

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO TÉCNICO DE AYUDA
PARA REHABILITACIÓN EN TOBILLO**

JUAN MANUEL ANDICA SÁNCHEZ



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO TÉCNICO DE AYUDA
PARA REHABILITACIÓN EN TOBILLO**

JUAN MANUEL ANDICA SÁNCHEZ

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

Dirigido por:

JOSÉ ISIDRO GARCÍA MELO, PhD.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2015

Nota de aceptación

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar el título de Ingeniero Mecánico.

José Isidro García Melo

Ingeniero mecánico, Ph.D.

Director del proyecto

Jurado 1

Jurado 2

Santiago de Cali, 2015

*A mi familia, que han creído y
dado todo su apoyo incondicional
en este importante camino de
carrera profesional.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi padre Oscar Manuel Andica, a mi madre Gloria Soraida Sánchez y a mi hermana Laura Marcela Andica al brindar todo el soporte posible para cumplir esta importante etapa de mi vida.

Agradezco a los profesores José Isidro García Melo y Cristian Chamorro por guiarme paso a paso durante todo el proyecto para lograrlo con éxito. Así como también agradezco sus consejos y enseñanzas.

Agradezco a Juliana Sánchez por brindarme ese conocimiento sobre el diseño industrial para lograr desarrollar este proyecto. Así como también agradezco por portarse como una hermana más al escuchar y aconsejarme sobre esos asuntos cotidianos de la vida.

Agradezco por todo el conocimiento compartido a todos los profesores de ingeniería mecánica los cuales tuve la oportunidad de ser uno de sus alumnos.

Agradezco a mis compañeros de la escuela de ingeniería mecánica por brindarme ese apoyo académico; en especial a todos los integrantes de los *Ingraduables* que recuerdan que a pesar de las dificultades todo se puede ver desde el lado más cómico.

Además de los diferentes conocimientos que esta experiencia me dejó también me dejó algo muy valioso y son esas verdaderas amistades que espero perduren por mucho tiempo más. Agradezco a mis amigos Alfredo Pedraza, Edisson Loza, Alejandro Vivas, David García, Jose Arias y Claudia Cárdenas por compartirme un poco de su vida y permitir compartirles un poco de la mía.

Agradezco a las diferentes personas que conocí ajenas a la carrera durante este camino por expandir mis conocimientos y abrir mis ideas que me ayudan a crecer como ser humano.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación del Problema.....	1
1.2 Planteamiento del Problema	1
1.3 Marco conceptual	2
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ARTICULACIÓN.....	7
2.1 Dorsiflexión y plantiflexión [13].	7
2.2 Eversión e inversión [13].	8
2.3 Articulación de tobillo en las actividades de la vida diaria	8
2.4 Caracterización de la marcha.....	9
3. REQUERIMIENTOS	11
3.1 Selección de características técnicas de la máquina	11
3.2 Encuestas semiestructuradas.	13
3.3 Formulación requerimientos.	17
4. DISEÑO CONCEPTUAL.....	18
4.1 Cargas del sistema.....	18
4.2 Movimiento del dispositivo.....	21
4.3 Selección de Concepto.....	21

5.	DISEÑO MECÁNICO.....	23
5.1	Especificación del actuador.....	23
5.2	Diseño Estructural.	24
5.2.1	Elemento Ele	28
5.2.2	Estructura motor	30
5.2.3	Riel en U y Deslizador.	31
5.3	Análisis Modal.	34
6.	DISEÑO INFORMÁTICO	37
6.1	Diseño interfaz gráfica.....	40
7.	DISEÑO ELECTRÓNICO	44
8.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	46
9.	REPRESENTACIÓN FINAL DE LA MÁQUINA	48
10.	CONSTRUCCIÓN CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA	50
11	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	53
11.1	CONCLUSIONES.....	53
11.2	TRABAJO FUTURO	53
12.	BIBLIOGRAFÍA	54
13.	ANEXOS	57
	Anexo 1	57
	Anexo 2	65
	Anexo 3.....	72
	Anexo 4	77
	Anexo 5	81

Anexo 6	82
---------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento del pie alrededor de tres ejes y planos del cuerpo.	7
Figura 2. Diferentes fases durante la marcha [16].	9
Figura 3. Diferentes fases durante la actividad de correr [16]	10
Figura 4. Longitudes del cuerpo como una fracción de la altura [17].	19
Figura 5. Concepto diseñado, resultado de los requerimientos formulados.	22
Figura 6. A) Características técnicas motor WSM3-IK. B) Curva característica del motor del dispositivo de rehabilitación para el tobillo [20].	23
Figura 7. Ajuste de diferentes posiciones de terapia A) Elementos del sistema. B) Articulaciones del sistema.	25
Figura 8. Configuración del sistema para aplicar los diferentes movimientos de la articulación del tobillo. A) Movimientos: Eversión/Inversión. B) Movimientos: Dorsiflexión/Flexión plantar.	26
Figura 9. Rango de trabajo para la máquina de rehabilitación de la articulación de tobillo.	27
Figura 10. Elementos de la estructura utilizados para el análisis en elementos finitos.	27
Figura 11. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para el elemento Ele.	28
Figura 12. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para el elemento “ele”.	29

Figura 13. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para la Estructura Motor.	30
Figura 14. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para el elemento “estructura motor”.	31
Figura 15. Reacción de fuerzas del elemento “estructura motor”.	32
Figura 16. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para Riel en U y Deslizador.	33
Figura 17. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para los elementos “Riel en U” y “Deslizador”.	34
Figura 18. Configuración de los elementos considerados para el análisis modal.	35
Figura 19. Frecuencias naturales [Hz] del sistema de rehabilitación.	36
Figura 20. Diagrama de casos de uso UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.	37
Figura 21. Diagrama IDEF0 de entradas y salidas del sistema de rehabilitación de tobillo.	38
Figura 22. Diagrama IDEF0 de la arquitectura mecatrónica del sistema de rehabilitación de tobillo.	39
Figura 23. Interfaz gráfica primer panel de identificación.....	40
Figura 24. Interfaz gráfica segundo panel de Programación Terapia.	41
Figura 25. Interfaz gráfica tercer panel de Terapia Actual.	42
Figura 26. Interfaz gráfica cuarto panel de Resultados.....	43
Figura 27. Arquitectura de control.....	44
Figura 28. Representación del dispositivo de rehabilitación física para la articulación de tobillo diseñado.	49

Figura 29. Lista de materiales usados para la construcción del prototipo.....	50
Figura 30. Prototipo construido con sus características estructurales resaltadas..	51
Figura 31. Prueba del prototipo a velocidad máxima.	52
Figura 32. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.	78
Figura 33. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.	79
Figura 34. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.	80
Figura 35. Medidas del actuados seleccionado.	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Movimientos específicos del tobillo para actividades de la vida diaria.	8
Tabla 2. Características escogidas para la matriz de decisión.	11
Tabla 3. Resumen criterios de selección.	12
Tabla 4. Ponderación de los criterios de selección de la matriz de máquinas.	13
Tabla 5. Conclusiones de las entrevistas semiestructuradas.	15
Tabla 6. Pesos típicos de hombres y mujeres.	18
Tabla 7. Parámetros antropométricos de la población laboral colombiana 1995, Jairo Estrada.	18
Tabla 8. Pesos y centros de gravedad de segmentos corporales [17]......	20
Tabla 9. Pesos de miembro inferior.	20
Tabla 10. Torque máximo generado por la articulación de tobillo en persona sana por tipo de movimiento de la articulación [18]......	20

Tabla 11. Rango de movimiento del tobillo en la máquina de rehabilitación.....	21
Tabla 12. Elementos y tipos de Articulación del sistema <i>Tipo de Posición</i> relacionados con las figuras 7A y 7B.	24
Tabla 13. Lista de Frecuencias naturales [Hz] del sistema de rehabilitación con sus respectivos modos.	35
Tabla 14. Cotización de la manufactura de las piezas.	46
Tabla 15. Cotización de los componentes de la máquina de rehabilitación.	47
Tabla 16. Resultados del consumo de la máquina para dos diferentes velocidades de terapia.	52
Tabla 17. Profesionales de la salud entrevistados.	60
Tabla 18. Pacientes entrevistados.	60
Tabla 19. Matriz del estado del arte.	66
Tabla 20. Organización de los requerimientos planteados para el dispositivo rehabilitador de tobillo.	72

RESUMEN

Actualmente, la salud en Colombia opera de manera centralizada, es decir que los recursos van principalmente hacía los sectores donde haya mayor demanda por el servicio. Por eso poblaciones que habitan las zonas rurales del país las cuales no cuentan con esa cantidad de demanda se encuentran en situación de vulnerabilidad geográfica al verse limitadas de recursos y equipos especializados en sus centros de salud, lo que obliga a sus habitantes a movilizarse a las zonas urbanas donde sí cuenten con el servicio médico necesario. Los habitantes de las zonas rurales, por lo general, su forma principal de sustento económico es el trabajo que exige una gran actividad física, esta actividad física de manera repetitiva causa muchas lesiones para el trabajador.

Actualmente, la tecnología está desempeñando un papel importante en la rehabilitación física, mejorando y acortando el tiempo del proceso de recuperación. Considerando que las lesiones en el tobillo son muy frecuentes tanto en la vida deportiva como vida cotidiana, su tratamiento depende del tipo de lesión. En este contexto, con el fin de aumentar la cobertura de salud en Colombia, acercando a la población vulnerable geográficamente con el servicio médico especializado, este proyecto planteó como objetivo general diseñar un dispositivo enmarcado a la rehabilitación en el tobillo. El diseño se realizó siguiendo una estructura mecatrónica integrando sistemas mecánicos, electrónicos e informáticos guiados por unos requerimientos planteados con una metodología interdisciplinar con estudiantes de diseño industrial la cual consistió en realizar entrevistas semiestructuradas y estudio de las máquinas actuales. Se realizaron técnicas de modelado para sus componentes, tales como métodos de elementos finitos, IDEF0 y UML permitiendo realizar las especificaciones de los elementos. Finalmente se realizó un análisis de costo de la propuesta.

Palabras clave: Centralizado, dispositivo, lesión, rehabilitación, tobillo.

ABSTRACT

Currently, health in Colombia operates centrally, that is, that resources are mainly sent towards social classes where the assistance is demanded. Therefore, populations living in rural areas of the country which do not have such as demand are in a situation of vulnerability, because of the limited geographic resources and specialized equipment in its health centers, forcing its inhabitants to move to urban areas where they do have the essential medical service.

The inhabitants of rural areas usually have as their main form of financial support activities that require a great physical activity, doing repeatedly, causes many injuries to the worker's body.

Technology has currently performed an important role in physical rehabilitation, improving and reducing the time of the recovery process. Whereas, ankle injuries are common both in sports and everyday life, their treatment depends on the kind of injury. In this context, in order to increase health coverage in Colombia, carrying it to the geographically vulnerable populations, with specialized medical service, in this project the general objective to design a framed ankle rehabilitation device. The design was made following a mechatronics structure integrating mechanical, electronic and computer systems guided by some requirements sets to an interdisciplinary approach to industrial design students which consisted of carrying out interviews and study of the current machines. Modeling techniques such as finite element methods, and UML IDEF0 were applied to design and select its components, specifications allowing to make the elements. Finally a cost analysis of the proposal was made.

Keywords: Ankle, centralized, device, injury, rehabilitation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del Problema

La falta de accesibilidad a los servicios de salud en las zonas donde se presenta vulnerabilidad geográfica en Colombia, afecta a las personas que padezcan de alguna lesión en sus articulaciones. Como consecuencia, un grupo poblacional se va a perjudicar en su calidad de vida debido a la restricción que se genera sobre las actividades de la vida diaria. Por lo general, estas lesiones se basan en el movimiento de las articulaciones; como por ejemplo, el movimiento necesario para cumplir las actividades laborales las cuales proveen de ingresos económicos a la persona y que por lo tanto se van a ver reducidos si se restringen estos movimientos. Además, también implica para el paciente una movilización por una búsqueda del servicio de rehabilitación hacia los centros urbanos y se mantiene el paradigma de accesibilidad en la salud, y que por lo tanto, se necesita de una inversión extra de recursos propios del paciente, convirtiéndose esto en un impedimento más para efectuar las terapias de rehabilitación física.

1.2 Planteamiento del Problema

Colombia presenta una alta dispersión poblacional ya que en la actualidad su organización posee una descentralización administrativa-territorial que reparte al municipio en dos zonas: urbana y rural [1]. Siendo la zona rural el sector en el que se agravan con mayor facilidad la accesibilidad a los recursos y las dinámicas de movilidad teniendo en cuenta que la zona urbana es la que dota de accesibilidad al territorio; haciendo a una persona de la zona rural más vulnerable geográficamente si ésta sufre algún riesgo que afecte a su bienestar [2].

La lesión de tobillo es una de las causas por las que se acude usualmente a los servicios médicos [3]. Ya que esta lesión se encuentra en una de las áreas de mayor frecuencia de movilidad afectando así el desarrollo de alguna actividad diaria, ya sea caminar, correr, o estar en posición bípeda; la lesión de tobillo se puede presentar por tipos diferentes de mecanismos lesionales, ya sea por apoyos en una

superficie irregular, por contusiones que desplazan la articulación con respecto a su eje o por cambios incontrolados de dirección o factores antropométricos. Lo cual impiden en el individuo el libre movimiento de la articulación y por ende la dependencia en el desarrollo de las actividades de la vida diaria. La rehabilitación es uno de los métodos que permiten la restauración de estas habilidades, la eficiencia de este proceso es restaurar en su plenitud el rango de movimiento y el mantenimiento de la independencia [4].

De este modo, la movilidad ya sea física o geográfica en una zona rural se convierte en un problema de limitación de acceso al no contar con los diferentes niveles de atención en cobertura de salud, haciendo que una discapacidad se visualice en mayor medida como un obstáculo y la accesibilidad a la rehabilitación en una limitación de recuperación y sacrificio económico, al tener la persona con la lesión que apartarse de las posibilidades de generar ingresos debido a su movilidad escasa. Según el Comité Regional de Rehabilitación, en Colombia el 6.5% de la población sufre de algún tipo de discapacidad y gran parte de estos se encuentran entre los 14 y 44 años de edad, que pertenece a la población productiva [5].

Basado en lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente problemática: ¿De qué manera se puede mejorar la calidad de vida de un individuo que se encuentra en condición de discapacidad transitoria tras haber sufrido una lesión de tobillo y necesita de la rehabilitación; pero que reside en una zona vulnerable geográficamente limitándose el acceso al servicio de salud especializado debido a que en Colombia el sistema trabaja de manera centralizada?

1.3 Marco conceptual

El concepto vulnerable puede aplicarse a una persona o a un grupo social según su capacidad para prevenir, resistir y sobreponerse de un impacto. La vulnerabilidad, se puede definir como una noción multidimensional en la medida que afecta tanto a individuos, grupos y comunidades en distintos planos de su bienestar, de formas diversas y con intensidades diferentes [6]. Es así como se relacionan la

vulnerabilidad geográfica con el riesgo de exclusión por falta de acceso a los servicios de salud, que se puede entender como la condición que relaciona la población que necesita servicios de salud, con el sistema de prestación de servicios [7].

Entonces, la carencia de servicios ofrecidos en una comunidad debido al paradigma que se mantiene para tener accesibilidad a un servicio de salud genera una situación de vulnerabilidad. En el caso de prestación de servicios de salud, las personas que viven alejadas de las cabeceras municipales cuentan con acceso a la salud pero no con la accesibilidad de algunos servicios que ésta brinda en los centros urbanos; como lo afirman Escalona y Díez [8] donde relacionan la prestación de estos servicios con la demanda; “Los servicios de salud están situados en puntos fijos del espacio y la forma en que estos servicios han sido dispuestos obedece por lo general a la demanda, es decir, a la cantidad de personas que necesitan el servicio de salud, igualmente, el servicio de salud ofrecido será más especializado dependiendo del número de personas que lo necesiten”. Esta situación de vulnerabilidad puede entonces conllevar a que una persona necesite movilizarse a otros lugares donde sí pueda ser atendido y tratado. Esta movilidad genera al paciente gastos no sólo de tipo económico ya que necesita de un transporte extra para ser trasladado; sino también ocupación de su tiempo por ir en busca de este servicio. Si se tiene en cuenta que en nuestro proyecto se va a tratar una recuperación a una discapacidad que la persona adquiera, estos gastos se van a ver multiplicados por las sesiones diferentes que tenga la terapia [6].

