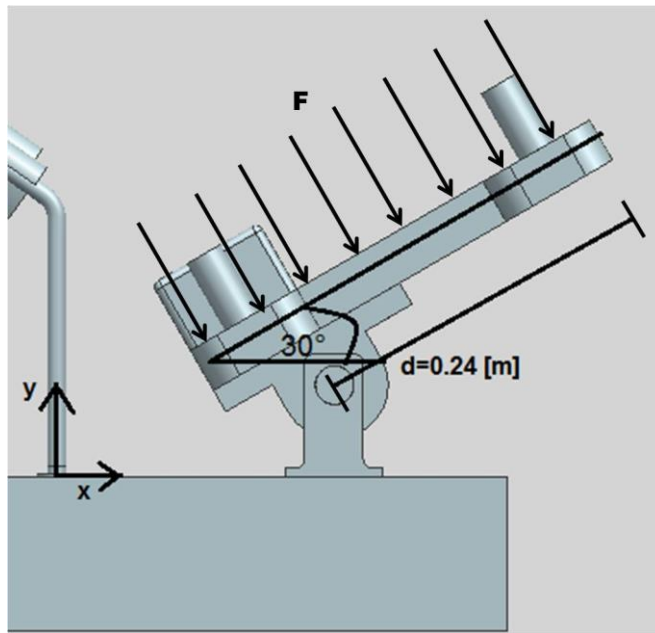


Figura 26. Diagrama de Cuerpo Libre (DCL)

Para el motor de las flexiones se tiene, considerando el par máximo al estar la base para el pie completamente horizontal y tomando en cuenta que la carga se comporta de manera distribuida y aplicada en el final de la distancia:

$$\begin{aligned} \text{Par suministrado} &= \text{Fuerza} * \text{distancia} \\ \text{Par suministrado} &= \left(8 \text{ [kg]} * 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]\right) * \cos^2(30) * 0.24 \text{ [m]} = 14.13 \approx 14 \text{ [Nm]} \end{aligned}$$

Mientras que para el motor del movimiento combinado resulta, considerando la carga adicional de las pesas para realizar los ejercicios de resistencia:

$$\text{Par suministrado} = \left(12.5 \text{ [kg]} * 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]\right) * 0.13 \text{ [m]} = 15.94 \approx 16 \text{ [Nm]}$$

## 4.2 Diseño mecánico del rehabilitador

### 4.2.1 Selección de materiales mediante el método Ashby para soporte de la pantorrilla y del dispositivo completo

En esta sección se llevó a cabo un análisis para la selección de materiales empleando el método Ashby con ayuda del *software CES EduPack*, mediante el cual se eligen las propiedades mecánicas que se desea estén presentes en las piezas a manufacturar. Una vez establecido lo anterior, el *software* genera un gráfico donde despliega los materiales que mejor se adecúan a los parámetros determinados por el diseñador.

Para esto, se obtiene el índice de funcionalidad, el cual considera la condición del problema, la geometría del componente y las propiedades del material. A continuación, se muestra el desarrollo realizado para obtener dicho índice.

Primeramente, es necesario identificar los atributos a ser maximizados o minimizados. Para el rehabilitador, se desea maximizar el esfuerzo de fluencia  $[\sigma_y]$  y minimizar el peso  $[w]$ .

En segundo lugar, se desarrolla una ecuación para estos atributos en términos de los requerimientos funcionales, la geometría y las propiedades del material, dicha ecuación se denomina función objetivo.

Considerando que la masa es una constante que está directamente relacionada con el peso del rehabilitador, pues  $w = m * g$ , es posible obtener la función objetivo a partir de los parámetros que también se relacionan con ella. De esta forma, otra ecuación en la que interviene el parámetro de la masa se refiere a la que permite calcular la densidad, así, ésta puede expresarse como  $\rho = \frac{m}{V}$  (donde  $m$  es la masa del objeto y  $V$  su volumen).

Dado lo anterior, la función objetivo resulta:

$$m = \rho * V$$

Una vez obtenida la función objetivo, se procede a identificar las variables libres, es decir, aquellas que no están restringidas y se relacionan directamente con la geometría que se requiere. En este caso, las bases (para el pie y del propio dispositivo) se comportan geométricamente como un prisma rectangular, cuya fórmula para obtener el volumen es  $V = b * h * l$  (donde  $b$  y  $h$  se refieren al largo y ancho de la base del rectángulo, respectivamente, y  $l$  es la altura del prisma).

Por otra parte, la ecuación para calcular el esfuerzo es  $\sigma = \frac{P}{A}$  (donde  $P$  es la presión y  $A$  es el área de aplicación). Considerando la fórmula del volumen, la ecuación para calcular el esfuerzo puede reescribirse como:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$
$$\sigma = \frac{P}{b * h}$$

Quedando como variable libre el parámetro  $b$ , el cual, despejándolo de la ecuación anterior queda:

$$b = \frac{P}{\sigma * h}$$

Ahora bien, sustituyendo  $b$  en la función objetivo se tiene:

$$m = \rho * V$$
$$m = \rho * (b * h * l)$$
$$m = \rho * \left( \frac{P}{\sigma * h} * h * l \right)$$
$$m = \rho * \left( \frac{P}{\sigma} \right) * l$$
$$m = \frac{P * \rho * l}{\sigma}$$

Entonces, el índice de funcionalidad puede escribirse de la siguiente manera:

$$IF = [F][G][M]$$

Donde F es la condición del problema ( $P$ ), G es la geometría del componente ( $l$ ) y M son las propiedades del material ( $\rho, \sigma$ ). Así, el índice de funcionalidad resulta:

$$IF = [P][l] \left[ \frac{\rho}{\sigma} \right]$$

De tal manera, es posible expresar el índice de funcionalidad en función de los atributos del material, quedando:

$$IF = \left[ \frac{\rho}{\sigma} \right]$$

Con estas propiedades se ingresa al software de *CES EduPack* para obtener un gráfico de Ashby en el cual trazaremos una línea recta con pendiente  $>1$  y los materiales que se encuentren próximos a la recta, serán los candidatos para el proyecto.

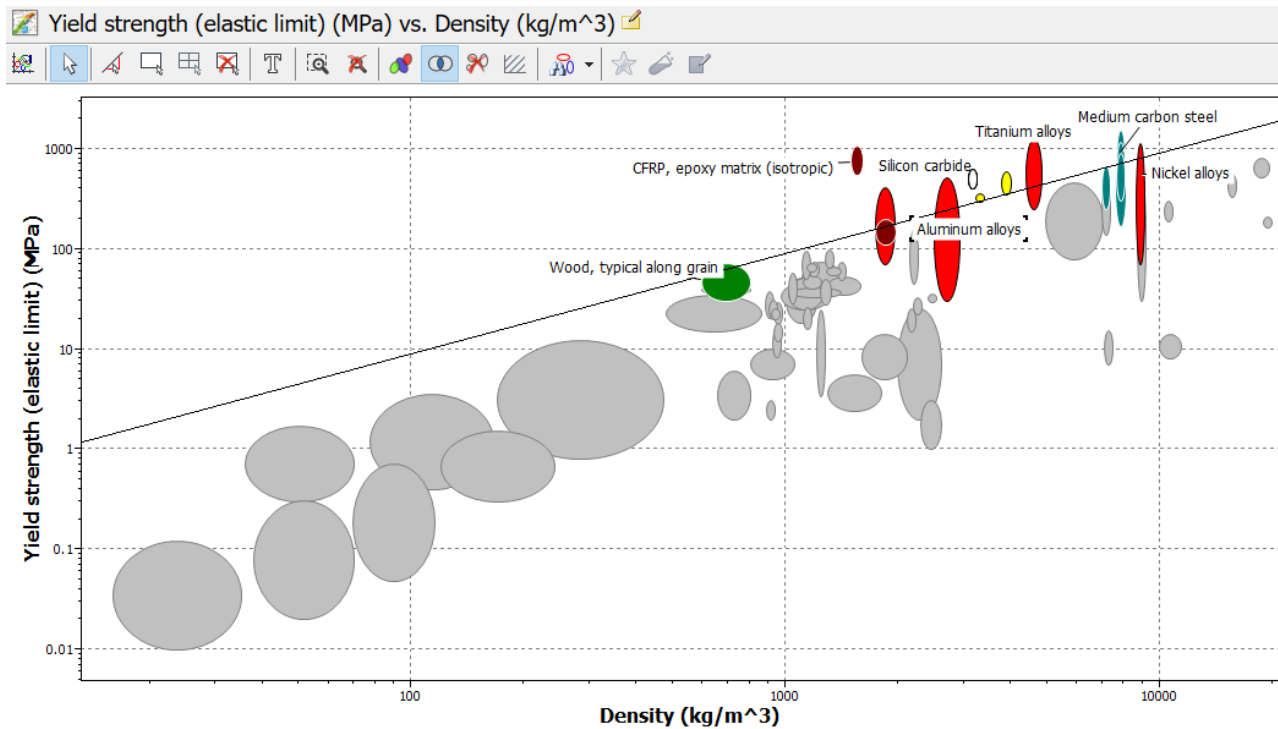


Figura 27. Materiales candidatos obtenidos mediante el índice de funcionalidad.