Según la CIF (Clasificación Internacional del Funcionamiento) la discapacidad se entiende como las “limitaciones en la actividad y las restricciones en la participación, derivadas de una deficiencia en el orden de la salud, que afectan a un individuo en su desenvolvimiento y vida diaria dentro de su entorno físico y social” [9]. De este modo, se puede notar que la discapacidad tiene dos dimensiones que corresponde a las limitaciones y restricciones. Cuando la discapacidad incorpora atributos objetivos en un contexto particular se dice que hay *situación de discapacidad*, en

cambio cuando se evidencia la experiencia individual de esas condiciones objetivas como vivencia subjetiva de la persona se dice que está en *condición de discapacidad* [4] [10].

Este proyecto va a ir enmarcado hacia personas que adquieran una *condición de discapacidad transitoria* debido a una lesión. La definición clínica de una *lesión* es una alteración funcional orgánica o psíquica consecutiva a factores internos o externos. Cuando una lesión es transitoria, ésta se puede recuperar en su totalidad o en gran porcentaje con medios terapéuticos como la rehabilitación física. En este proyecto se abordan las lesiones transitorias que afectan a las articulaciones, que se pueden definir como el lugar de unión entre dos o más componentes rígidos (huesos, cartílagos). Las articulaciones muestran formas y funciones distintas. Algunas articulaciones no tienen movimiento; otras permiten sólo un movimiento leve y algunas son móviles libremente. En este caso particular se trata sobre la articulación del tobillo que se encuentra entre las articulaciones con movimiento libre que son las llamadas diartrosis [11] [12]; que por alguna lesión en la articulación se restringe o disminuye el movimiento natural del pie que son la dorsiflexión, plantiflexión, eversión e inversión, y para poder tratarla se necesita de algún trabajo de rehabilitación [13].

La **rehabilitación** en medicina es definida por la OMS (Organización Mundial de la Salud) como “el conjunto de medidas sociales, educativas y profesionales destinadas a restituir al paciente minusválido la mayor capacidad e independencia posibles” [9]. En la rehabilitación física existe un protocolo que encamina al paciente a la recuperación; se pueden identificar tres etapas que son: el control del dolor, recuperación del movimiento y por último el fortalecimiento [14]. Estos protocolos pueden efectuarse con máquinas o dispositivos de ayuda que por lo general brindan a la terapia parámetros precisos y constates durante la rehabilitación.

Existen un tipo de actividades que son comunes entre las distintas culturas y tiempos y tienen que ver con la supervivencia y mantenimiento personal. A estas

actividades se les conoce como **actividades de la vida diaria** (AVD). La Organización Internacional de la Salud propone la siguiente taxonomía entre las actividades: aprendizaje y utilización del conocimiento: tareas y demandas generales, comunicación, autocuidado, vida doméstica, interacciones y relaciones interpersonales, áreas principales de la vida, vida comunitaria, social y cívica [10]. En este caso se espera recuperar por medio de la rehabilitación física el grupo de actividades de movimiento que la articulación del tobillo puede aportar al ser humano con sus grados de libertad.

De cualquier modo, las actividades de la vida diaria están relacionadas con el logro de la independencia y autonomía, pilares claves para mantener una buena calidad de vida.

Según la OMS, la calidad de vida es: "la percepción que un individuo tiene de su lugar en la existencia, en el contexto de la cultura y del sistema de valores en los que vive y en relación con sus objetivos, sus expectativas, sus normas, sus inquietudes, que está influido de modo complejo por la salud física del sujeto, su estado psicológico, su nivel de independencia, sus relaciones sociales" [9]. El ser humano al verse restringido de alguno de sus funcionamientos, está sujeto a suplir sus necesidades por otros medios, los cuales no ofrecen el mismo potencial que las capacidades propias. La afectación de la calidad de vida se puede ver desde el punto de vista de la situación laboral de una persona ya que al verse disminuida sus funciones no sólo genera una dependencia sino también una limitación en sus actividades laborales que por lo general necesitan de una actividad física [15].

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar y construir un dispositivo técnico de ayuda enmarcado a la rehabilitación en tobillo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un mecanismo que permita cuantificar el parámetro de flexibilidad en la articulación del tobillo.
- Acondicionar el dispositivo construido para que pueda ser utilizado en terapias isocinéticas.
- Diseñar el dispositivo de ayuda en rehabilitación que permita cuantificar parámetros de mejora en el paciente como la fuerza muscular y el rendimiento máximo.
- Implementar el sistema de adquisición de datos para obtener las variables relevantes en la mejora del paciente.
- Diseñar la implementación de la arquitectura mecatrónica del dispositivo.
- Implementar la interfaz de comunicación entre máquina y persona en el dispositivo de rehabilitación.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ARTICULACIÓN

La articulación del tobillo es la unión entre los dos huesos de la pierna y el pie, en donde su estabilidad viene dada por la presencia de 2 ligamentos colaterales [16].

El movimiento global del pie se realiza en torno a tres ejes y sobre tres planos como lo muestra la Figura 1. Los movimientos del tobillo son: flexión plantar, dorsiflexión, abducción, aducción, eversión e inversión.

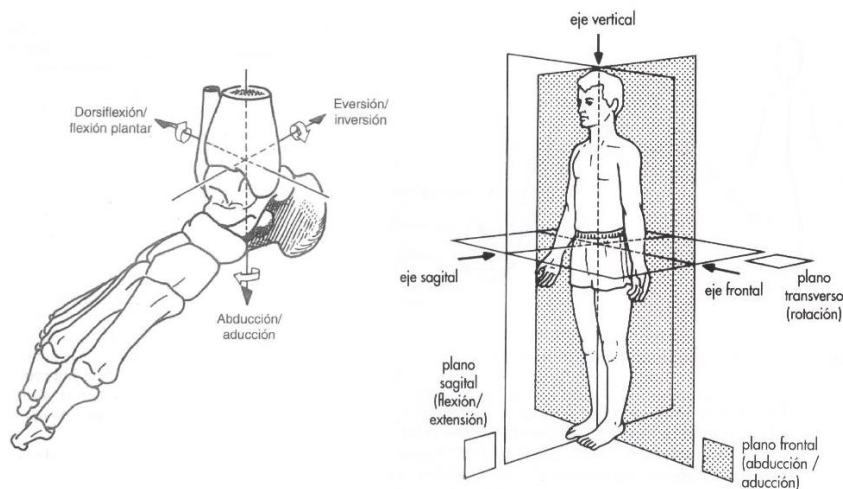


Figura 1. Movimiento del pie alrededor de tres ejes y planos del cuerpo.

A continuación se explican cada uno de ellos

2.1 Dorsiflexión y plantiflexión [13].

El movimiento de dorsiflexión se realiza en el plano sagital entre los extremos distales de la tibia y el peroné y la superficie articular del astrágalo, este movimiento se da de 0° a 20° de dorsiflexión del tobillo.

El movimiento de plantiflexión se realiza en el plano sagital entre la tibia y el peroné distales y la superficie superior del astrágalo. Mientras tiene lugar el movimiento de flexión plantar, el astrágalo se desliza anteriormente en la tibia. Este movimiento se da de 0° a 45° de flexión plantar en la articulación talotibial

2.2 Eversión e inversión [13].

El movimiento mediotarsiano-subtalar (inversión) ocurre entre el astrágalo y el calcáneo, entre el astrágalo y el escafoides y entre el calcáneo y el cuboides. El movimiento se realiza en los planos transversal, sagital y frontal. Este movimiento se da de 0° a 30° de inversión.

El movimiento de eversión se evalúa en el plano frontal, entre el astrágalo y el calcáneo, entre el astrágalo y el escafoides y entre el calcáneo y el cuboides. Este movimiento se da de 0° a 25° de eversión del pie.

2.3 Articulación de tobillo en las actividades de la vida diaria

La articulación del tobillo juega un importante papel en muchas de las actividades de la vida cotidiana, a continuación, de la clasificación que da la CIF sobre las actividades de la vida diaria se lista en la Tabla 1 una serie de actividades donde se caracteriza el tipo de movimiento que realiza la articulación para poder ejecutarla.

Tabla 1. Movimientos específicos del tobillo para actividades de la vida diaria.

				MOVIMIENTOS DEL TOBILLO					
ACTIVIDADES Y PARTICIPACIÓN	TIPO DE ACTIVIDAD	Código CIF	ACTIVIDADES DIARIAS	Flexión	Extensión	Inversión	Eversión	Abducción	Aducción
Movilidad	Cambiar y mantener la posición del cuerpo	d4104	Permanecer de pie	X	X				
		d4350	Empujar con las extremidades inferiores	X	X				
		d4351	Dar patadas/patear		X	X	X	X	X
	Andar y moverse	d4501	Andar distancias largas	X	X	X	X		
		d4502	Andar sobre diferentes superficies	X	X	X	X		
		d4452	Correr	X	X	X	X		
		d4553	Saltar	X	X	X	X		
	Desplazarse utilizando medios de transporte	d4701	Utilización de un medio de transporte con motor	X	X	X	X		
		d4702	Utilización de transporte público	X	X	X	X		
	Lavarse	d5101	Lavar todo el cuerpo	X	X	X	X	X	X
Autocuidado	Vestirse	d5402	Ponerse calzado	X	X				

Cómo se puede apreciar muchas de las actividades se realizan gracias a los movimientos de flexión, extensión, inversión y eversión. Considerando que la actividad relevante de la vida para desarrollo de este proyecto fue la marcha, a continuación se presentan definiciones importantes relacionadas con ella.

2.4 Caracterización de la marcha.

Los movimientos del pie y tobillo durante el ciclo de la marcha se producen como resultado de las restricciones pasivas de la articulación y ligamentos; El ciclo de la marcha comprende por dos fases, una portante y una oscilante, en la cual la fase portante abarca cerca del 62% del ciclo y la oscilante el otro 38% restante de la marcha (Figura 2). Correr se define como una velocidad de marcha de 201 m/min contra los 82 m/min de marcha normal, a esta velocidad, el doble apoyo desaparece y se desarrolla una fase de flotación en la cual ambos pies no contactan con el suelo como muestra la Figura 3 [16].

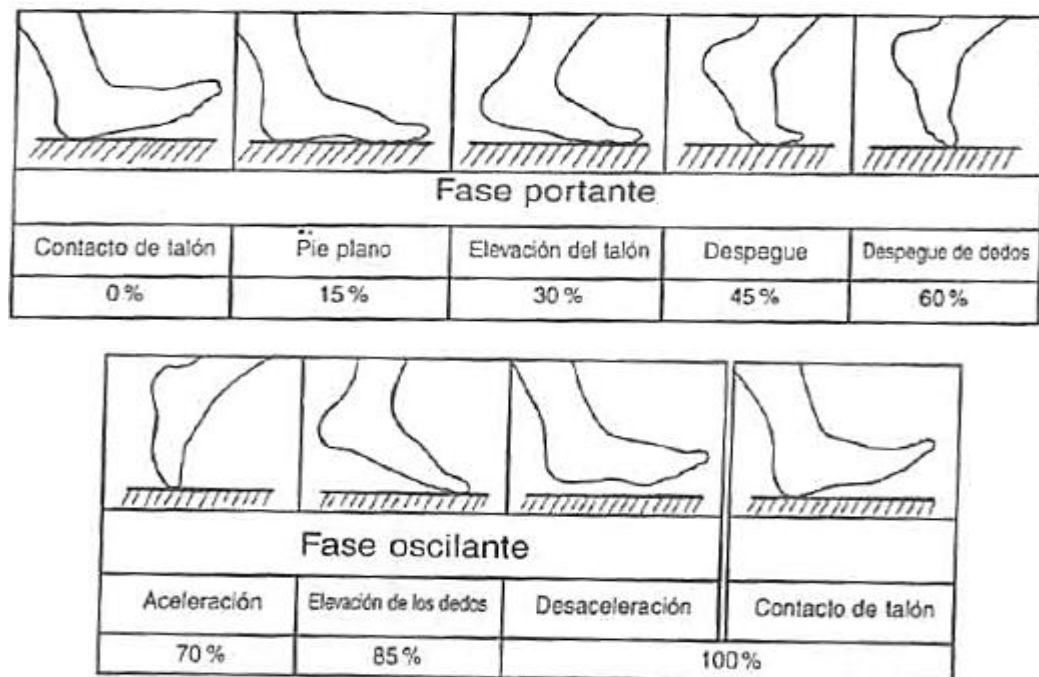


Figura 2. Diferentes fases durante la marcha [16].

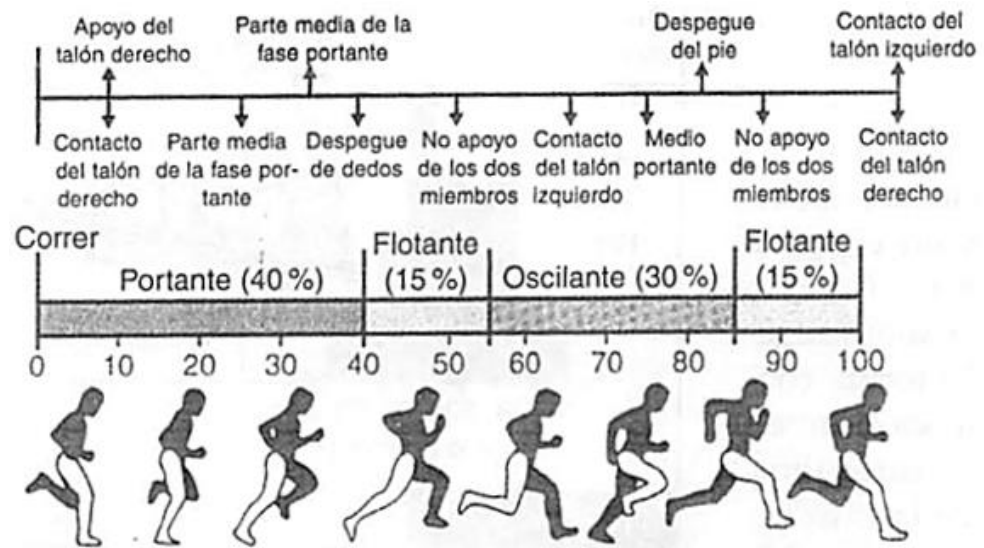


Figura 3. Diferentes fases durante la actividad de correr [16] .

3. REQUERIMIENTOS

Para lograr el diseño se siguió con una metodología que incluyó la definición de las necesidades del público objetivo. Para esto, se realizaron unas encuestas semiestructuradas a pacientes y a especialistas médicos; en dónde se cuestionan los métodos utilizados actualmente para rehabilitar las lesiones de la articulación del tobillo y así buscar posibles mejoras. Además, se realizó una búsqueda del estado del arte de las máquinas que actualmente están en el mercado, a éstas máquinas se les hace una lista de las principales características, dándoles un valor para calificarlas con el objetivo que justifica el proyecto.

3.1 Selección de características técnicas de la máquina

Para tener una idea de la selección de las características técnicas que debió llevar la máquina de rehabilitación se realizó una matriz de decisión, con características similares para cierto grupo de máquinas empleadas para la rehabilitación en el tobillo.

Tabla 2. Características escogidas para la matriz de decisión.