Para el rehabilitador, se requiere que las piezas posean una baja densidad para conseguir que el dispositivo sea ligero, además de una alta resistencia dada la carga a la que serán sometidas. Del gráfico anterior, algunos de los materiales obtenidos fueron el Titanio y sus aleaciones, Carburo de Silicio, Acero de medio carbono y el Aluminio y sus aleaciones, resultando éstos últimos como los materiales más adecuados.

#### 4.1.2 Selección de materiales mediante el método Ashby para la plantilla

Se propone una plantilla que estará colocada sobre la base para el pie con la finalidad de proteger la articulación. Para esta pieza se realizó un análisis considerando materiales con baja dureza, debido a que se encontrará en contacto directo con la extremidad lesionada; además, debe tener una baja elongación para evitar que con el uso la plantilla se deforme. A continuación, se muestra una gráfica con los materiales obtenidos de los cuales destacan las espumas de diferentes densidades.

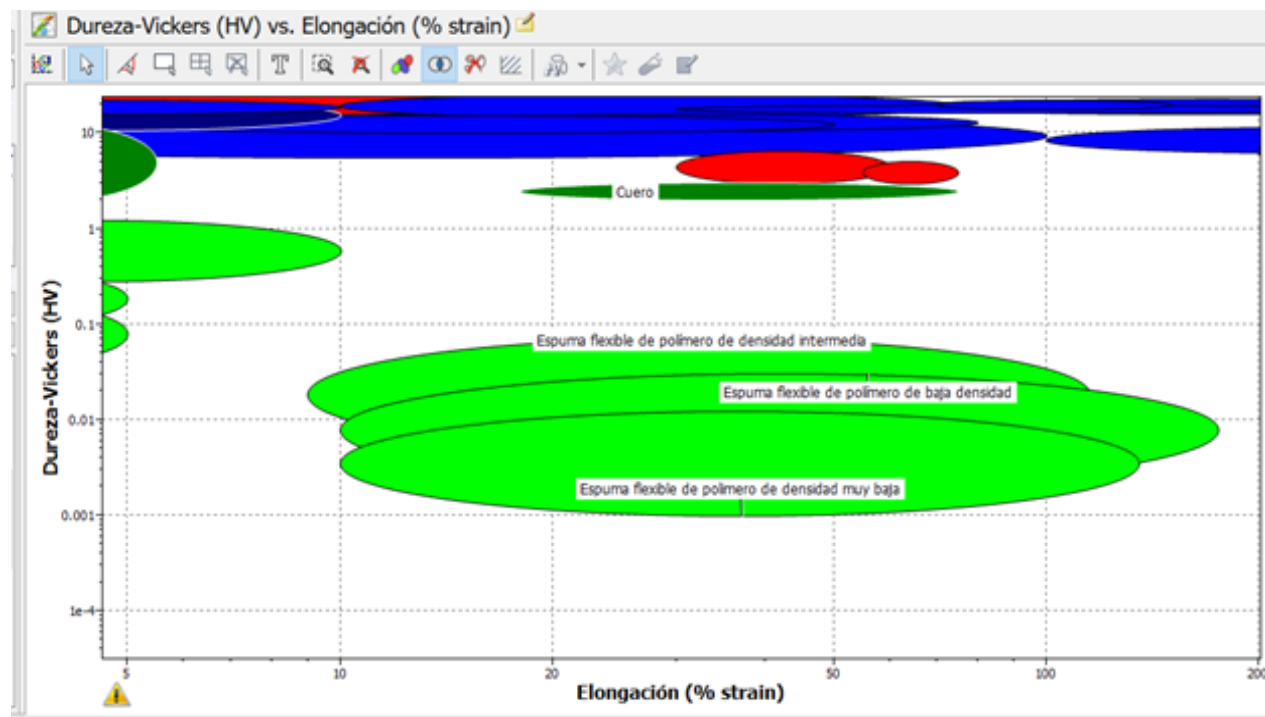


Figura 28. Selección de materiales Ashby para la plantilla.

#### 4.3 Análisis FEM

Con base en la selección de materiales realizada anteriormente, se asignó al Aluminio 2014 como material para la fabricación de los componentes del rehabilitador debido a su alta resistencia mecánica y ligereza. Mediante módulo de análisis por elemento finito del software *Unigraphics 8.5* se obtuvieron resultados de esfuerzos y desplazamientos de los componentes mecánicos del rehabilitador utilizando tetraédrico con 10 nodos por cada

elemento de la pieza con la finalidad de obtener mayor precisión en el análisis, dado que los elementos deben ser del menor tamaño posible para incrementar el número de los nodos presentes en el mallado.

#### 4.3.1 Deformaciones nodales sobre la base para el pie

Para realizar el análisis de esta pieza, se aplicó una fuerza perpendicular de magnitud igual a de 50 [N], la cual representa el peso del pie en conjunto con los pesos para cuando el usuario realice los ejercicios de fortalecimiento. De la simulación, se obtuvo que el valor máximo de desplazamiento nodal de la pieza es de  $4.798 \times 10^{-007}$  [mm], lo cual indica que la pieza no sufrirá ninguna deformación que comprometa su geometría o funcionamiento.

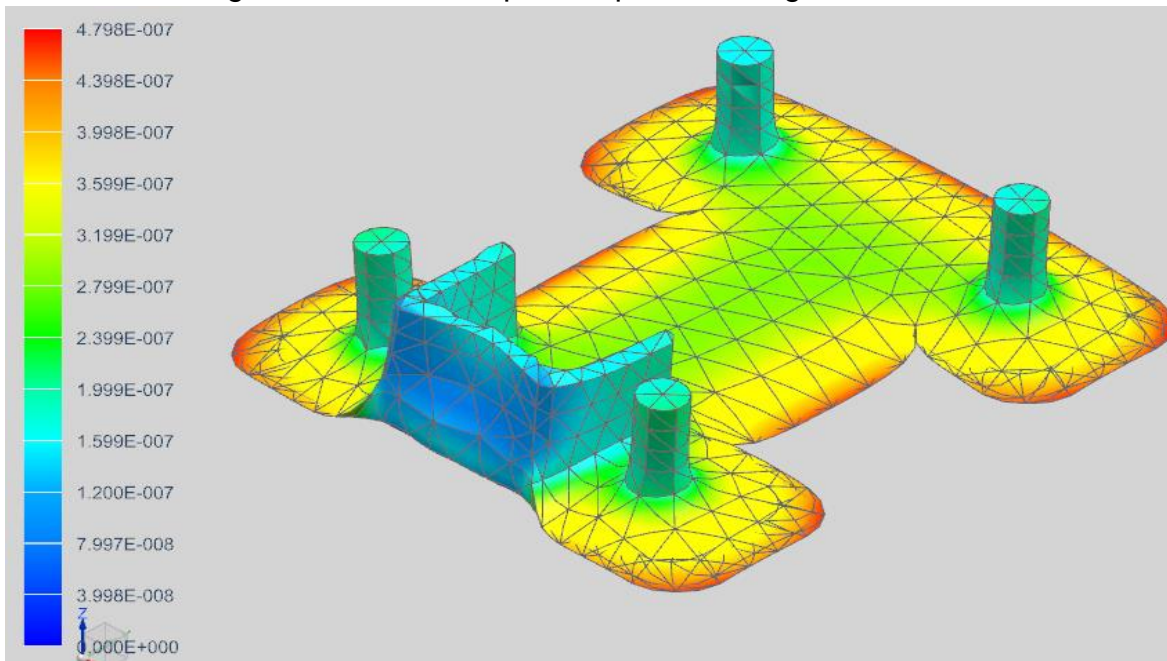


Figura 29. Análisis FEM de la base para el pie.

#### 4.3.2 Deformaciones nodales sobre el eje

De igual manera se realizó el análisis FEM del eje, debido a que sobre esta pieza estará colocado el soporte para el pie y transmitirá el movimiento a éste. Se aplicó una fuerza perpendicular cuya magnitud es de 50 [N], la cual representa el peso del pie en conjunto con los pesos para cuando el usuario realice los ejercicios de fortalecimiento. El valor máximo de desplazamiento nodal de la pieza es de  $3.178 \times 10^{-004}$  [mm], y como se muestra en la imagen, la deformación se encuentra al centro del eje, lo cual indica una posible fractura en esta región.

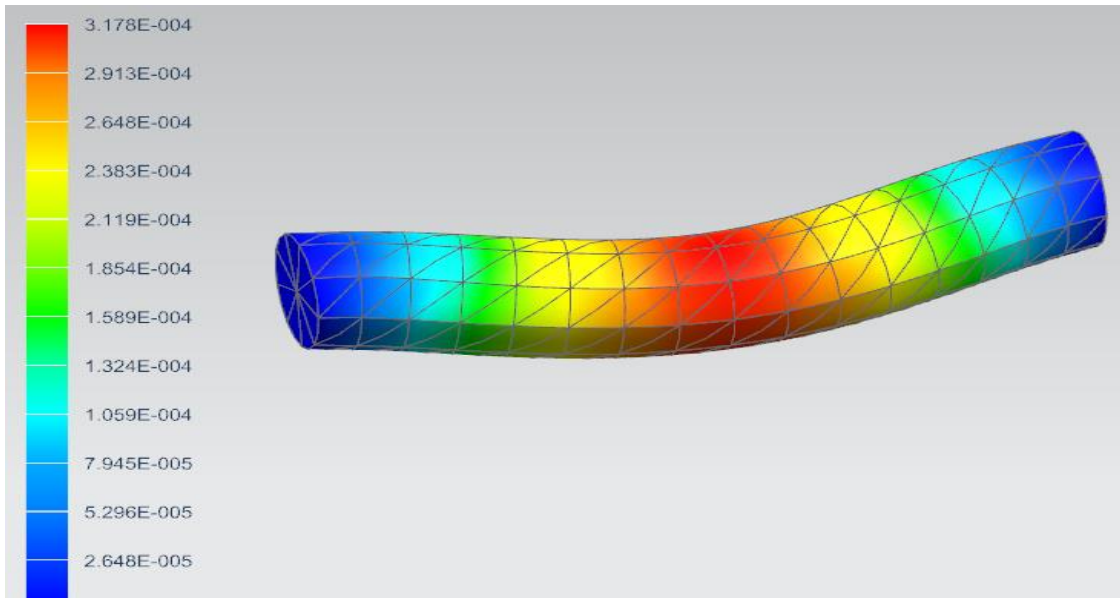


Figura 30. Análisis FEM del eje.

#### 4.3.3 Deformaciones nodales sobre la base de la pantorrilla

Para los soportes, se aplicó una fuerza de 60 [N] de manera perpendicular en dirección hacia la parte interna del dispositivo. El valor máximo de desplazamiento nodal de la pieza es de 2.366 [mm], por lo que para disminuir esta deformación se agregaron al diseño dos secciones tubulares para mantener la distancia entre los soportes.

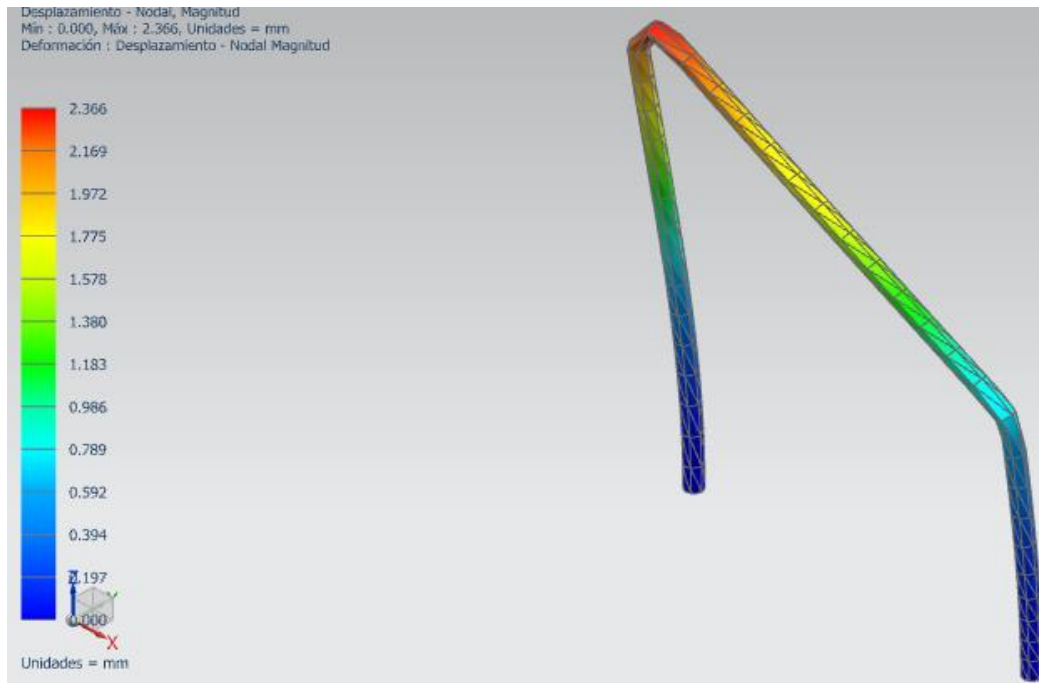


Figura 31. Análisis FEM del soporte para pantorrilla.

#### 4.4 Análisis de esfuerzos de la base para el pie, el eje y el soporte de la pantorrilla

Al realizar los análisis de esfuerzos en la base para el pie y en el eje, los valores máximos que se obtuvieron son  $21.049 \times 10^{-003}$  [MPa] y 0.207 [MPa], respectivamente, mientras que para el soporte de la pantorrilla el valor máximo de esfuerzo resultó ser de 21.07 [MPa]. Dicho esfuerzo se concentra en las caras del tubo que estarán unidas a la base del dispositivo. Comparado con el esfuerzo máximo del aluminio cuyo valor es de 70 [MPa], es posible considerar esta deformación como aceptable; además, logra reducirse al agregar las secciones tubulares entre los soportes.

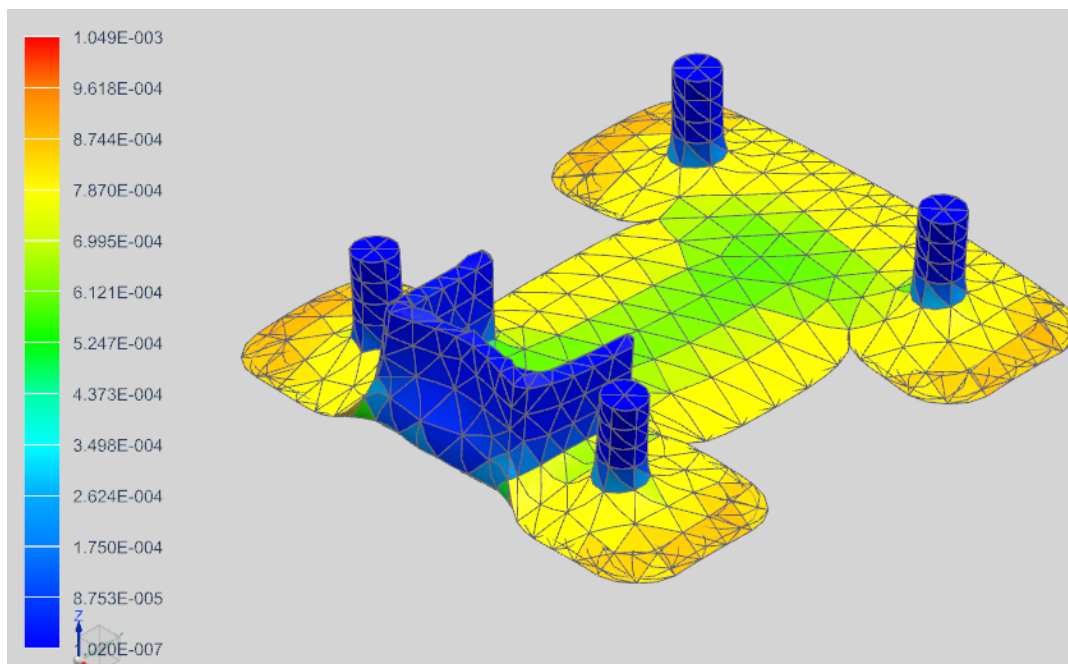


Figura 32. Análisis FEM de la base para el pie.