CARACTERÍSTICAS	CARACTERÍSTICAS
Lugar de desarrollo.	Portabilidad.
Año de última publicación.	Estrategia de control.
Modelo máquina.	Instrumentación.
Objetivo de la máquina.	Restricción de movimiento.
Costo/Producción.	Manufacturabilidad.
Tipo de terapia.	Materiales.
Posición de la terapia.	Procesos de producción.
Torque.	Seguridad.
Mecanismos.	Teleoperación.
Tipo de contacto músculo/mecanismo.	Valoración.
Movimientos.	Mantenimiento.
RoM (Rango de Movimiento).	Ajustes dimensionales.
Velocidad.	Confort Térmico.
Aceleración.	Impresión táctil.
Peso.	Sonido.
Dimensiones.	

Las máquinas seleccionadas, anexo 2, para la matriz son dispositivos que se utilizan actualmente y/o dispositivos que todavía están en vía de desarrollo y se encuentran en etapa de prototipo. Las características se encuentran listadas en la Tabla 2.

Tabla 3. Resumen criterios de selección.

Criterio de selección	Resumen aspectos
Tipos de Terapia	Tipos de Movimientos
	Rango de Movimiento
Complejidad mecánica	Torque
	Mecanismo
	Velocidad
	Aceleración
	Instrumentación
	Manufacturabilidad
	Materiales
	Proceso de producción
	Mantenimiento
Tamaño/peso/ portabilidad	Peso [Kg]
	Dimensiones [m]
	Portabilidad
Seguridad/ restricción	Restricción de Mvto
	Seguridad
Diseño	Estético Formal
	Impacto de uso de la máquina
Confort (Ergonómico y antropométrico)	Postura para la Terapia
	Tipo de contacto: músculo/mecanismo
	Ajuste Dimensiones
	Confort Térmico
	Impresión Táctil
	Sonido
	Antropometría
Percepción	Color
	Impacto de uso de la máquina
	Percepción de seguridad

Con 6 máquinas seleccionadas se hizo un análisis de selección con una ponderación con el puntaje máximo (10) y mínimo (1). Los criterios de selección se organizaron en la Tabla 3. Se definen siete criterios y cada uno de ellos se les definió

unos aspectos de ponderación. Por ejemplo: El criterio Tamaño/peso/ portabilidad se le seleccionaron los aspectos Peso, Dimensión y Portabilidad. De esta forma, se determinó que las máquinas número 1, 3 y 5 cumplen en mayor medida los aspectos determinantes para la rehabilitación de tobillo, como se presenta en la Tabla 4. Como se puede apreciar, la máquina 1 se caracterizaba por transmitir seguridad al paciente gracias a su robustez, su diseño y la forma en que se acomoda el paciente para la terapia también son puntos fuertes en esta máquina. En la máquina 3, opuesto a los puntos fuertes de la máquina 1 se caracteriza por simplificar su estructura siendo portable. La máquina 5 cuya calificación fue la mejor entre el grupo evaluado debido a su diseño que transmitía confort y seguridad, además de que su estructura permitía portabilidad. Un punto débil en común entre estas tres máquinas es que la disponibilidad de tipos de terapia que ofrecen es limitada, ya sea por las posiciones diferentes en realizar la terapia o por la posibilidad de realizar terapias con movimiento activo o pasivo. Estas cualidades son el punto de referencia para el diseño de la máquina del proyecto.

Tabla 4. Ponderación de los criterios de selección de la matriz de máquinas.

Criterio de selección	Peso [%]	Máquina 1	Máquina 3	Máquina 5
Tipos de Terapia	20	6,66	6,66	6,66
Complejidad mecánica	14	4	8	6
Tamaño/peso/portabilidad	18	1	8	8
Seguridad/restricción	15	10	6	8
Diseño	10	8	6	10
Confort (Ergo. y Antro.)	13	8	6	10
Percepción	10	7	7	10
Valor	100	6,112	6,872	8,112

3.2 Encuestas semiestructuradas.

Se usó como instrumento de investigación entrevistas semiestructuradas las cuales permitían un dialogo fluido con los especialistas y pacientes. Las encuestas se realizaron bajo la solicitud de acceso a centros de salud especializados en

rehabilitación. Para esto, se desarrollaron 3 tipos de encuestas con un público en específicos, las cuales se efectuaron a pacientes en terapia, pacientes recuperados y especialistas. Los objetivos de los instrumentos para los pacientes y profesionales de la salud son:

PACIENTES (ACTIVOS Y RECUPERADOS): EXPERIENCIAS

- Cumplimientos de los deberes.
- Percepción de los protocolos y los equipos.
- Efectividad de la recuperación.
- Como son los canales de comunicación (recibir información de rehabilitación).
- Lesión vs afectación AVD.
- Razón de lesión vs Acciones prevención futuras lesiones.

PROFESIONALES DE LA SALUD: PROTOCOLOS

- Lesiones más comunes.
- Como son los canales de comunicación (brindar información).
- Cumplimiento de las citas y los deberes.
- Cuáles son los principales movimientos a recuperar.
- Razón de lesión vs Acciones prevención futuras lesiones.

De las entrevistas realizadas (anexo 1) se sacaron una lista de conclusiones (Tabla 5), las cuales reflejan el estado actual del servicio de rehabilitación prestado y la aceptación del paciente por parte de éste.

Tabla 5. Conclusiones de las entrevistas semiestructuradas.

ESPECIALISTA	
Característica	Conclusión
Protocolo	Se lleva a cabo una valoración del paciente para fijar unos objetivos y en relación a esta evaluación aplicar condiciones específicas del protocolo estándar; que consiste primero en la disminución del dolor e inflamación, recuperación de los arcos de movimiento, fortalecimiento y mejora de la respuesta nerviosa.
Comunicación	El especialista comunica al paciente el ejercicio que se llevará a cabo y en la medida que se recupera este toma decisiones de aplicación pero siempre basados bajo un protocolo estándar.
Objetivos	Alcanzar el mayor rango de movimiento en relación a la marcha, visto que es la actividad que más se afecta.
Lesión Común	Esguince de tobillo grado (I - II)
Herramientas	Thera Band, Pelotas Propioceptivas, Máquinas de gimnasio.
AVD (Actividades de la Vida Diaria)	Recuperar la marcha como actividad principal de desplazamiento.

Afinidad con el proyecto	Los especialistas están de acuerdo con que se utilice un dispositivo especializado en la rehabilitación de la articulación, primero porque no hay una máquina especializada en articulación de tobillo, y segundo porque la aplicación de protocolo puede ser más rápida y efectiva.
Movilidad	La aplicación de movimientos en la rehabilitación se dan en relación a los rangos de movimientos básicos como lo son dorsiflexión, plantarflexión - inversión y eversión; que son los que permiten la recuperación de la marcha, los movimientos faltantes se fortalecen a medida que se aplican los ya mencionados.
Plan casero	El paciente dice aplicar planes caseros según lo recomendado por el especialista; sin embargo cuando este vuelve a la cita el especialista identifica poco progreso.
Pacientes	
Característica	Conclusión
Paciente	Personas jóvenes provenientes de la zona urbana en etapa laboral.
Protocolo	Se sigue con el mismo protocolo para todos los pacientes después de una valoración
Comunicación	Los pacientes llevaron a cabo actividades adicionales propuestas por el especialista sin embargo no tenían conocimiento del protocolo seguido.
Satisfacción	Los pacientes se sienten satisfechos con el sólo hecho de ya no sentir dolor; razón por el cual no vuelve a terapia.
Lesión	Esguince de tobillo en etapa no crítica (I Y II)
Herramientas	Elementos básicos que permitían fortalecer y mejorar la movilidad de la articulación
AVD	La actividad más afectada en el paciente es la marcha
Afinidad con el proyecto	Los pacientes están de acuerdo con que se utilice un dispositivo especializado en la rehabilitación de la articulación.

3.3 Formulación requerimientos.

Para formular los requerimientos se organizaron los criterios de selección del capítulo 3.1 en 4 pasos metodológicos que a su vez se dividen en categorías.

- 1. Funcional:** Movimiento, Posición Terapia, Evaluación Paciente.
- 2. Estructural:** Manipulación:(Portabilidad, Uso); Mantenimiento, Construcción.
- 3. Confort:** Percepción (Formal/Estético; Funcional/Estética)
- 4. Seguridad:** Terapia (Componentes, Sistemas)

Los requerimientos sacados del análisis de la matriz del estado del arte, anexo 3, muestra como resultado características necesarias para el diseño de la máquina de rehabilitación con respecto a la máquina con mejor puntaje en la ponderación. Así, las características que debe cumplir el dispositivo son:

1. El usuario de la maquina es una persona hasta 50 años con un peso promedio de 88 Kgs.
2. El dispositivo debe ser portable.
3. La máquina debe realizar los 4 movimientos detallados con anterioridad en el capítulo 2.
4. Se deben cumplir tanto terapias del tipo de movimiento activo como pasivo para la rehabilitación de un paciente. En los siguientes rangos

Movimiento Articulación	Movimiento Anatómico [°]	Movimiento AVD [°]
Flexión Plantar	55	14
Flexión Dorsal	35	20
Eversión	17	5
Inversión	30	10

5. La máquina debe tener un control de operación local.
6. La máquina debe efectuar la terapia en posición decúbito y sedente.
7. Su diseño debe transmitir robustez y una percepción de tranquilidad para el paciente.
8. El dispositivo se debe poder usar por personas en condición laboral, en Colombia.

4. DISEÑO CONCEPTUAL.

Todo el proceso que se realizó en cada sesión de rehabilitación se detalla en este capítulo con diferentes herramientas ingenieriles que detallan los diversos componentes de todo el sistema.

4.1 Cargas del sistema

Se analizaron los requisitos necesarios basándose en las características antropométricas promedio del público objetivo del proyecto. A continuación, se muestran en la Tabla 6, los pesos de hombres y mujeres a diferentes edades de la población colombiana laboral.

Tabla 6. Pesos típicos de hombres y mujeres.

Edad [años]	Hombres [Kg]	Mujeres [Kg]
16	56,25	52,19
19-20	70,76	55,79
20-30	73,48	58,97
31-40	75,30	60,78
41-50	76,66	65,77

Tabla 7. Parámetros antropométricos de la población laboral colombiana 1995, Jairo Estrada.

Medidas antropométricas evaluadas	Valor					
	Mujeres	Mujeres	Hombres	Hombres	Valor Mínimo	Valor máximo
	Percentil 5	Percentil 95	Percentil 5	Percentil 95		
Masa Corporal [Kg]	46,7	77	53,7	87,9	46,7	87,9
Estatura [cm]	146,7	166,2	158	179,3	146,7	179,3
Altura muslo (Sentado) [cm]	12,1	16,5	12,9	17,1	12,1	17,1
Altura rodilla (Sentado) [cm]	44,7	52,5	48,2	56,6	44,7	56,6
Altura Fosa Poplit, (Sentado) [cm]	35,1	42	38,6	46,2	35,1	46,2
Anchura caderas [cm]	32,6	42,6	30,9	39,2	30,9	42,6
Anchura de rodilla [cm]	8,3	10,5	8,8	10,7	8,3	10,7
Anchura del tobillo [cm]	6	7,1	6,8	8	6	8
Anchura del talón [cm]	5,4	7	6	7,6	5,4	7,6
Anchura del pie [cm]	8,2	10	9	10,9	8,2	10,9

Largura Nalga a Fosa Poplitea [cm]	42	50,4	42,7	50,9	42	50,9
Largura nalga a Rodilla [cm]	51	59,5	52,7	61,3	51	61,3
Largura del pie [cm]	21,3	24,7	23,2	27,3	21,3	27,3
Largura planta del pie [cm]	17,2	20	18,7	22	17,2	22
Perímetro Rodilla Media [cm]	31,4	40,5	32,9	40,6	31,4	40,6
Perímetro Pierna media [cm]	30,4	39,2	31,7	40,2	30,4	40,2
Perímetro Tobillo [cm]	18,5	23,2	19,7	24,2	18,5	24,2
Perímetro metatarsial [cm]	20,5	24,5	22,8	26,9	20,5	26,9

De la Tabla 7 se puede afirmar que el valor máximo del percentil 95 para el peso es de 88 Kg, eso quiere decir que sólo un 5% de las personas superan ese peso. Además afirma que el valor del percentil 95 es 180 mm, se diseñó el dispositivo para que cumpliera con estas características. Estos valores se tomaron en cuenta para calcular las longitudes de los miembros inferiores del cuerpo humano, así como los centros de masa de éstos, que son de gran importancia para el diseño de la máquina. Para calcular esos valores se tuvo en cuenta las medidas de la Figura 4 y la Tabla 8.

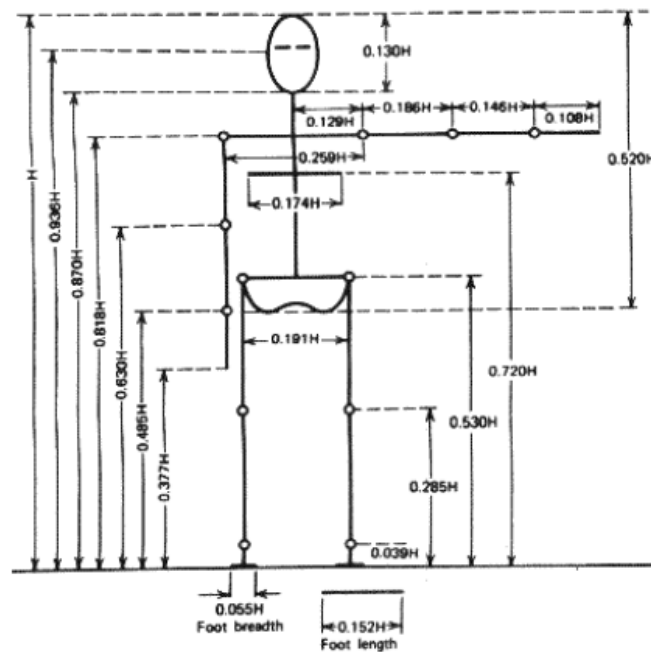


Figura 4. Longitudes del cuerpo como una fracción de la altura [17].

Tabla 8. Pesos y centros de gravedad de segmentos corporales [17].

Segmento	Peso W: Peso del cuerpo	Centro de masa/Longitud del segmento	
		Proximal	Distal
Pie	0,0145W	0,5	0,5
Pierna	0,0465W	0,0465	0,433
Muslo	0,1W	0,1	0,433

Usando la Figura 4 y las anteriores tablas, se calcularon los pesos de los segmentos corporales de interés que son el pie, pierna y muslo; como se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Pesos de miembro inferior.

Segmento	Adulto [Kg] (N)
Cuerpo	[88] (863)
Pie	[1,27] (12.5)
Pierna	[4,1] (40.1)
Muslo	[8,8] (86.3)

Al considerar el movimiento que ejerce en la rehabilitación la articulación del tobillo se aplica un torque importante a los actuadores y elementos de la máquina; el torque que un paciente sano genera en la articulación por tipo de movimiento se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Torque máximo generado por la articulación de tobillo en persona sana por tipo de movimiento de la articulación [18].

Tipo de movimiento	Torque [Nm]
Plantar/Dorsiflexión	-80, 80
Inversión/Eversión	-40, 40

4.2 Movimiento del dispositivo.

La información dicha en el capítulo 2 sobre los arcos de movilidad de la articulación del tobillo dice que el tobillo como articulación tiene seis movimientos como se aprecian en la Figura 1. De estos seis movimientos la inversión y la eversión permiten realizar la abducción y la aducción. Por lo tanto, para el diseño de la máquina se planteó sólo tener en cuenta los movimientos de dorsiflexión, plantiflexión, inversión y eversión; los cuales tendrán un rango de movimiento como lo muestra la Tabla 11 [19].

Tabla 11. Rango de movimiento del tobillo en la máquina de rehabilitación.

Movimiento Articulación	Movimiento Anatómico [°]	Movimiento AVD [°]
Flexión Plantar	55	14
Flexión Dorsal	35	20
Eversión	17	5
Inversión	30	10

Como se dijo anteriormente, la ubicación espacial del eje de movimiento no está en un eje horizontal, ya que hay variaciones de 7° sobre un plano transversal y 13° en un plano sagital medio del pie. Esto induce a construir un mecanismo complejo que podría resultar para el usuario incomodo al manejar la máquina; por lo tanto, se planteó el diseño de los ejes de estos movimientos como si fueran horizontales ya que esos movimientos son muy pequeños para el efecto del movimiento activo.

4.3 Selección de Concepto.

De los requerimientos formulados, se diseñó un modelo conceptual (Figura 5), el cual permite la realización de los 4 movimientos anatómicos del tobillo gracias al riel en U que va ubicado a la altura de la pantorrilla, el diseño del riel cumple con las funciones de las numerosas barras que contiene la Kinetec Breva (máquina ganadora en la ponderación), pero mejora estéticamente el diseño de la misma. Este diseño también permite que la terapia se ejecute en posición decúbito y sedente gracias a la graduación angular del pilar que sostiene la pierna. Este diseño

además da la ventaja que sus partes móviles de graduación no necesitan ser desensambladas como en el caso de algunas máquinas tenidas en cuenta en la matriz. Para detallar mejor el diseño del concepto se hizo un modelo CAD 3D, Figura 5, lo conforman 9 componentes principales. A este modelo se le harán análisis de estructura y posteriormente se mejorará su estética y diseño formal en el capítulo siguiente.

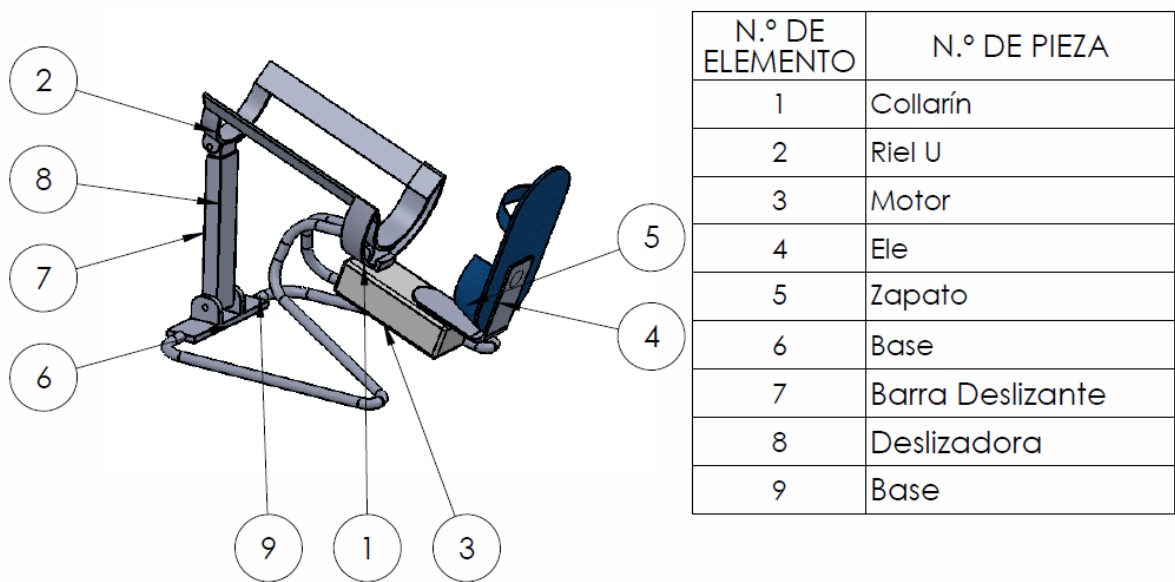


Figura 5. Concepto diseñado, resultado de los requerimientos formulados.

5. DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se presentan las soluciones mecánicas a los requerimientos planteados. Primero se especifica el actuador del sistema, seguidamente se detallan y evalúan elementos críticos de la estructura por fallas estáticas y resonancia mediante el uso de herramienta CAD/CAE.

5.1 Especificación del actuador

Se escogió un sistema de actuación eléctrico ya que aporta para la máquina un bajo ruido de operación, poco espacio necesario de funcionamiento y fácil mantenimiento; características esenciales para los requerimientos planteados. Para el cálculo de los torques de operación se consideró 1/4 de la máxima capacidad humana (80 Nm registrados en la Tabla 10) para la terapia activa y 1/12 de torque nominal necesario en la terapia pasiva. Dentro de los actuadores eléctricos se eligió un motor eléctrico DC que pudiera suplir la generación de torque de la articulación del tobillo, siendo la mejor opción el motor eléctrico DC con transmisión WSM3-IK de Bosch cuya características se encuentran en la Figura 6.

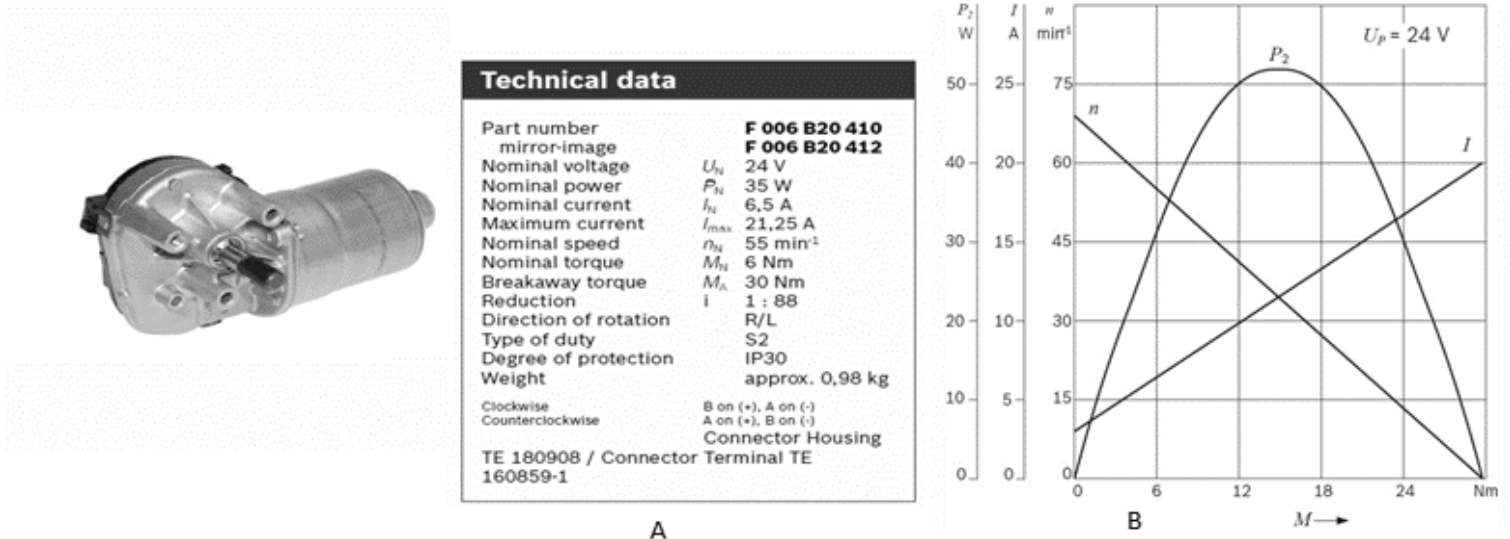


Figura 6. A) Características técnicas motor WSM3-IK. B) Curva característica del motor del dispositivo de rehabilitación para el tobillo [20].

5.2 Diseño Estructural.

El dispositivo consta funcionalmente de dos sistemas, un sistema es el que permite ejecutar las terapias en dos posiciones que son decúbito y sedente llamado *Sistema Tipo de Posición*. Éste sistema de 4 elementos (Tabla 12), 3 articulaciones de tipo revolución y una articulación prismática (mostrados en la Figura 7B) posibilita el ajuste de altura del apoyo de la fosa poplíteica con respecto al suelo de manera discreta por agujeros organizados cada centímetro de la barra deslizante, el rango de altura que se puede ajustar la máquina va desde la altura A a la B como muestra la Figura 7 en la cual corresponden a una medida de 34 a 42 cm respectivamente.

Tabla 12. Elementos y tipos de Articulación del sistema *Tipo de Posición* relacionados con las figuras 7A y 7B.

N.º Elemento	Nombre elemento	N.º Articulación	Tipo de Articulación
1	Base	1	Revolución
2	Apoyo Pierna	2	Revolución
3	Deslizadora	3	Revolución
4	Barra deslizante	4'	Prismática

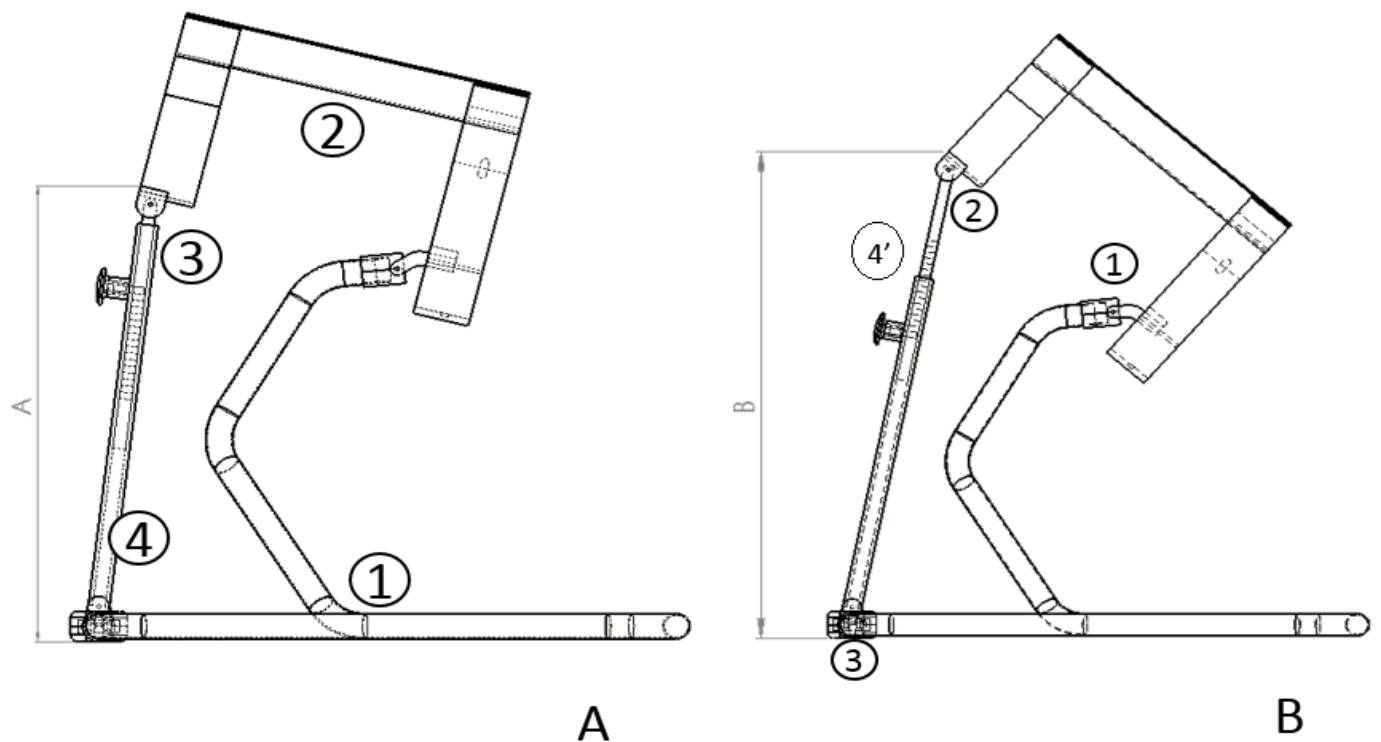


Figura 7. Ajuste de diferentes posiciones de terapia A) Elementos del sistema. B) Articulaciones del sistema.

El segundo sistema que es el encargado de efectuar directamente el movimiento de la terapia, cuenta con un motor eléctrico de corriente directa como accionamiento que entrega su potencia directamente desde su eje. Además, para ejecutar los cuatro movimientos del tobillo se pueden ajustar sus 4 elementos y 3 articulaciones de tipo revolución, la configuración de la máquina para cambiar el eje de acción de los cuatro movimientos del tobillo se muestra en la Figura 8.

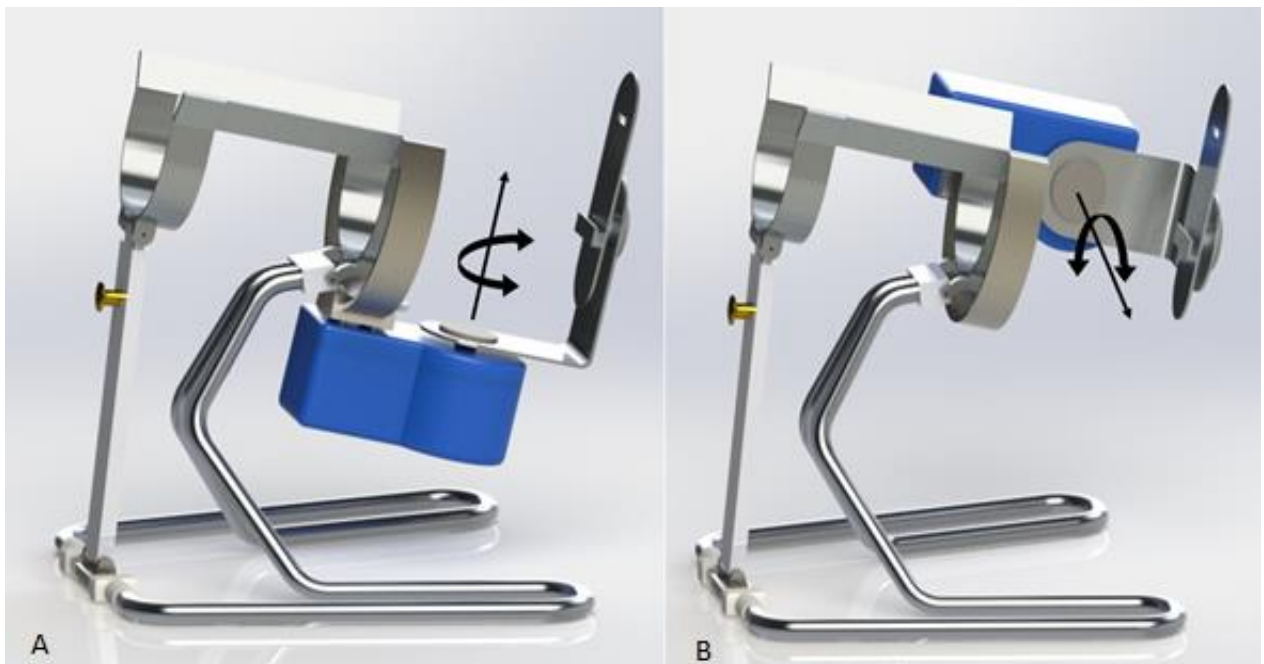


Figura 8. Configuración del sistema para aplicar los diferentes movimientos de la articulación del tobillo. A) Movimientos: Eversión/Inversión. B) Movimientos: Dorsiflexión/Flexión plantar.

El rango del deslizador sobre el riel en U permite un rango de movilidad de toda la estructura del motor de 180° lo que asegura la ejecución de la terapia en todos los movimientos planteados y además posibilita el buen uso tanto para el pie izquierdo como el pie derecho. El rango de movimiento se visualiza en la Figura 9.