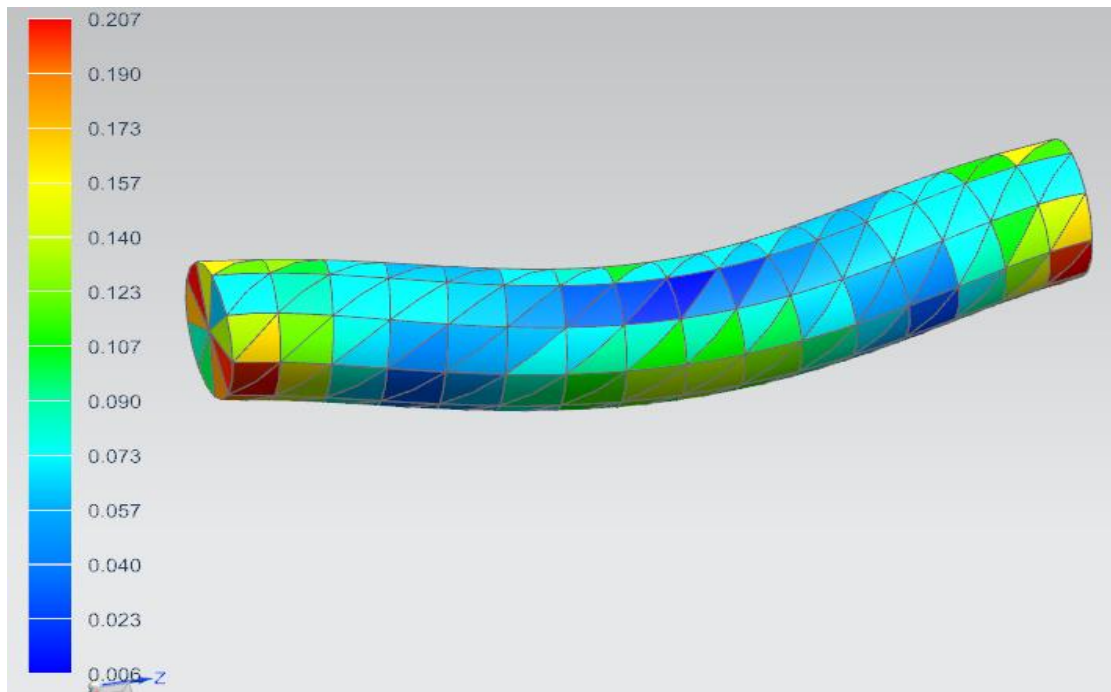


Figura 33. Análisis FEM del eje.

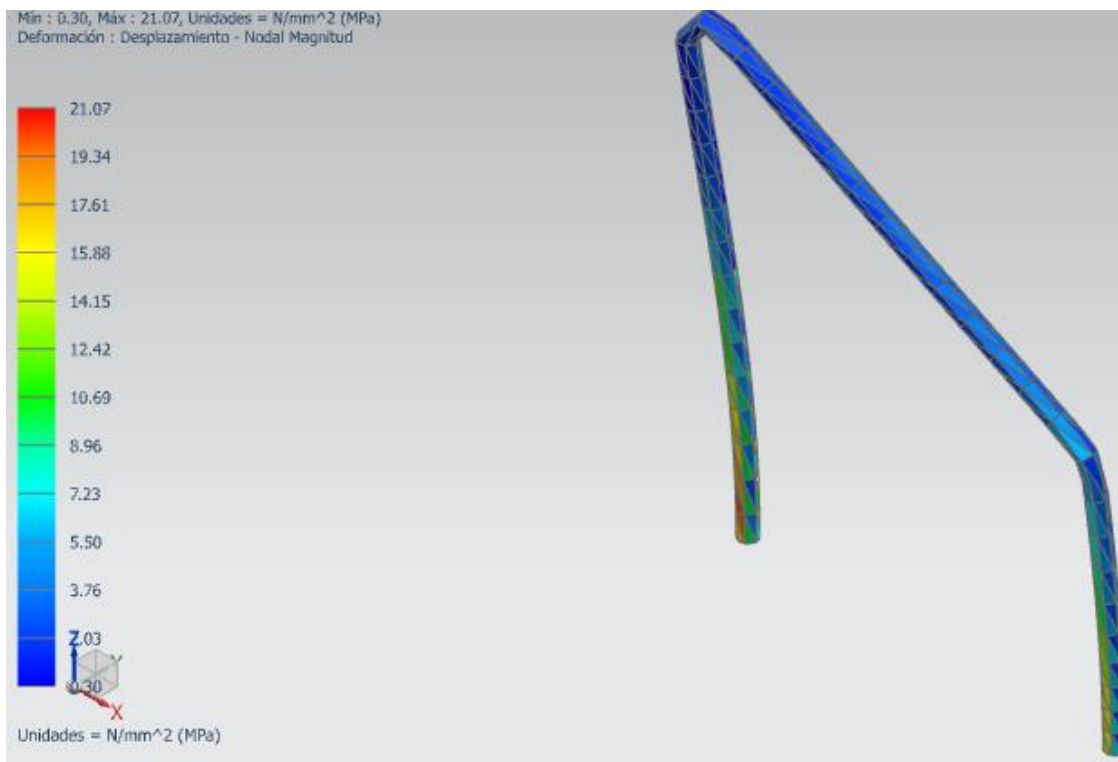


Figura 34. Análisis FEM del soporte para pantorrilla.

#### 4.5 Diseño electrónico del rehabilitador

Para el sistema electrónico del dispositivo, se propone el uso de una fuente de alimentación AC-DC, la cual tiene aplicaciones médicas y cuenta con la certificación IEC 60601-1 para la seguridad de equipos médicos electrónicos. La fuente de alimentación que se sugiere es el modelo ETMA 60W UD series, de la marca CUI, la cual proporciona un voltaje de entre 12 y 48 [V], además de tener las dimensiones adecuadas para las características del rehabilitador y otras especificaciones se ajustan a las necesidades del proyecto, tales como una entrada universal de entre 90 y 264 [Vac], brindando una corriente a la salida de entre 1 y 5 [A]; además cuenta con protecciones para corto circuito y sobrecarga de voltaje.



Figura 35. Fuente de alimentación ETMA 60W UD [29].

Como se estableció en el capítulo 2, los actuadores que se encargarán de realizar los ejercicios libres con el dispositivo de rehabilitación son motores a pasos, los cuales, en primera instancia deben cumplir con las especificaciones establecidas en la tabla 8. Se proponen dos, uno estará a cargo de realizar las flexiones del tobillo, mientras que el otro llevará a cabo los ejercicios combinados.

Sin embargo, este tipo de actuadores aumentan sus dimensiones y, en consecuencia, su peso, a medida que el par que suministran es mayor, por ello es necesario que cuenten con un sistema de transmisión, el cual consiste en engranes de reducción cuya relación de transmisión sea de 10:1. De esta manera, se propone un motor con un par de 1.4 [Nm] para las flexiones y otro cuyo par sea 1.6 [Nm] para el movimiento combinado, o bien, un tren de engranes que ofrezca la misma relación de transmisión.

Dado lo anterior, se propone el modelo FAM581S-HX50 de la marca Sanyo Denki, los cuales presentan menos vibraciones, una mayor precisión y bajo ruido comparados con los motores unipolares. Este motor también es utilizado en equipos médicos electrónicos.



Figura 36. Motor a pasos propuesto [30].

Como se estableció en el capítulo 2, los actuadores que se encargará de realizar los ejercicios libres con el dispositivo de rehabilitación son motores a pasos, los cuales, en primera instancia deben cumplir con las especificaciones establecidas en la tabla 8. Se proponen dos, uno estará a cargo de realizar las flexiones del tobillo, mientras que el otro llevará a cabo los ejercicios combinados.

Sin embargo, este tipo de actuadores aumentan sus dimensiones y, en consecuencia, su peso, a medida que el par que suministran es mayor, por ello es necesario que cuenten con un sistema de transmisión, el cual consiste en engranes de reducción cuya relación de transmisión sea de 10:1. De esta manera, se propone un motor con un par de 1.4 [Nm] para las flexiones y otro cuyo par sea 1.6 [Nm] para el movimiento combinado, o bien, un tren de engranes que ofrezca la misma relación de transmisión.

#### **4.5.1 Control del dispositivo**

En este apartado se aborda de manera general en qué consiste la programación del dispositivo, refiriéndose ésta a la que permite el funcionamiento general del rehabilitador, siendo independiente de la que es establecida por el usuario final, la cual se explicará a detalle en la sección 4.6.

Como se mencionó en el capítulo 2, el concepto seleccionado para llevar a cabo la función de la programación corresponde a la tarjeta de desarrollo Arduino Mega, la cual se comunicará con una aplicación para *smartphone* que cuente con sistema operativo Android a través de sus módulos *bluetooth*.

Debido a que este trabajo está enfocado únicamente para la fase de diseño del dispositivo, el desarrollo de dicha aplicación se encuentra fuera de los alcances del mismo, sin embargo, se proporciona un esbozo de cómo podría programarse la tarjeta Arduino. En el apartado de anexos se incluye el pseudocódigo que sirve de base para la implementación y realización del código fuente en su lenguaje de programación propio, además del diagrama de flujo del mismo.