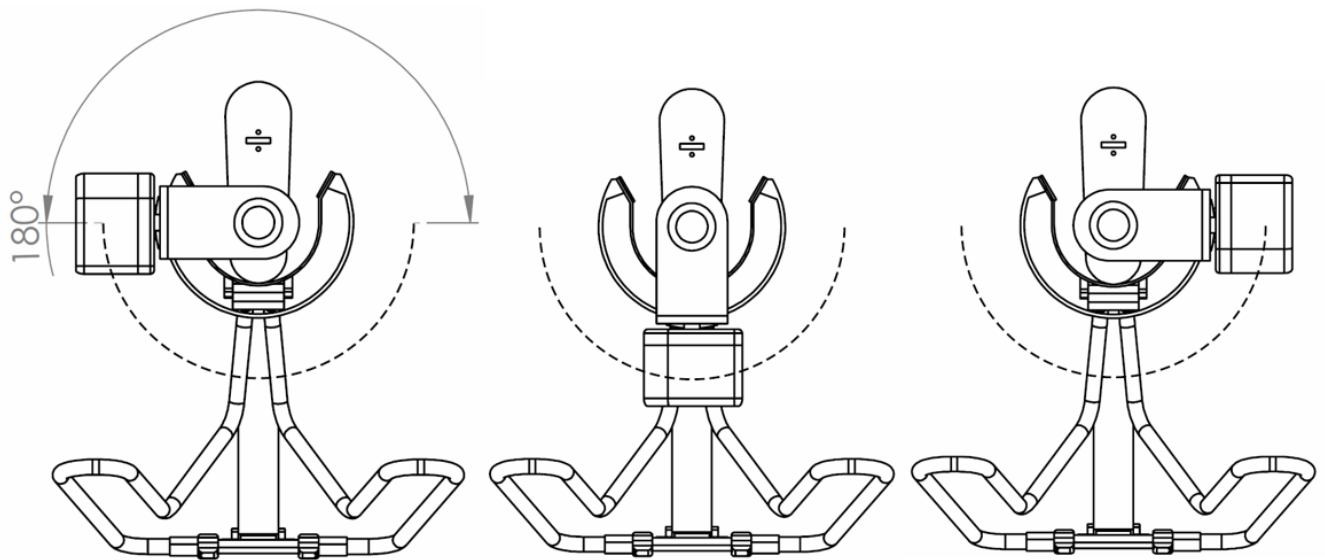
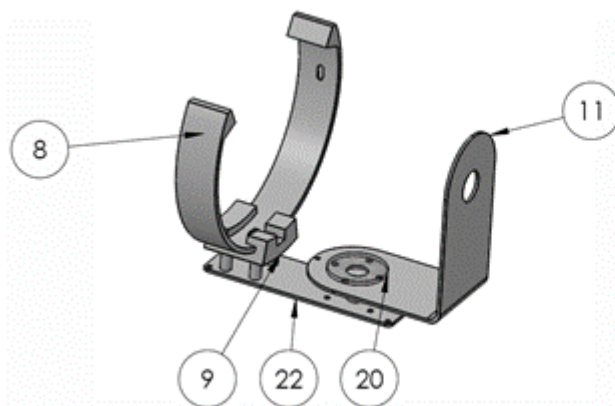


Figura 9. Rango de trabajo para la máquina de rehabilitación de la articulación de tobillo.

Como este sistema es el que soporta la actividad física del paciente, se estudió su comportamiento con un análisis estático a la cadena de elementos que reciben estas cargas Figura 10, cuyo estudio se lleva a cabo en los capítulos 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3.



N° DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA
8	Riel U
9	Deslizador
11	Elemento Ele
22	Estructura motor

Figura 10. Elementos de la estructura utilizados para el análisis en elementos finitos.

5.2.1 Elemento Ele

Primero se consideró el elemento que transmite la fuerza desde el motor al pie del paciente como una lámina en forma de L de 3 mm de espesor y material de aleación de aluminio cuyo límite elástico es de 350 MPa. El aporte máximo de torque considerado que ejerce el pie es de 6 Nm con 4 sujeciones fijas como muestra la Figura 12A. El enmallado de la figura 10B utilizado en el modelo corresponde a una calidad de malla de elementos cuadráticos de alto orden de 18757 número de elementos con 34607 nodos, la gráfica de la Figura 11 muestra una precisión del 96.13% cuando la máxima tensión de Von Mises alcanza la convergencia.

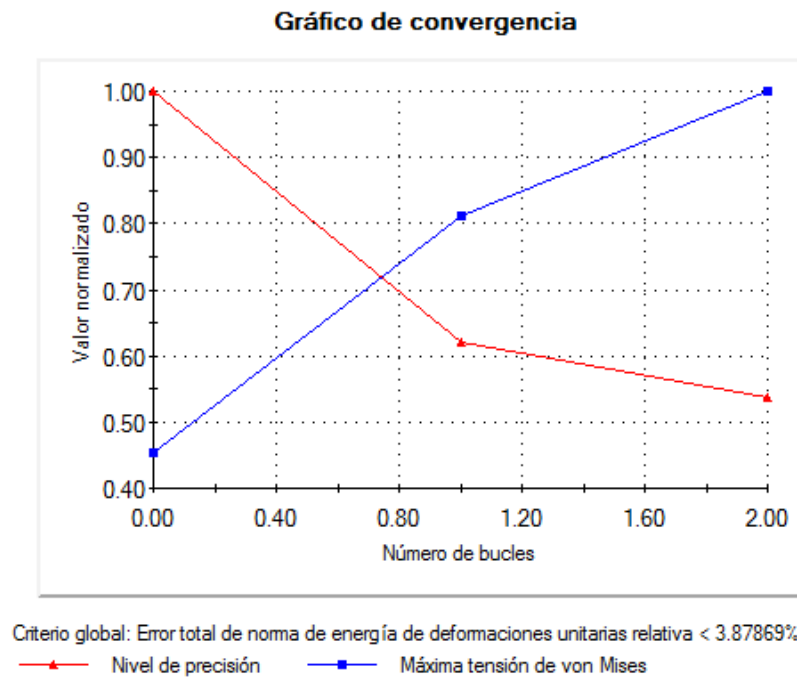


Figura 11. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para el elemento Ele.

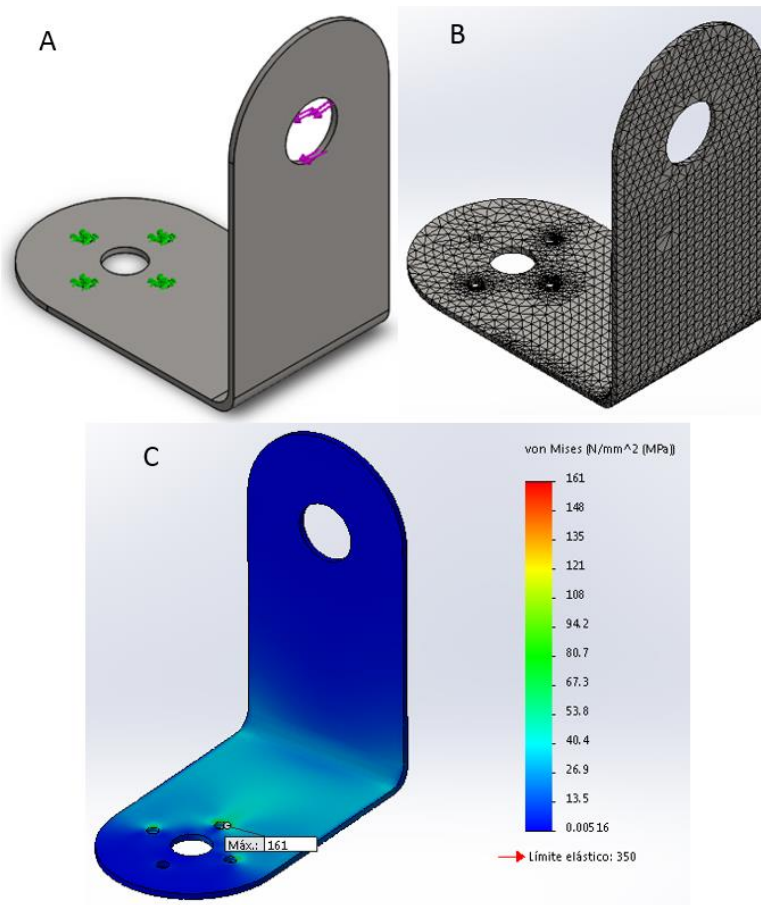


Figura 12. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para el elemento “ele”.

Por la simulación de elementos finitos del elemento se obtiene un esfuerzo máximo de Von Mises de 161 MPa donde se muestra en la Figura 12. Conociendo esto y el esfuerzo de fluencia se calculó el factor de seguridad (F.S) en la zona crítica por carga estática de la siguiente manera.

$$\sigma_{VM} = \frac{S_y}{F.S} \quad (1)$$

$$161 \text{ MPa} = \frac{350 \text{ MPa}}{F.S}$$

$$F.S = 2.17$$

5.2.2 Estructura motor

El otro elemento a considerar es la estructura que sostiene el motor desde el elemento deslizante del riel en U, la lámina es de aluminio de 3 mm de espesor cuyo límite elástico es de 27.57 MPa, la configuración de cargas y sujeciones se muestran en la Figura 14, el torque considerado actuando desde los 3 agujeros que ajustan el motor es de 6 Nm. El enmallado de la Figura 14B utilizado en el modelo corresponde a una calidad de malla de elementos cuadráticos de alto orden de 8108 número de elementos con 16019 nodos, la gráfica de la Figura 13 muestra una precisión del 98.39% cuando la máxima tensión de Von Mises alcanza la convergencia.

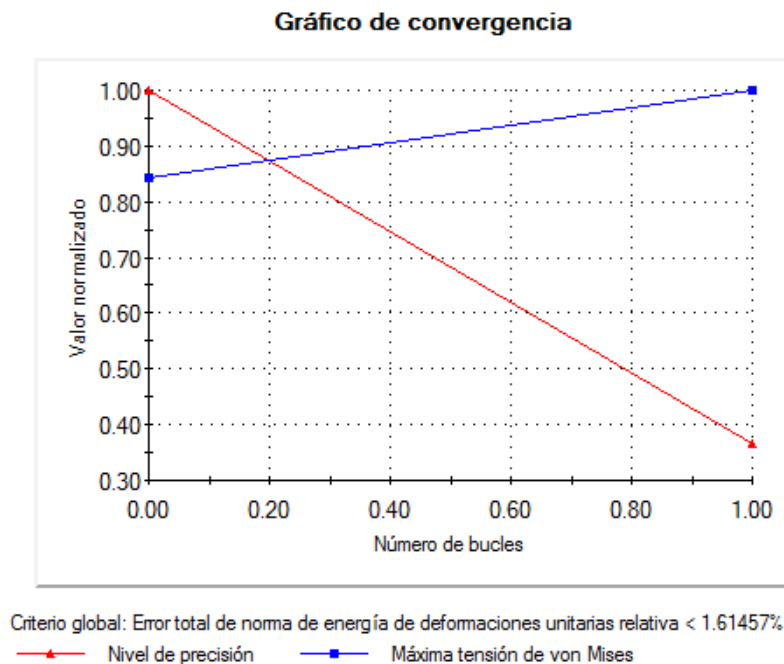


Figura 13. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para la Estructura Motor.

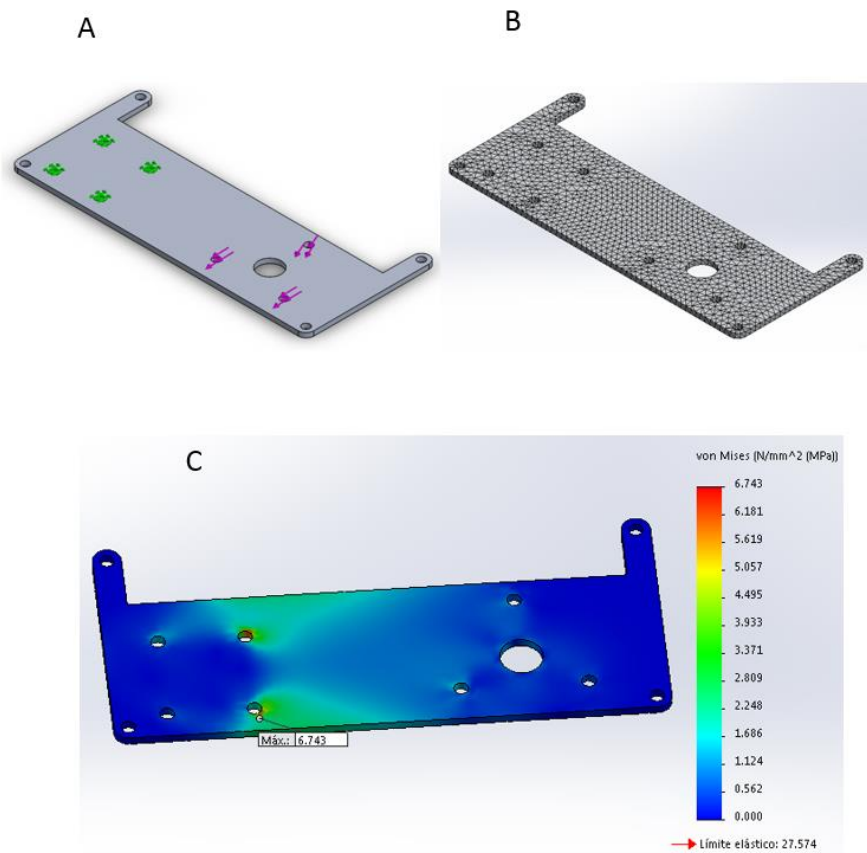


Figura 14. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para el elemento “estructura motor”.

El esfuerzo máximo de Von Mises con la geometría propuesta es de 6.74 MPa, si el esfuerzo de fluencia del material es de 27.57 MPa se obtiene por criterio de Von Mises (ecuación 1) un factor de seguridad $F.S = 4.1$ en la zona crítica la cual corresponde a dos de los agujeros de sujeción más próximos al eje del motor.

5.2.3 Riel en U y Deslizador.

Otros elementos críticos es la conexión entre el Riel en U, y el deslizador, ya que toda la carga que se produce durante la terapia va a ser transmitida hacia estos dos importantes elementos. Los materiales de los elementos son acero recocido de 470 MPa de límite elástico para el riel en U y aleación de aluminio con un límite elástico de 125 MPa para el deslizador. La carga que recibe el deslizador es la reacción del

elemento que se produce del análisis de la *estructura motor* como se muestra en la Figura 15.

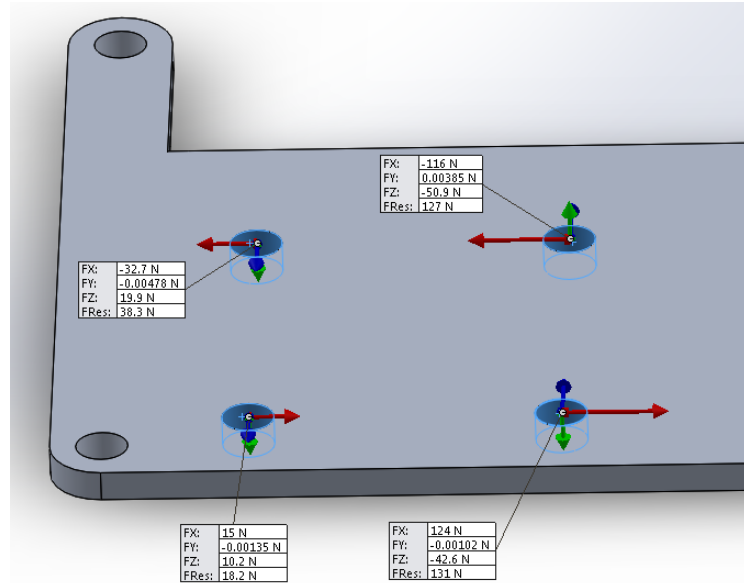


Figura 15. Reacción de fuerzas del elemento “estructura motor”.

La configuración de la geometría en las cargas se muestra en la Figura 17A caracterizada por una sujeción doble en los extremos del riel en U y 4 fuerzas resultantes de las reacciones del elemento *estructura motor*. El enmallado de la Figura 17B utilizado en el modelo corresponde a una calidad de malla de elementos cuadráticos de alto orden de 10796 número de elementos con 19878 nodos, la gráfica de la Figura 16Figura 13 muestra una precisión del 88.20% cuando la máxima tensión de Von Mises alcanza la convergencia.