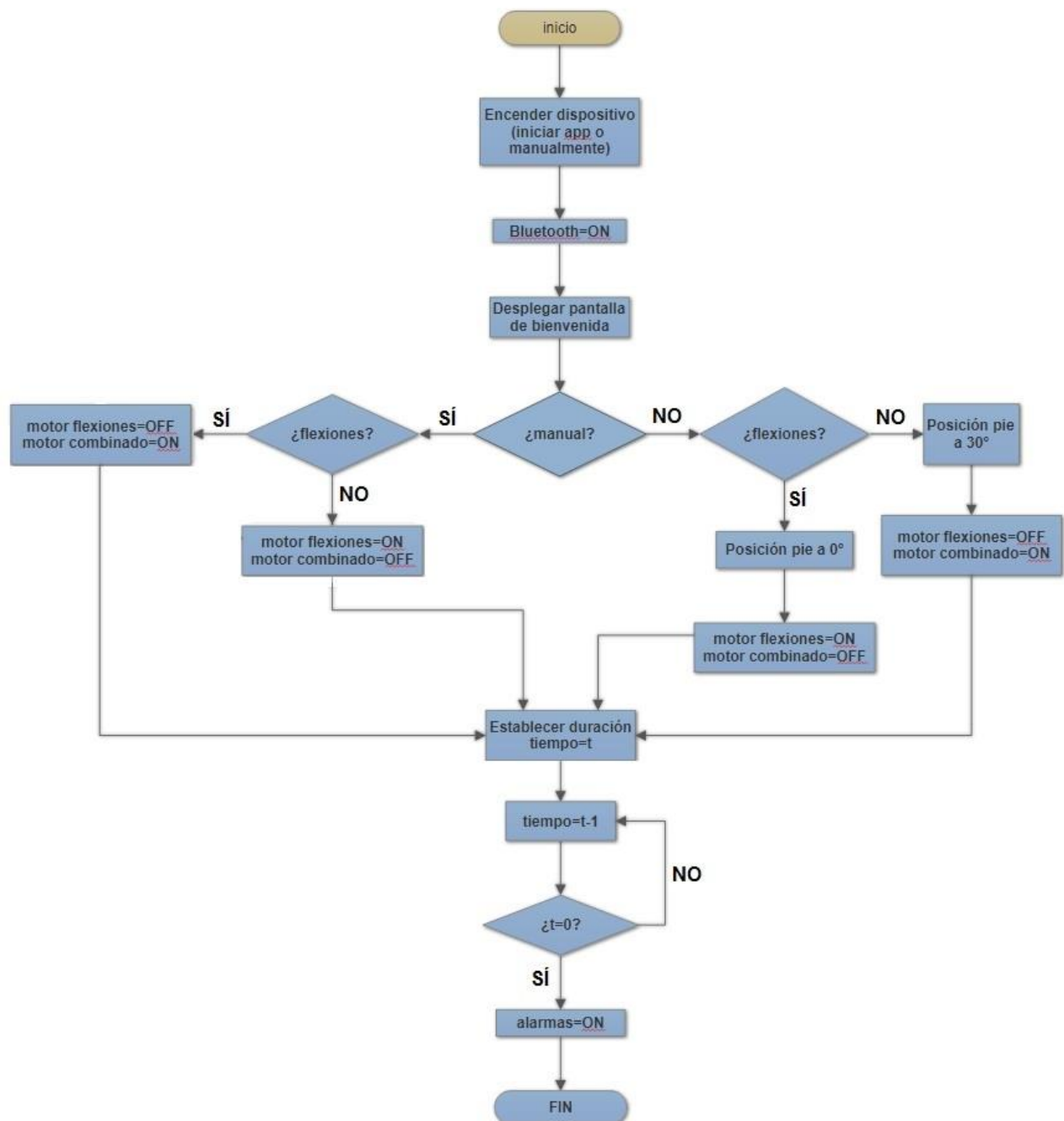


Figura 37. Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo.

## 4.6 Programación del dispositivo

Para ejemplificar el funcionamiento del dispositivo, se realizó un *storyboard* ilustrando la secuencia de pasos a seguir por el usuario, sin importar que lo use de manera automática sin resistencia o de manera manual agregando carga en el dispositivo.

### 4.6.1 Uso del dispositivo de manera automática sin resistencia

Primeramente, el usuario colocará su pierna en el dispositivo, de tal manera que tenga la sujeción adecuada tanto en la pantorrilla como en el pie, la cual se ajustará mediante tiras de velcro. Después, mediante la aplicación en su celular, el usuario podrá seleccionar qué ejercicio desea realizar y la duración de la sesión. Finalmente, iniciará la rehabilitación y el dispositivo funcionará de manera automática.

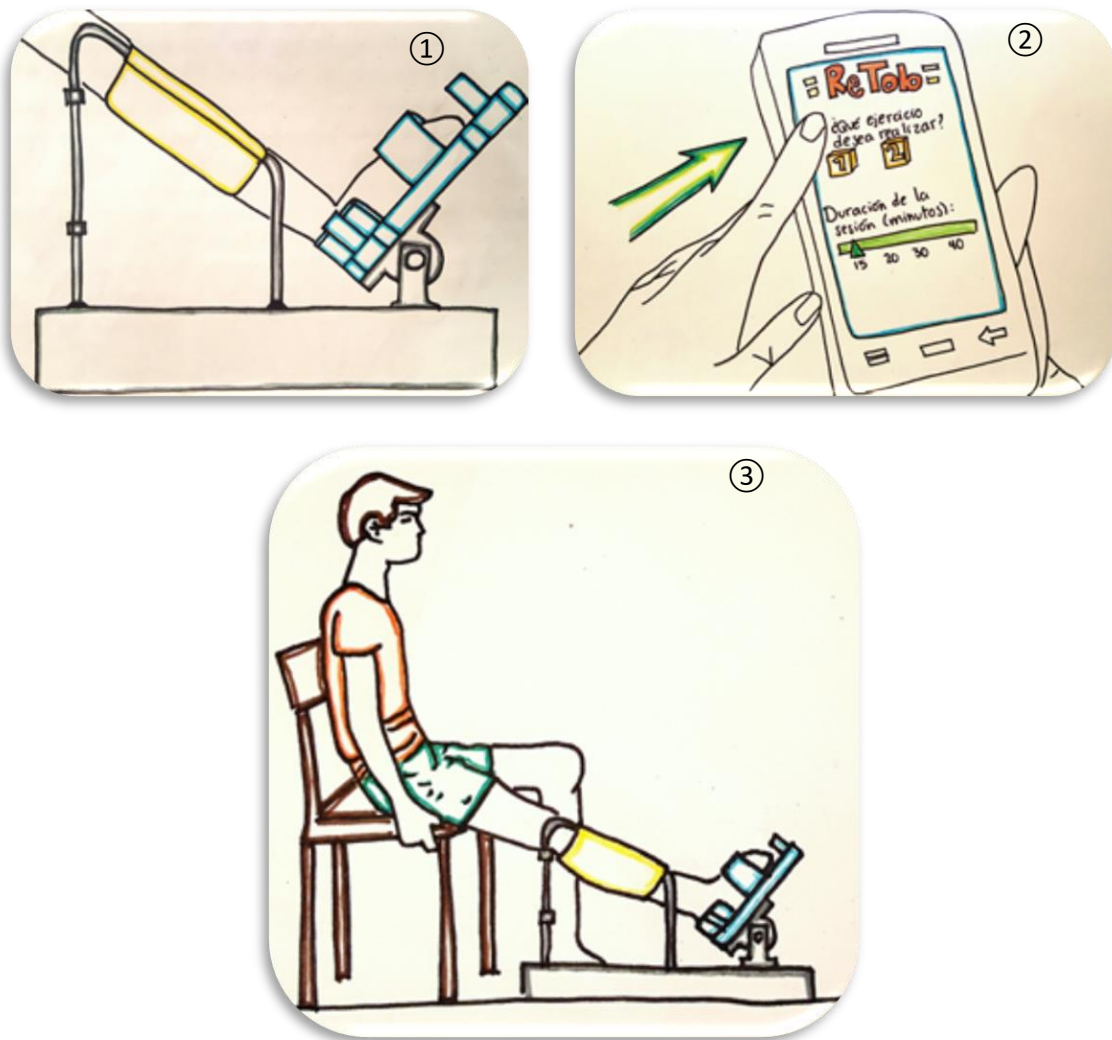


Figura 38. Colocación de la pierna en el dispositivo.

#### 4.6.2 Uso del dispositivo de manera manual con resistencia

Si el usuario va a realizar la rehabilitación de manera manual, el motor del ejercicio combinado se activará mientras que el destinado a las flexiones será desactivado, permitiendo al usuario realizar libremente los ejercicios. Antes de que el usuario coloque la pierna a rehabilitar en el dispositivo y la sujete al dispositivo, es necesario que con ayuda del terapeuta coloque el peso adecuado en los soportes de la base para el pie, tomando como referencia la carga que puede mover con su pie sano y siempre a consideración del profesional en fisioterapia. Una vez establecido dicho parámetro, el usuario indicará la duración de la sesión y comenzará con la rehabilitación.