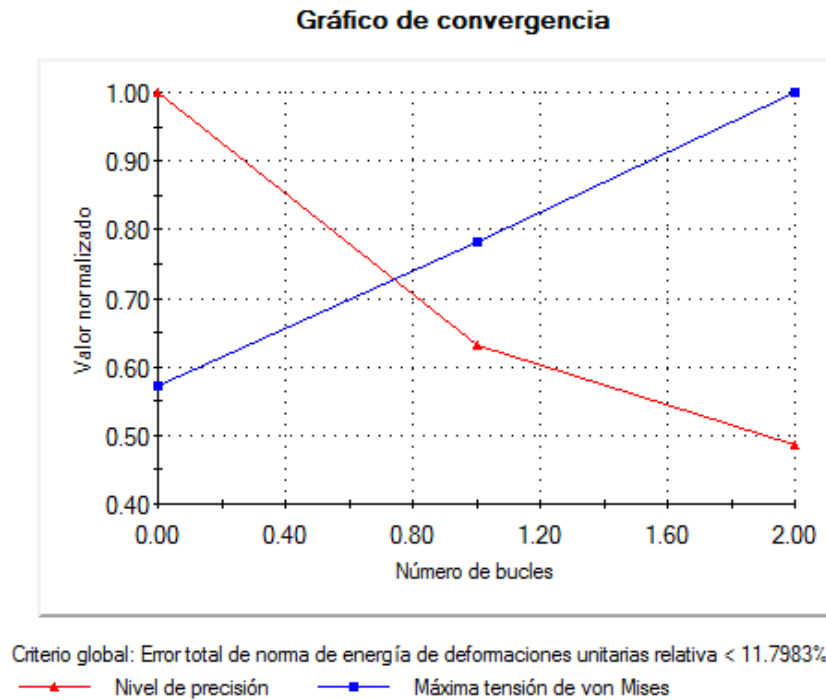


Figura 16. Gráfica de convergencia del análisis de elementos finitos para Riel en U y Deslizador.

El análisis en elementos finitos Figura 17C muestra que la zona crítica es el cambio de sección en las barras del deslizador con un esfuerzo de Von Mises de 25.48 MPa, si el esfuerzo de fluencia del material del deslizador es de 125 MPa se obtiene por criterio de Von Mises (ecuación 1) un factor de seguridad F.S= 4.9 en la zona crítica.

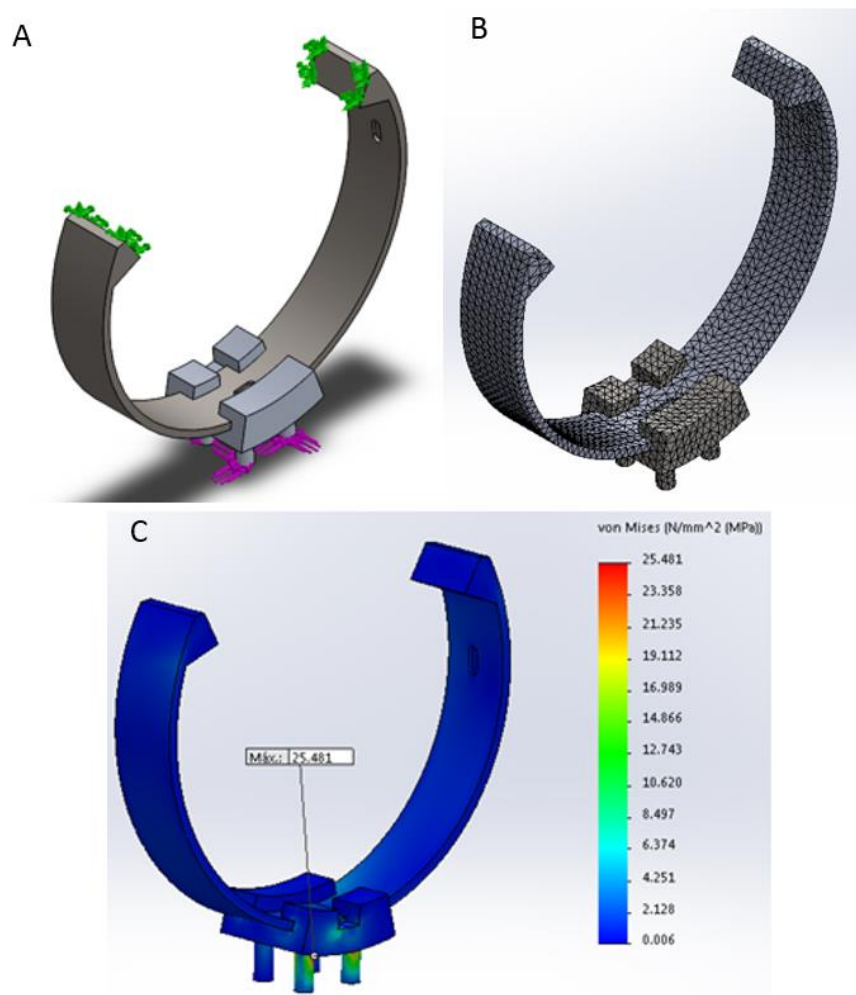


Figura 17. A) Suposiciones de carga y sujeciones. B) Enmallado del elemento. C) Distribución de esfuerzos de Von Mises por elementos finitos para los elementos “Riel en U” y “Deslizador”.

5.3 Análisis Modal.

Con los elementos descritos anteriormente se realizó un análisis modal para comprobar que el sistema Figura 18, no entrara en resonancia debido al actuador implementado está conectado directamente a la articulación y no se consideran disipadores.

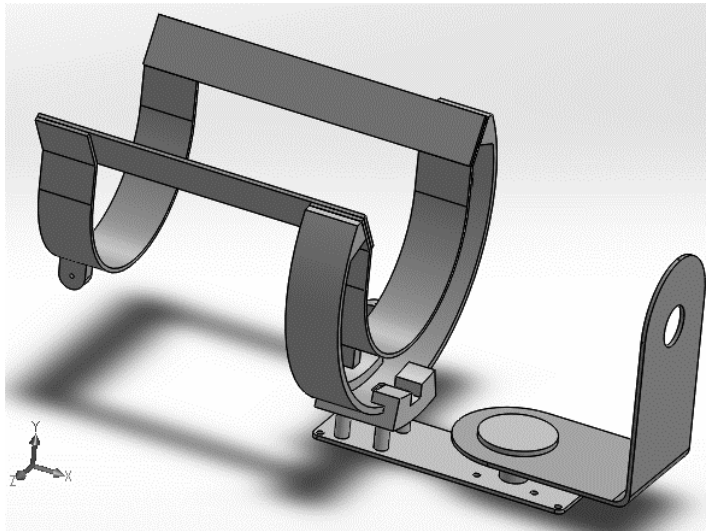


Figura 18. Configuración de los elementos considerados para el análisis modal.

La solución al modelo obtuvo 5 modos de vibración con sus respectivas frecuencias naturales listadas en la Tabla 13 con su respectiva gráfica representada en Figura 19.

Tabla 13. Lista de Frecuencias naturales [Hz] del sistema de rehabilitación con sus respectivos modos.

N° de modo	Frecuencia [Hz]
1	20
2	36
3	43
4	56
5	58

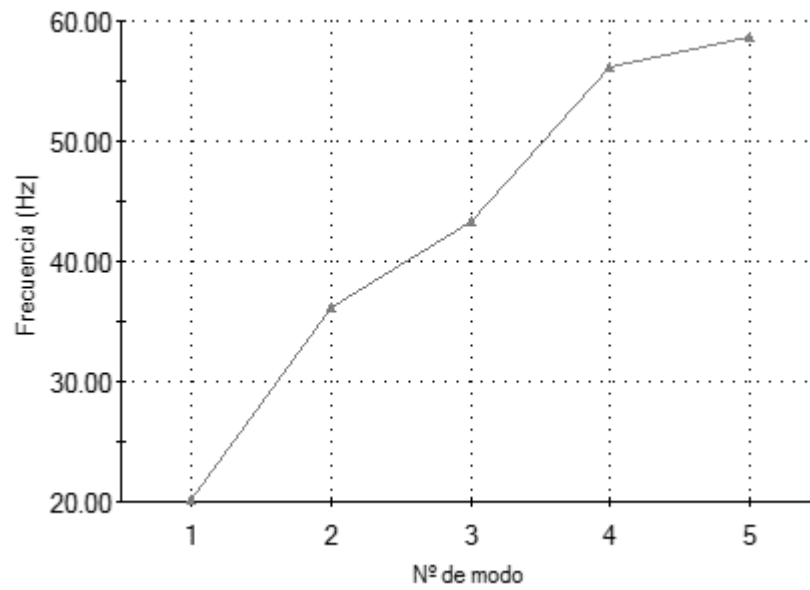


Figura 19. Frecuencias naturales [Hz] del sistema de rehabilitación.

Los primeros dos valores críticos del sistema corresponden a una frecuencia de 20 [Hz] y 36 [Hz], respectivamente, para los dos primeros modos, comparando con actuadores de velocidades de cercanas a 700 RPM con frecuencias de 10 Hz [21] se puede concluir que la frecuencia natural del sistema no resulta crítica ya que el motor utilizado para la aplicación posee una velocidad nominal baja de 55 RPM.

6. DISEÑO INFORMÁTICO

El sistema cuenta con tres usuarios las cuales son el paciente, el auxiliar y el especialista; el paciente cuenta con dos estados posibles (observador y configurador), es decir, que el diagrama presentado se registran cuatro posibles actores. Como se puede ver en la Figura 20, todos los usuarios interactúan con el sistema de rehabilitación por lo que fue importante alcanzar los requerimientos de diseño en función de las necesidades de éstos. Para que el uso principal “*Aplicar el protocolo*” pueda implementarse el sistema hacia el paciente observador cuenta con dos usos más que son “*seleccionar protocolo y establecer posición inicial*” por parte del auxiliar y del paciente observador. Adicionalmente, en el Anexo 4 del diagrama UML de casos de usos se detalla la función de cada actor fuera del sistema.

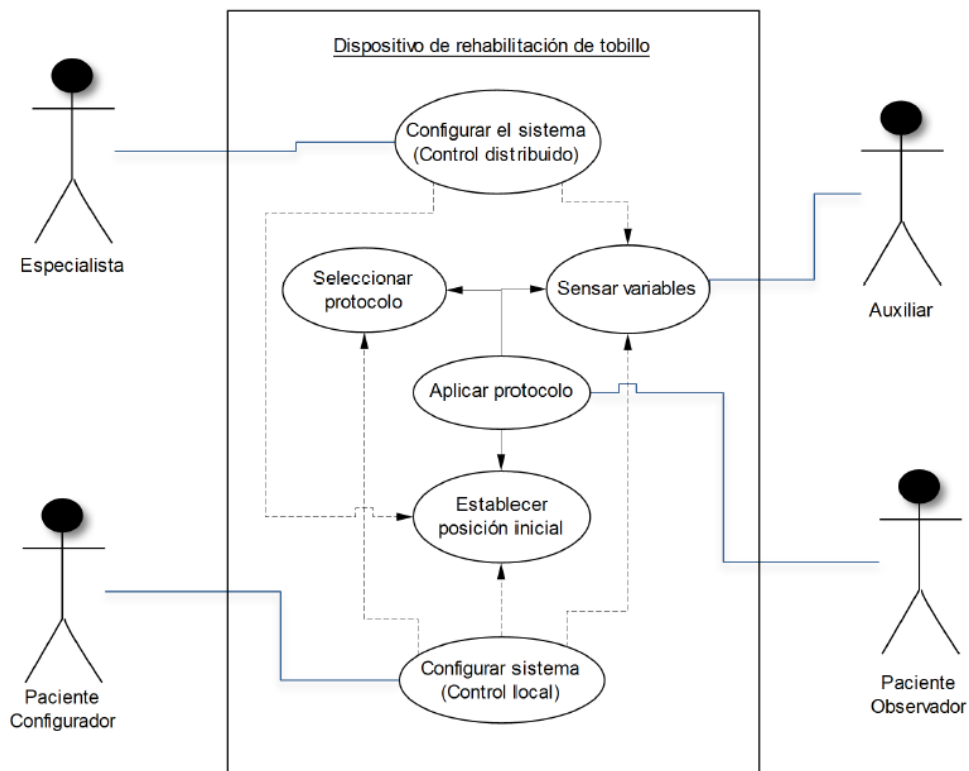


Figura 20. Diagrama de casos de uso UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.

Para detallar la arquitectura final del sistema, se realizó un diagrama IDEF0 representado en la Figura 21, en donde se muestran las entradas (Fuente de energía, Paciente, Variables de terapia) y salidas del sistema (Resultados de terapia, Mensajes de salida, Movimientos terapia) y como control de la máquina se tiene la *Configuración*.

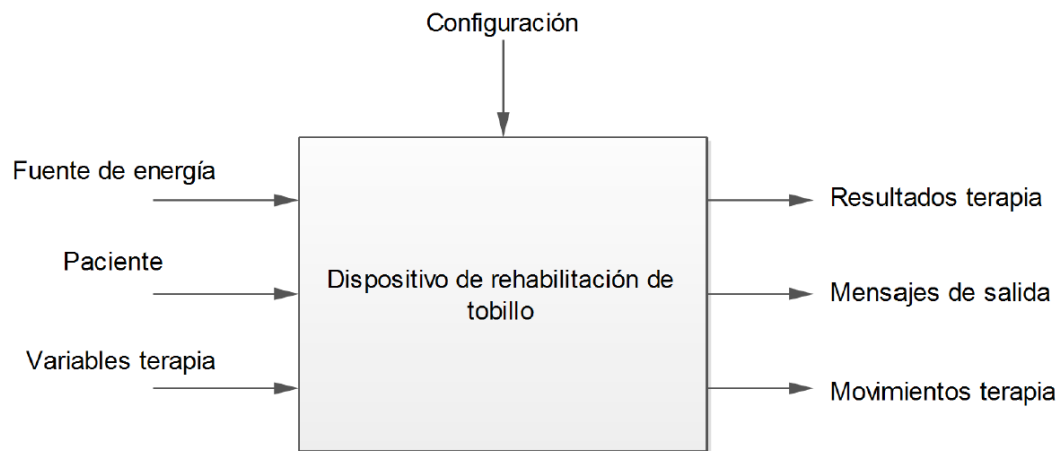


Figura 21. Diagrama IDEF0 de entradas y salidas del sistema de rehabilitación de tobillo.

La Figura 22 presenta una representación detallada en donde se muestran las interacciones entre los componentes del sistema de rehabilitación. Primero se tiene el sistema de comunicación H/M (sistema de comunicación Hombre/Máquina) cuyas entradas provenientes fuera del sistema de rehabilitación de tobillo son *Tipo de terapia*, *Paciente* y *Configuración*. De salida directa fuera del sistema son los *Mensajes del sistema* y también tiene salidas que comparten las entradas para el sistema de control y sistema informático. Otra entrada directa fuera del sistema es la fuente de energía que pertenece a una entrada del sistema de potencia cuya única salida pertenece a una entrada del sistema de control. El sistema mecánico y el sistema informático cuyas entradas provenientes del sistema de control y sistema

de comunicación H/M tiene como salidas fuera del sistema los *Movimientos de terapia* y *Resultados de terapia*.

Como se puede apreciar, el sistema de comunicación H/M y el sistema mecánico desempeñan un papel crucial en el funcionamiento del sistema de rehabilitación a la hora de interactuar con el público objetivo del proyecto. Como también cabe resaltar la función de los otros componentes como el sistema de potencia que transforma y distribuye la energía al sistema de control que maneja el sistema electrónico que cuenta con elementos de entrada/salida (Sensores/actuadores) que son comunicados a través del sistema informático.

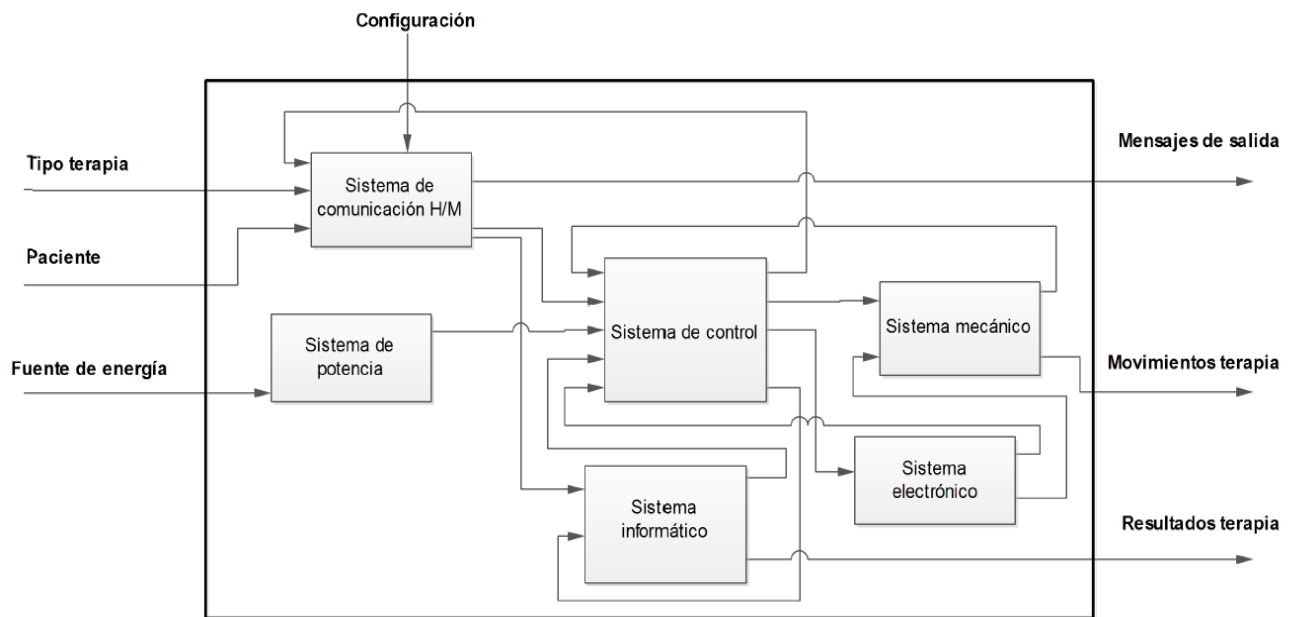


Figura 22. Diagrama IDEFO de la arquitectura mecatrónica del sistema de rehabilitación de tobillo.

6.1 Diseño interfaz gráfica.

Se desarrolló una interfaz gráfica que permite al especialista configurar, monitorear y analizar el proceso de terapia del paciente. La interfaz cuenta con una serie de 4 paneles (Identificación, Terapia – Prog, Terapia y Resultados) las cuales se listan en la parte izquierda de la interfaz general AndiTherapy como se muestra en la Figura 23.

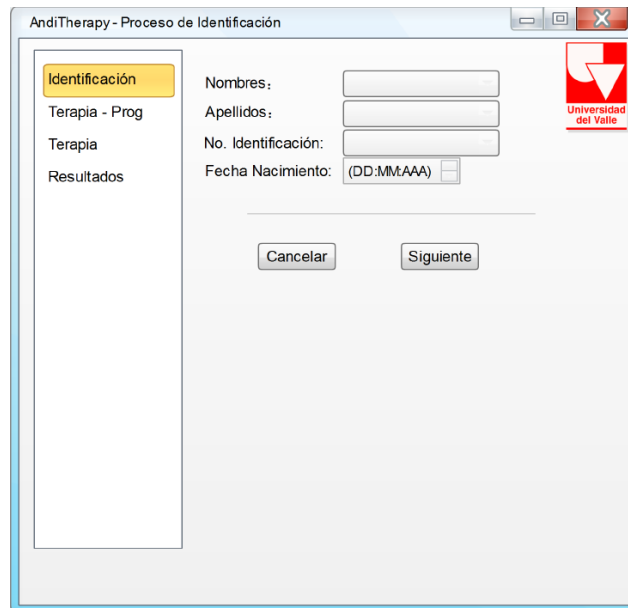
The image shows a software window titled "AndiTherapy - Proceso de Identificación". On the left side, there is a vertical menu with four items: "Identificación" (highlighted with a yellow background), "Terapia - Prog", "Terapia", and "Resultados". To the right of this menu, there are four input fields: "Nombres:" (a single-line text box), "Apellidos:" (a single-line text box), "No. Identificación:" (a single-line text box), and "Fecha Nacimiento:" (a date picker showing "(DD:MM:AAA)"). Below these fields are two buttons: "Cancelar" and "Siguiente". In the top right corner of the window, there is a red logo with a white stylized 'U' and the text "Universidad del Valle" below it.

Figura 23. Interfaz gráfica primer panel de identificación.

En el primer panel *Proceso de Identificación* el especialista podrá ingresar los datos del paciente como Nombres, Apellidos, número de identificación y la fecha de nacimiento. Al continuar el proceso se cargará el siguiente panel que es *Programación de Terapia* Figura 24.

Figura 24. Interfaz gráfica segundo panel de Programación Terapia.

En este panel se listan los datos registrados del paciente en la parte superior y además habilita los campos para configurar la terapia con velocidad, rango de movimiento y número de repeticiones, si se trabaja en terapia activa se habilita otro campo para especificar el porcentaje de fuerza que se le ejerce a la articulación.

Al hacer clic en el botón *siguiente* empezará el protocolo de terapia en donde se podrán apreciar en vivo los datos de terapia como la velocidad, número de repeticiones y el progreso total de la terapia. Además, cuenta con un botón de parada de emergencia en el caso de que se presenten problemas en medio de la terapia como muestra la Figura 25.

Figura 25. Interfaz gráfica tercer panel de Terapia Actual.

Al terminar la terapia se accederá al último panel donde se podrán apreciar la máxima velocidad, el máximo torque y el tiempo total de la terapia, además, se podrán comparar resultados con las gráficas disponibles que son Torque Vs Tiempo y Velocidad Vs Torque. Todos estos valores se guardarán en la base de datos automáticamente y además el especialista tiene la posibilidad de imprimir los resultados en físico. Este último panel se muestra en la Figura 26.

AndiTherapy - Resultados Terapia

Identificación

Terapia - Prog

Terapia

Resultados

Nombres Paciente Apellidos Paciente

No. Identificación

Edad [años] # Terapias

Tipo de terapia ☐ Activa ☒ Pasiva

Velocidad Máxima [°/min]

Torque Máximo [Nm]

Tiempo Total [min]

% Terapia Completada

100%

Gráficas

Velocidad Vs Torque
Torque Vs Tiempo
Velocidad Vs Torque

Generar gráfica

Imprimir Resultados Salir



Figura 26. Interfaz gráfica cuarto panel de Resultados.

7. DISEÑO ELECTRÓNICO

En esta sección se describe el componente electrónico de los sistemas del diagrama IDEF0 mostrados anteriormente en la Figura 21.

Se utilizó un modelo de arquitectura electrónica mostrado en la Figura 27, para describir los modos de operación local y distribuida del proyecto. En general, los dos modos de operación para la configuración de terapia son necesarios. El modo de operación local permite ajustar los rangos de movimiento iniciales del paciente por medio del *Control del Mando* cuya comunicación se da gracias al *Mando Máquina*. Y gracias a los *módulos inalámbricos* se da el control distribuido por comunicación y adquisición de los datos ingresados en el PC que por comunicación USB se cargan a la interfaz SR-PC hacia el *Control del Mando* por comunicación UART.

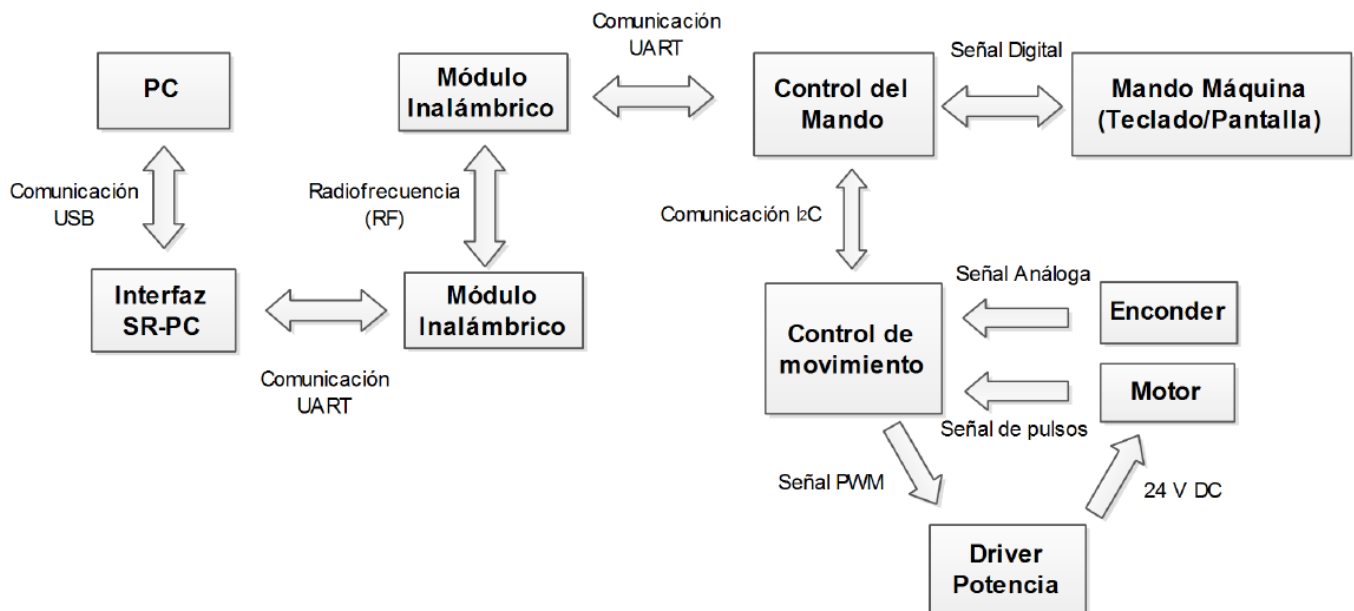


Figura 27. Arquitectura de control.

El control del mando se caracteriza por tener una pantalla de visualización necesaria para brindar información al auxiliar o el paciente, integrado con comunicación SPI para disminuir la cantidad de cables usados en el sistema. Además, el *Mando Máquina* cuenta con un teclado de membrana con botones necesarios para ajustar

las posiciones de movimiento de la terapia y un botón de parada de emergencia que parará la terapia de forma inmediata.

Para el control de movimiento se seleccionó una plataforma de hardware libre como la placa Arduino que facilita la integración con los demás circuitos. Su integración con el microcontrolador ATmega 1280 y su facilidad para la programación y comunicación con el PC destacan dentro de sus características que además por su procesamiento soporta la compleja tarea de controlar el mecanismo.

Con el uso del Arduino se escogió el driver de potencia 50A Dual-Channel el cual es compatible con esta placa. Esta unidad permite dar potencia, controlar el sentido de giro y velocidad del motor. Para la medición angular del giro del motor se cuenta con un encoder a la salida del actuador para retroalimentar la información de velocidad y posición del actuador. En el anexo 5 se encuentran listadas las especificaciones de los elementos mencionados en esta unidad.

8. ANÁLISIS DE COSTOS

En esta última sección se presenta la estimación de los costos de los elementos a implementar y el valor por manufactura de todas las piezas de la máquina. En la Tabla 14 se muestra la lista de los elementos a manufacturar en la primera columna, la cantidad de piezas del mismo tipo, el peso de la pieza (Calculado a través de software CAD), el valor por Kilogramo de material suministrado por un taller y por último se tiene el valor total por pieza y el total de toda la manufactura, los valores suministrados en las tablas fueron consultados en el primer trimestre del año 2015.

Tabla 14. Cotización de la manufactura de las piezas.

Ítem	Cantidad	peso [Kg]	valor [\$/Kg]	Total [COP]
Acople Motor	1	0,15	6500	\$ 975,00
Base Deslizante	1	0,11	13000	\$ 1.430,00
Base Rodilla	1	0,43	13000	\$ 5.590,00
Deslizador	1	0,51	6500	\$ 3.315,00
Deslizante hueco	1	0,28	13000	\$ 3.640,00
Deslizante dentada	1	0,2	13000	\$ 2.600,00
Ele	1	0,22	13000	\$ 2.860,00
Estructura Motor	1	0,09	13000	\$ 1.170,00
Lámina Zapato	1	0,18	13000	\$ 2.340,00
Palanca Deslizador	1	0,04	6500	\$ 260,00
Pivote Riel	2	0,13	6500	\$ 1.690,00
Pivote Deslizante	2	0,03	6500	\$ 390,00
Riel	1	0,92	6500	\$ 5.980,00
Botón	1	0,04	6500	\$ 260,00
Procesos Manufactura				\$ 600.000,00
Total				\$ 632.500,00

Tabla 15. Cotización de los componentes de la máquina de rehabilitación.

Ítem	Cantidad	Marca	Total [COP]
Pernos + Rosca	34	Kraemer	\$ 15.000,00
Chaveta	1	-	\$ 4.000,00
Motor	1	Bosch	\$ 500.000,00
Cableado	-	-	\$ 15.000,00
Enconder	2	Numerik Jena	\$ 170.000,00
Elementos electronicos	-	-	\$ 150.000,00
Telas	2 m^2	GORETEX	\$ 80.000,00
Arduino Mega	1	Arduino	\$ 65.000,00
Total			\$ 999.000,00

La Tabla 15 muestra los componentes del equipo que en total se cotizaron a un valor de 1'000.000 COP. En total el proyecto se estimó a un costo de **1'632.500 COP** sin contar el costo total por personal involucrado en todo el proyecto como logística y personal de ejecución del proyecto, aun así se estima un costo menor que los precios de los equipos comerciales consultados en la matriz del anexo 2.

9. REPRESENTACIÓN FINAL DE LA MÁQUINA

Finalmente, en la Figura 28 se muestra una vista del dispositivo recreado en ambiente CAD de la propuesta de diseño desarrollada dentro del proyecto. El diseño transmite un ambiente de tranquilidad con los tonos azules utilizados, además su diseño ligero evita la sensación de encierro por parte del paciente. Los elementos diseñados no se desplazan más de 3 milímetros por lo que transmiten una sensación de estructura sólida. El despiece y los planos de construcción de los elementos se pueden apreciar en el anexo 6.



Figura 28. Representación del dispositivo de rehabilitación física para la articulación de tobillo diseñado.

10. CONSTRUCCIÓN CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA

Se construyó un modelo enmarcado al diseño conceptual resaltando en la máquina las siguientes características:

- Disponibilidad de realizar la terapia en dos posiciones: decúbito y sedente.
- Disponibilidad de realizar 4 movimientos del pie: Plantar/Dorsiflexión, inversión/Eversión.
- Control de la velocidad con un máximo de hasta [120°/s].

El prototipo fue construido con materiales reciclados como PVC, madera y acero con un peso total de 3.8 Kg la lista completa de materiales usados se encuentran en la Figura 29.

En cuantos materiales electrónicos se contó con un motor DC HOTEK de 12 V, un microcontrolador Atmel ATmega 16, para el control de la velocidad de motor se usó PWM, Fuente para bajar de 110V a 12 V, circuito de conexión cable USB para la transferencia de protocolo entre PC y máquina.

# Pieza	Nombre	Cantidad	Material
1	Base	1	Madera MDF
2	Deslizante hueco	1	Aluminio
3	Deslizante	1	Madera
4	Base en Ele	2	Acero
5	Bisagras	3	Acero
6	Deslizador	1	Madera
7	Acople PVC	2	Madera MDF
8	Felpa	1	PVC
9	Estructura motor	1	Acero
10	Lámina zapato	1	Madera MDF
11	Ele	1	Acero
-	Tornillos	20	Acero

Figura 29. Lista de materiales usados para la construcción del prototipo.