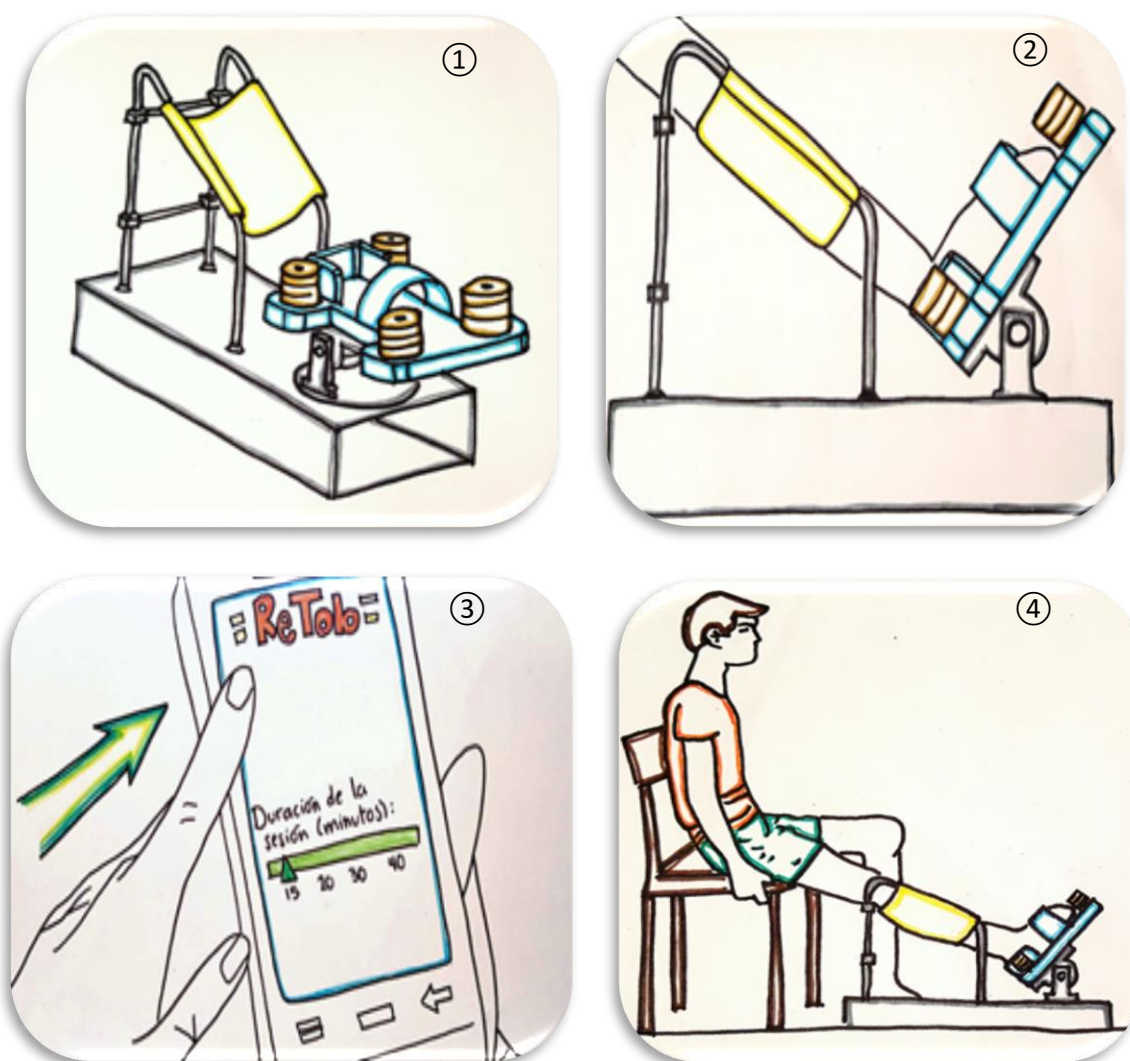


Figura 39. Colocación de la pierna en el dispositivo.

## **CAPÍTULO 5. RESULTADOS**

Se diseñó un dispositivo mecatrónico de rehabilitación de dos grados de libertad que permite realizar ejercicios para fortalecer y recuperar la movilidad en los ligamentos afectados por algún grado de esguince.

Las dimensiones y peso finales del dispositivo son 68x26x45 [cm] y 14 [Kg], respectivamente.

Dicho dispositivo fue diseñado para personas cuyo peso sea 108 [Kg], sin importar su género, recomendando que el usuario pese como máximo 100 [Kg].

La carga de la extremidad que puede soportar el dispositivo (conjunto pierna y pie) se refiere a 8 [Kg].

Los pares que necesitan los actuadores del rehabilitador son 14 [Nm] para el motor que está a cargo de las flexiones y 16 [Nm] para el que realiza el movimiento combinado, ambos con transmisión de engranes reductores con relación de transmisión 10:1.

Las deformaciones en la base para el pie, el eje y el soporte de la pantorrilla resultaron en  $4.8 \times 10^{-7}$ ,  $3.2 \times 10^{-4}$  y 2.4 [mm], respectivamente.

Los esfuerzos encontrados en la base para el pie, el eje y el soporte de la pantorrilla son  $21.05 \times 10^{-3}$ , 0.207 y 21.07 [MPa], respectivamente.

Del índice de funcionalidad obtenido mediante la metodología de Ashby, el aluminio y sus aleaciones resultan ser los adecuados en caso de manufacturar el rehabilitador.

De las gráficas dureza vs elongación del método Ashby se obtiene que los materiales para la plantilla recomendados sean las espumas flexibles de polímero.

El tipo de control del dispositivo resulta ser únicamente ON/OFF y su manipulación se lleva a cabo de manera manual o automática mediante el uso de una aplicación para *Smartphone* desarrollada en el sistema operativo *Android*.

El dispositivo cuenta con una fuente de voltaje que proporciona entre 12 y 48 [V] y la corriente de salida es de 1 a 5 [A], la cual alimenta a la etapa de control y a la etapa de potencia.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

El dispositivo diseñado cuenta con dos grados de libertad y coadyuvará a las personas que han sufrido algún grado de esguince en alguno de los tobillos a fortalecer y recuperar la movilidad, con base en los ejercicios de la terapia pasiva y activa asistida, logrando una pronta recuperación y evitando una posible recaída.

El dispositivo cuenta con los elementos necesarios para llevar a cabo los ejercicios recomendados por los terapeutas: flexiones (dorsiflexión/flexión plantar) y el movimiento combinado del tobillo (inversión y eversión), los cuales pueden realizarse de manera libre para recuperar la movilidad de los ligamentos afectados o bien, con la ayuda de pesas adicionales se conseguirá el fortalecimiento de los mismos.

Dado que es un diseño mecatrónico, se realizó un análisis de las cargas que deben considerarse para los actuadores que podrían ser utilizados en la fabricación del dispositivo, así como el sistema de control (ON/OFF) responsable del funcionamiento del rehabilitador.

En comparación con los modelos observados en el estado del arte, el dispositivo diseñado ofrece los mismos grados de libertad para realizar la terapia, la posición en que ésta debe llevarse a cabo y la opción de funcionar de manera alámbrica mediante botones y una pantalla LCD, sin embargo, se considera el uso de una aplicación móvil con una interfaz sencilla de usar y programar por el usuario, la cual se conecta inalámbricamente con el dispositivo para tener el control sobre él durante toda la terapia de rehabilitación; además, se propone el uso de pesas intercambiables para que además de recuperar la movilidad, el usuario pueda realizar otro tipo de ejercicios que coadyuven a su recuperación.

A diferencia de los rehabilitadores mostrados, resulta ser un modelo más viable de fabricar debido a que tanto los elementos mecánicos como los electrónicos que lo conforman son sencillos y pueden conseguirse fácilmente, pero dadas las dimensiones del dispositivo, éste no es portátil debido al peso total de los componentes que lo conforman.

Mediante el uso de software de modelado de sólidos (*Unigraphics 8.5*), fue posible realizar un análisis detallado de la distribución de cargas y del movimiento del dispositivo, asegurando así que el rehabilitador funcionará bajo las especificaciones de diseño primordiales, las cuales se refieren a los rangos de movimiento articular del tobillo, sin comprometer así la salud del usuario ni su rehabilitación.

Con la herramienta *CES EduPack*, fue posible llevar a cabo un análisis de los materiales que podrían considerarse para manufacturar el rehabilitador, teniendo en consideración

las propiedades que serían más adecuadas para el dispositivo, tales como su resistencia mecánica, dureza y ligereza, permitiendo así realizar una selección adecuada para los propósitos requeridos.

Los datos utilizados para realizar el cálculo de las cargas que soportará el dispositivo se refieren a la población estadounidense, puesto que estos parámetros no existen o no están certificados por alguna institución nacional o internacional para la población mexicana ni para un sector de ella.

## **6.1 Trabajo a futuro**

En este aspecto se considera la fabricación de un prototipo con el cual puedan realizarse pruebas de funcionamiento, con el afán de perfeccionar el dispositivo y ponerlo en circulación en el mercado.

Como se mencionó, el rehabilitador está dirigido a un nicho de mercado específico (personas que realizan actividad física con regularidad), sin embargo, podría desarrollarse para otro tipo de población con necesidades específicas, por ejemplo, personas de la tercera edad, niños y adolescentes, personas sedentarias, deportistas de alto rendimiento, bailarines, personas con sobrepeso u obesidad, entre otros.

Es posible mejorar el sistema de control a uno adaptativo para que el dispositivo se calibre de acuerdo con las necesidades específicas de cada usuario, puesto que la terapia de rehabilitación toma como referencia la carga que puede soportar la extremidad sana. De esta manera, el dispositivo por sí mismo podrá sugerir la carga adecuada para realizar los ejercicios, así como desplegar el avance en la terapia, dado que monitoreará en tiempo real la manera en cómo se realizan los ejercicios y si éstos son benéficos o no para el usuario.

De igual manera, y con ayuda del prototipo, será posible reducir los elementos que componen al rehabilitador para que éste sea más ligero y fácil de transportar, consiguiendo que el usuario pueda hacer uso de él en donde prefiera y bajo supervisión del terapeuta.

Es necesario realizar un estudio detallado de las cargas que las extremidades inferiores sanas pueden soportar para así dotar al dispositivo con las pesas adicionales específicas usadas en la terapia activa asistida, las cuales beneficiarán el fortalecimiento de la lesión de los usuarios

# Anexos

## Encuesta sobre rehabilitador de tobillo

Edad: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_  
¿Practica algún deporte? Sí/No \_\_\_\_\_ ¿Cuál? \_\_\_\_\_  
Horas a la semana: \_\_\_\_\_

Esta encuesta está pensada para personas que han sufrido alguna lesión en el tobillo y han recibido algún tipo de rehabilitación. Le pedimos por favor, invierta unos pocos minutos de su tiempo para rellenar el siguiente cuestionario. Muchas gracias por su participación.

### I. Sobre su proceso de rehabilitación

¿Cuál fue el motivo para que asistiera a rehabilitación? \_\_\_\_\_  
¿Dónde recibió su rehabilitación? \_\_\_\_\_  
¿Cuál era la duración de cada sesión de terapia? \_\_\_\_\_  
¿Cuánto tiempo duró su proceso de rehabilitación? \_\_\_\_\_  
¿En qué consistió la rehabilitación? \_\_\_\_\_

### II. Sobre el rehabilitador de tobillo

Suponga que recibirá su terapia con un dispositivo electrónico que lo asistirá durante la rehabilitación. ¿Cuál o cuáles de las siguientes características considera que son importantes para el funcionamiento y uso del aparato? Clasifíquelas según su preferencia.

El dispositivo...	Fundamental	Muy importante	Importante	Poco importante	Nada importante
Realiza ejercicios para recuperar la movilidad					
Es pequeño (tamaño)					
Permite programar mis ejercicios de la sesión					
Permite ajustar la intensidad de los ejercicios					
Guarda el avance de mi terapia					
Tiene un programa de rehabilitación preestablecido					
Puedo usarlo en el pie derecho o en el izquierdo					
Sólo realiza un ejercicio					
Es ligero					
Funciona de forma automática					
Me permite ajustar el tiempo de mi terapia					
Es seguro					
Es pesado					
Indica la duración de mi terapia					
Es grande (tamaño)					
Realiza ejercicios de fortalecimiento					
Es portátil					

### III. Otras consideraciones

Una vez que ha recuperado la movilidad de su pie, ¿le gustaría que el dispositivo le permitiera realizar ejercicios que requieran un mayor esfuerzo? (por ejemplo, levantar o desplazar pesos diversos) Sí/No \_\_\_\_\_  
¿Por qué? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Si pudiera decidir cómo tomar su sesión de terapia con el aparato, ¿usted preferiría estar...?

De pie \_\_\_\_\_ Sentado \_\_\_\_\_ Acostado \_\_\_\_\_ Es irrelevante \_\_\_\_\_

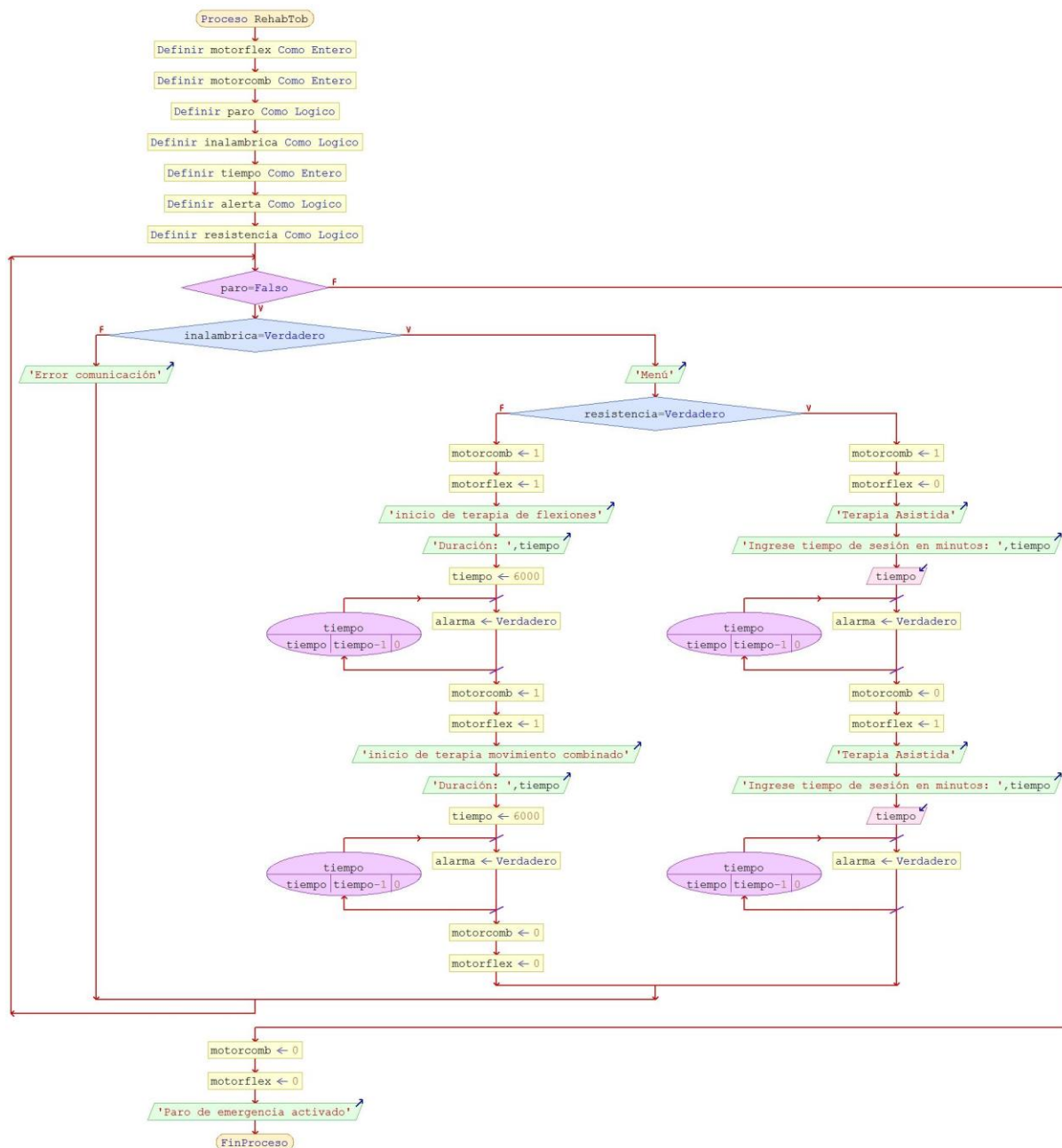


Figura 40. Diagrama de flujo de la programación del dispositivo.



## Pseudocódigo propuesto para la programación del dispositivo

### Proceso RehabTob

Definir motorflex Como Entero  
Definir motorcomb Como Entero  
Definir paro Como Logico  
Definir inalambtrica como Logico  
Definir tiempo Como Entero  
Definir alerta Como Logico  
Definir resistencia como Logico

Mientras paro=Falso Hacer

    Si inalambtrica=Verdadero Entonces

        Mostrar "Menú"

        Si resistencia=Verdadero Entonces // *movimiento flexiones*

            motorcomb=1;

            motorflex=0;

            Mostrar "Terapia Asistida";

            Mostrar "Ingrese tiempo de sesión en minutos: ", tiempo;

            Leer tiempo;

            Para tiempo<-tiempo Hasta 0 Con Paso tiempo-1 Hacer  
                alarma=Verdadero

            Fin Para

        //*segundo movimiento combinado*

            motorcomb=0;

            motorflex=1;

            Mostrar "Terapia Asistida";

            Mostrar "Ingrese tiempo de sesión en minutos: ", tiempo;

            Leer tiempo;

            Para tiempo<-tiempo Hasta 0 Con Paso tiempo-1 Hacer  
                alarma=Verdadero

            Fin Para

    Sino //*primer movimiento automático flexiones*

        motorcomb=1;

        motorflex=1;

        Mostrar "inicio de terapia de flexiones"

```
Mostrar "Duración: ",tiempo;
tiempo=6000; //son 10 minutos
Para tiempo<-tiempo Hasta 0 Con Paso tiempo-1 Hacer
    alarma=Verdadero
Fin Para
//inicio segundo movimiento automático mov combinado
motorcomb=1;
motorflex=1;
Mostrar "inicio de terapia movimiento combinado"
Mostrar "Duración: ",tiempo;
tiempo=6000; //son 10 minutos
Para tiempo<-tiempo Hasta 0 Con Paso tiempo-1 Hacer
    alarma=Verdadero
Fin Para
Fin Si
Sino
    Mostrar "Error comunicación"
Fin Si
Fin Mientras
FinProceso
```

## **Apéndice**

### **CES EduPack**

Es un software que posee una amplia base de datos sobre materiales y procesos de manufactura con tres niveles diferentes que se adaptan a las distintas necesidades que se presentan durante los cursos de grado y posgrado, además cuenta con ediciones especializadas en disciplinas específicas.

CES EduPack permite al usuario familiarizarse con el mundo de los materiales mediante herramientas gráficas que le ayuden a comprender el comportamiento de los materiales y sus aplicaciones con el mundo que les rodea. También cuenta con la herramienta Eco Audit, con la que se puede evaluar el impacto medio ambiental de los materiales. Otra herramienta adicional es el HybridSynthesizer, que permite al usuario investigar sobre los beneficios del uso de materiales híbridos.

Para cada material o proceso, la base de datos contiene un texto descriptivo, imágenes aclaratorias y propiedades técnicas, de carácter económico y ecológico, que pueden ser aplicadas de forma muy visual, ofreciendo al usuario un profundo conocimiento de la relevancia de estas propiedades en la aplicación final de los materiales estudiados.

Un registro dentro de la Base de datos sobre Materiales y Procesos de CES EduPack contiene referencias y enlaces directos a fuentes de información adicionales como MatData, que permite la búsqueda de fuentes de información autorizadas y de reconocido prestigio como ASM Internacional, TheWeldingInstitute, UK NationalPhysicalLaboratory (NPL) y el NationalInstitute of Materials (NIMS) de Japón.

Además, la base de datos Elements ofrece apoyo a cursos de ingenierías, materiales y física aportando más profundidad sobre el mundo de los materiales y proporcionando información sobre las propiedades de todos los elementos de la tabla periódica [31].

## Referencias

- [1] Salinas Durán, F., & Lugo Agudelo, L. H. (2008). *Rehabilitación en salud, 2 a. edición*. Universidad de Antioquia.
- [2] Terapia-fisica.com. (2017). *Agentes Físicos*. [online] Disponible en: <http://www.terapia-fisica.com/agentes-fisicos.html>
- [3] YouTube. (2017). *MOVIMIENTOS PASIVOS TOBILLO - ANKLE JOINT PASIVE MOVES*. [online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=0wrU7IR4gJs>
- [4] Martínez, Elena. *Ejercicio Físico y Esguinces de Tobillo y Rodilla. Recomendaciones para la recuperación de lesiones deportivas* [archivo PDF]. Recuperado de: <http://www.csd.gob.es/csd/estaticos/dep-salud/EJERCICIO%20X%20UN%20TUBO.%20Consejos%20%20Esguinces.pdf>
- [5] Nordin, M. F. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] Godoy, J. (2012). *Robot Paralelo para la Rehabilitación de Tobillo*. Licenciatura. Instituto Tecnológico Lázaro Cárdenas
- [7] Tomado y modificado de Blanco Ortega, A., Vázquez Bautista, R., Vela- Váldez, G., Quintero Marmol, E. and López López, G. (2013). *Control of a virtual prototype of an ankle rehabilitation machine*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, [online] (67), pp.183-196. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-6230201300020016](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-6230201300020016)
- [8] Sánchez Correa, J. A. (2015). *Desarrollo de unidad de movimiento para rehabilitación de tobillo que permite alcances de movilidad óptimos para el desarrollo de las actividades de la vida diaria y logra vencer barreras de accesibilidad al servicio de salud*. Santiago de Cali.
- [9] Carefirst.staywellsolutionsonline.com. (2016). *Lesiones de los Tejidos Blandos*. [online] Disponible en: <http://carefirst.staywellsolutionsonline.com/spanish/Encyclopedia/85,P04039>

- [10] Clínica Guía Práctica. (2013). *Diagnóstico y Manejo del Esguince de Tobillo en la Fase Aguda para el Primer Nivel de Atención*. México, México: Secretaría de Salud.
- [11] Fisioterapia-online.com. (2017). *Vendaje funcional para esguince de tobillo*. [online] Disponible en: <https://www.fisioterapia-online.com/videos/vendaje-funcional-para-esguince-de-tobillo>
- [12] Tomada y modificada de *Guía de Práctica Clínica Diagnóstico y Manejo del Esguince de Tobillo en la Fase Aguda para el Primer Nivel de Atención México*: Secretaría de Salud; 2013.
- [13] Fisioteca. (2017). *Esguince de tobillo - Fisioteca*. [online] Disponible en:<http://www.fisioteca.com/esguince-de-tobillo/>
- [14] Terapia-fisica.com. (2017). *Rehabilitación de tobillo*. [online] Disponible en:<http://www.terapia-fisica.com/rehabilitacion-de-tobillo.html>
- [15] Terapia-fisica.com. (2017). *Rehabilitación de tobillo*. [online] Disponible en:<http://www.eldeportedejaen.com/2014/01/esguince-de-tobillo/>
- [16] Expomed.com.mx. (2017). *ISO 13485. Dispositivos Médicos y su Normatividad*. [online] Available at: <http://www.expomed.com.mx/index.php/es/blog-expomed-mexico-noticias-medicas-news-medicine/blog-regulaciones-sanitarias-destacados-expomed-mexico-noticias-medicas-news-medicine/58-iso-13485-dispositivos-medicos-y-su-normatividad>
- [17] Dof.gob.mx. (2017). *DOF - Diario Oficial de la Federación*. [online] Available at: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5272051&fecha=11/10/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5272051&fecha=11/10/2012)
- [18] Canifarma.org.mx. (2017). *CANIFARMA, Cámara Nacional de la Industria Farmacéutica Directorio interno*. [online] Available at: <http://www.canifarma.org.mx/dispositivosMedicos.html>
- [19] Sincal.org. (2017). *ISO 13485. Dispositivos Médicos y su Normatividad - Artículos de Interés | SINCAL*. [online] Available at: <http://www.sincal.org/articulo33-iso-13485-dispositivos-medicos-y-su-normatividad-en-mexico.html#tema>
- [20] Guzmán Valdivia, C H; Carrera Escobedo, J L; Blanco Ortega, A; Oliver Salazar, M A; Gómez Becerra, F A; (2014). Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*,5( ) 255-264. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76833726002>

- [21] Blanco Ortega, A., Azcaray Rivera, H. R., Vázquez Bautista, R. F., & Morales Mendoza, L. J. (2013). Máquina de Rehabilitación de Tobillo: prototipo virtual y físico. *CIINDET 2013X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Cuernavaca, Morelos, México.
- [22] Blanco Ortega, A., Godoy, J. Isidro, Quintero Mármol M. E., Vela Valdés L. G. (2013). Robot paralelo para rehabilitación asistida de tobillo. *CIINDET 2013X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Cuernavaca, Morelos, México.
- [23] Tobillo, R. (2017). *Recuperación Tobillo - Prim Fisioterapia y Rehabilitación Enraf Nonius*. [online] Prim Fisioterapia y Rehabilitación Enraf Nonius. Disponible en: <http://www.enraf.es/productos/kinetec-breva-maquina-recuperacion-tobillo/>
- [24] Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. McGrawHill.
- [25] Arduino.cc. (2017). *Arduino - ArduinoBoardUno*. [online] Disponible en: [https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno#\\_ww.Atmel.com](https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno#_ww.Atmel.com). (2017). *ATmega328P*. [online] Disponible en: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)
- [26] Microchip.com. (2017). *PIC16F877A - 8-bit PIC Microcontrollers*. [online] Disponible en: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F877A>
- [27] Universal, E. (7 de Febrero de 2012). El mexicano promedio mide 1.64 metros y pesa 74 kilos: estudio. *El Universal*.
- [28] Salud y Algo más. (2017). *Peso de distintas partes del cuerpo - Salud y Algo más*. [online] Disponible en: <http://www.saludyalgomas.com/tablasnutricionales/peso-de-distintas-partes-del-cuerpo/>
- [29] Cui.com. (2017). *ETMA 60W UD Series | Desktop | External | Ac-Dc Power Supplies CU Inc*. [online] Available at: <http://www.cui.com/product/power/ac-dc-power-supplies/external/desktop/etma-60w-ud-series>.
- [30] Trenta, A. (2017). *5-PHASE STEPPING SYSTEMS - SANYODENKI EUROPE*. [online] Sanyodenki.eu. Available at: <http://www.sanyodenki.eu/-5-Phase-.html>

[31] *Grantadesign: CES EduPack*. (2014). Obtenido de Grantadesign:  
<http://www.grantadesign.com/es/education/edupack.htm>