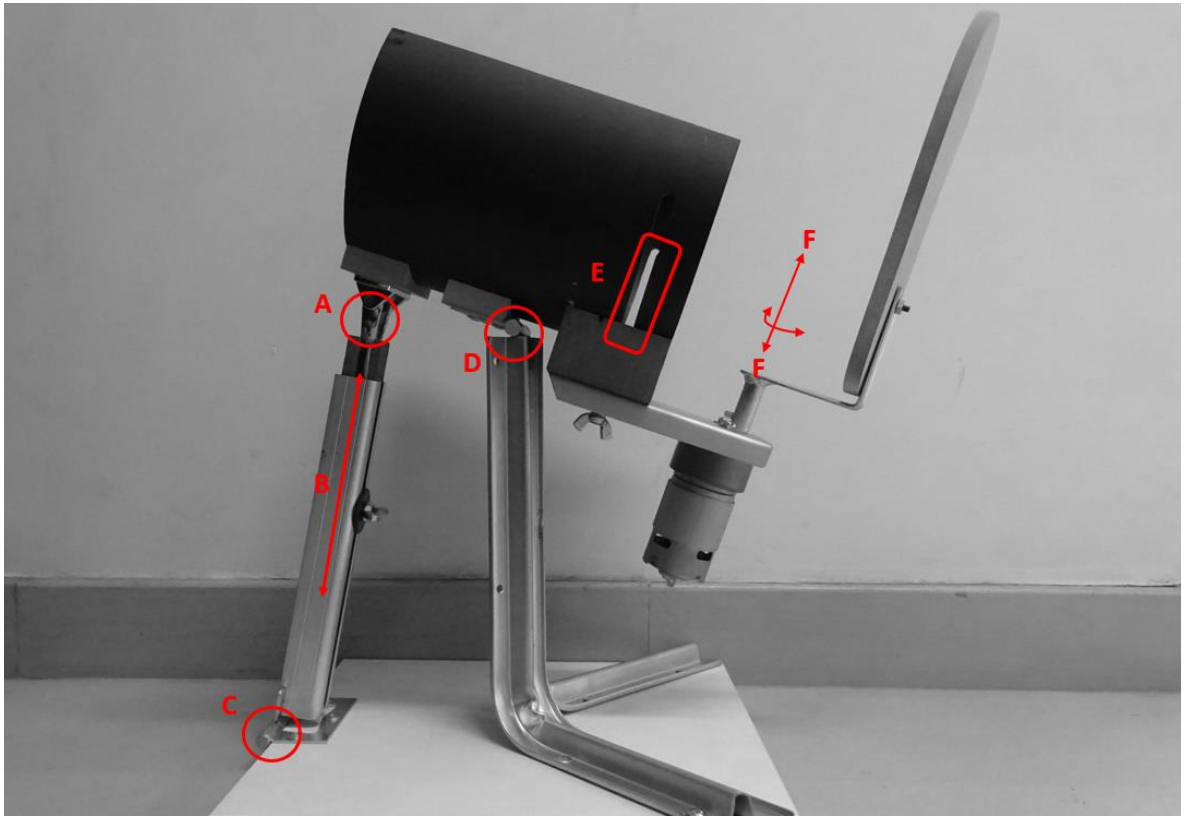


Figura 30. Prototipo construido con sus características estructurales resaltadas.

En la Figura 30 se puede apreciar el prototipo construido, las articulaciones rotativas (A, C, D) y la articulación prismática B garantizan que se efectúen las dos posiciones de terapia como se explicó antes en el capítulo 5.2. La ranura E garantiza el deslizamiento del *Deslizante* con una rotación máxima de 180° para poder acomodar el eje F-F del motor para poder así realizar 4 movimientos de la articulación del tobillo.

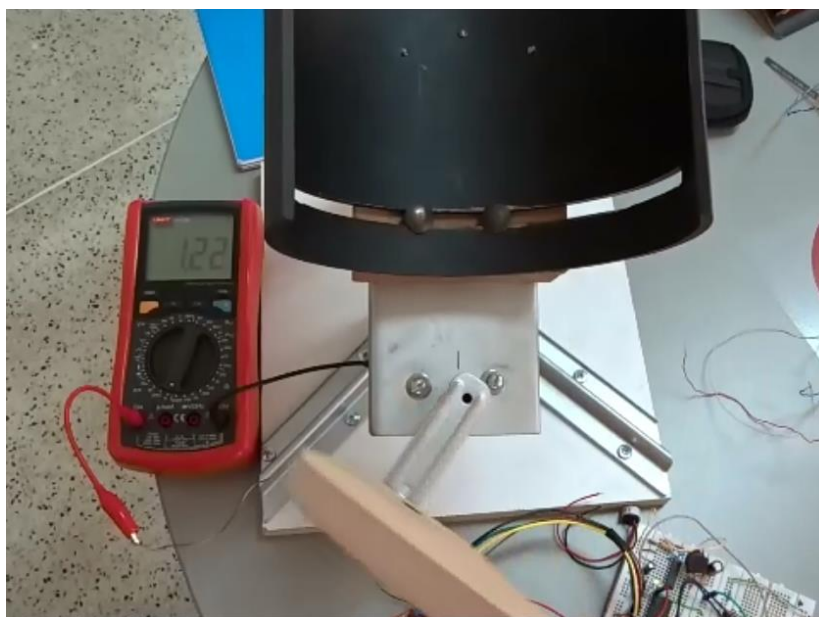


Figura 31. Prueba del prototipo a velocidad máxima.

Se midió el consumo de energía de la máquina mientras efectuaba la terapia, la potencia fue calculada con la medición en serie del consumo de corriente del motor como lo muestra la Figura 31; se hicieron dos pruebas, una a velocidad del 20% de la velocidad máxima posible y la segunda al 100%. No hubo variaciones de torque ya que las pruebas se realizaron a un torque constante. Los resultados están listados en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados del consumo de la máquina para dos diferentes velocidades de terapia.

# Prueba	Velocidad terapia [°/s]	Corriente [mA]	Potencia consumo [W]
1	24	300	3,6
2	60	595	7.1
3	120	1150	13,8

11 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

11.1 CONCLUSIONES

- Cumpliendo los objetivos planteados, se diseñó de forma satisfactoria una máquina de rehabilitación física para la articulación de tobillo. La integración de los componentes mecánico, electrónico e informático plantea el funcionamiento de las siguientes características:
 - ✓ Tipos de terapia: Activa y pasiva.
 - ✓ Tipos de movimiento: Flexión plantar, flexión dorsal, eversión, inversión.
 - ✓ Velocidad: Hasta 150 [°/s]
 - ✓ Capacidad para usuarios entre 46 [Kg] a 88 [Kg] de peso y 146 [cm] a 180 [cm] de altura.
 - ✓ Peso máquina: 8.8 Kg.
- Las especificaciones propuestas de la máquina son resultado de dictámenes del profesional de la salud y el paciente para casos de población colombiana.
- Los rangos de movimiento alcanzados por la máquina permiten al paciente realizar la terapia con los rangos angulares para recuperar el movimiento necesario de las actividades de la vida diaria.
- Se diseñó la interfaz de comunicación entre máquina y especialista que permite configurar, monitorear y analizar el proceso de terapia del paciente.

11.2 TRABAJO FUTURO

- Realizar un estudio más amplio del desarrollo electrónico e informático de la máquina que permita llevar a cabo un plan de construcción.
- Realizar el plan de proyectos y el análisis económico para implementar el sistema en territorio colombiano.
- Desarrollar y mejorar el prototipo realizado para su construcción a escala real de la máquina de rehabilitación de la articulación de tobillo.
- Realizar un plan de mantenimiento preventivo para la máquina de rehabilitación una vez se implemente la propuesta.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Maldonado Copello, «Descentralización territorial en Colombia: Situación y perspectivas de política,» FRIEDRICH EBERT STIFTUNG, Bogotá, 2010.
- [2] M. Aguilera Peña, «División política administrativa de Colombia,» *Credencial Historia*, nº 145, 2002.
- [3] W. E. Garret JR, D. T. Kikendall y S. R. Contiguglia, *Medicina del Fútbol*, Editorial Paidotribo, 2005.
- [4] D. R. Center, «Tratamientos y técnicas de fisioterapia,» [En línea]. Available: <http://www.davidarehabilitacion.com/fisioterapia-tratamientos.php>. [Último acceso: 13 Abril 2013].
- [5] DANE, «Marco Legal de la Discapacidad (Recopilación efectuada por la Vicepresidencia de la Republica),» 2005. [En línea]. Available: www.dane.gov.co/files/investigaciones/discapacidad/marco_legal.pdf. [Último acceso: Noviembre 2004].
- [6] O. Bernal, «La salud en Colombia: Logros, retos y recomendaciones,» 08 Junio 2012. [En línea]. Available: <http://saludpublica.uniandes.edu.co/?p=809>. [Último acceso: Mayo 2013].
- [7] O. F. Roca, *Telemedicina*, Ed. Médica Panamericana, 2001.

- [8] A. I. Escalona Orcao y C. Diez Cornago, «Retos y Problemas de la Accesibilidad a Servicios en Zonas Despobladas,» *Geo Crítica*, vol. IX, nº 188, 2005.
- [9] O. M. d. I. S. Ginebra, «Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud,» Ginebra, 2001.
- [10] M. T. Lacomba, *Guía de Masoterapia para Fisioterapeutas*, Ed. Médica Panamericana, 2006.
- [11] Biodex, «The most popular and advanced dynamometer in the world... better and easier to use,» Biodex, 2013. [En línea]. Available: <http://www.biodex.com/physical-medicine/products/dynamometers/system-4-pro>. [Último acceso: Abril 2013].
- [12] P. S. Wimpenny, «Isokinetics,» [En línea]. Available: <http://www.isokinetics.net>. [Último acceso: Abril 2013].
- [13] L. M. Palmer y M. E. Epler, *Fundamentos de las técnicas de evaluación muculoesquelética*, PAIDOTRIBIO, 2002.
- [14] R. M. Marrero, *Biomecánica clínica del aparato locomotor*, Barcelona: MASSON, 2000.
- [15] R. L. H. R. C. R. G. R. F. B. R. D. C. P. S. M. y R. C. Z. P. Diez García, «Efecto del ejercicio excéntrico, isocinético e isotónico en la fuerza muscular del tobillo en pacientes con esguince,» *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 16, nº 4, p. 8, 2004.

- [16] M. Nordin y V. H. Frankel, *Biomecánica Básica del Sistema Musculoesquelético*, Antofagasta: McGRAW HILL INTERAMERICANA, 2005.
- [17] J. Croney, *Antropometría para diseñadores*, Gustavo Gili, 1978.
- [18] J. A. Saglia, N. G. Tsagarakis, J. S. Dai y D. G. Caldwell, «A High Performance 2-dof Over-Actuated Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation,» de *Koebe International Conference Center*, Japón, 2009.
- [19] J. Gao, H. Yue, X. Zhabg y G. Lu, «Design and Kinematics Simulation of Parallel Robots for Ankle Rehabilitation,» *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 109-113, 2006.
- [20] BOSCH, «D.C motors with transmission WSM3-IK,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.bosch-elektromotoren.de/>. [Último acceso: Mayo 2015].
- [21] Tecnun, «Determinación de los parámetros del doble lazo de posición y velocidad del motor de un accionamiento,» Universidad de Navarra, [En línea]. Available: <http://www.tecnun.es>. [Último acceso: 05 2015].
- [22] W. E. Prentice, *Técnicas de rehabilitación en medicina deportiva*, Editorial Paidotribo, 2001.
- [23] R. G. Gurdynas y K. J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw Hill, 2008.

13. ANEXOS

Anexo 1

En este primer anexo se presentan las entrevistas semiestructuradas que se les hicieron a pacientes y a profesionales de la salud con el fin de recopilar información de las experiencias y protocolos manejados en cada terapia. Esta información luego iba ser procesada para plantear algunos requerimientos para la máquina de rehabilitación de tobillo.

ENTREVISTA

A. Modelo 1: Pacientes actuales

1. ¿Cuál es su profesión?
2. ¿Cuál es su edad?
3. ¿Cuál es su peso?
4. ¿Cuál es su estatura?
5. ¿Cuál es su lado dominante y en qué lado se presenta la lesión?
6. ¿Cuál fue la razón que lo motivo a la búsqueda de un especialista de la salud? (fractura, dolor o restricción de movimiento).
7. ¿Es su primera lesión o ha sufrido lesiones recidivantes, cuantas?
8. ¿Lleva a cabo con juicio los deberes asignados por el profesional de la salud?
9. ¿Tiene en cuenta las precauciones, cuidados y ejercicios para el hogar dejados por el fisioterapeuta durante la realización de sus AVD?
10. Si no los cumple, ¿cuál es la razón para no hacerlo?
11. ¿Cómo siente que es la comunicación con los profesionales de la salud?
12. ¿Cuál es su percepción de los dispositivos empleados en los centros de rehabilitación?
13. ¿Siente que el ejercicio realizado con estos equipos es útil, es decir siente cambios positivos (mejorías)?
14. ¿Siente que los equipos empleados para su rehabilitación son cómodos o justos a su medida?
15. ¿Cuál es su percepción de los protocolos o procedimientos empleados en los centros de rehabilitación?
16. ¿Ha notado falta de fuerza, debilidad o poca resistencia en su tobillo?
17. ¿Ha visto limitado su normal desarrollo en AVD? (a nivel laboral)
18. ¿Cuál es el nivel máximo al que puede usar su tobillo sin dolor para sus actividades de la vida diaria?

B. Modelo 2: Pacientes recuperados

1. ¿Cuál es su profesión?
2. ¿Qué edad tenía cuando se lesionó?
3. ¿Hace cuánto fue?
4. ¿Cuál es su peso?
5. ¿Cuál es su estatura?
6. ¿Cuál es su lado dominante y en qué lado se presentó la lesión?
7. ¿Cuál fue la razón que lo motivó a la búsqueda de un especialista de la salud? (fractura, dolor o restricción de movimiento)
8. ¿Cómo sintió que fue la comunicación con los profesionales que lo atendieron?
9. ¿Cuáles y cómo fueron los protocolos implementados, coméntelos?
10. ¿Qué tan efectiva fue la rehabilitación?
11. ¿Sintió que fueron suficientes los protocolos aplicados?
12. ¿Ha sufrido lesiones recidivantes?
13. ¿Cuántas veces las ha sufrido?
14. ¿El Fisioterapeuta le recomendó, posterior a la rehabilitación, realizar ejercicios para fortalecimiento muscular o algún otro complemento para mantener saludable la articulación lesionada y la articulación contraria? (estiramiento, gimnasio, natación, etc.)
15. ¿Ha visto o vio limitado su normal desarrollo en AVD?
16. ¿Cuál es el nivel máximo al que podía usar su tobillo sin dolor para sus actividades de la vida diaria?
17. ¿Ha notado o noto falta de fuerza, debilidad o poca resistencia en su tobillo?
18. ¿Cómo percibió el protocolo aplicado para la recuperación de hombro?
19. ¿Sintió que el ejercicio realizado con estos equipos fue útil, es decir sintió cambios positivos (mejorías)?
20. ¿Reconoció algún dispositivo diseñado para la rehabilitación o elementos calibrados?
21. ¿Fue efectiva la terapia?
22. ¿Realiza actualmente ejercicios para fortalecimiento muscular y prevenir próximas lesiones recidivantes? (estiramiento, gimnasio, natación, etc.)
23. ¿Sintió que los equipos empleados para su rehabilitación eran cómodos o justos a su medida?
24. ¿Sería bueno para usted, como paciente, conocer su progreso durante el tiempo de la recuperación?

C. Modelo 3: Profesionales

1. ¿Cuál es el porcentaje de pacientes remitidos provenientes de otra ciudad?
2. ¿Cuáles son las lesiones más comunes que deben ser atendidas y los respectivos protocolos?
3. ¿Realiza una evaluación general para determinar un programa de rehabilitación o basta con saber la zona afectada?
4. ¿Aplica siempre un protocolo o diseña un programa de rehabilitación según lesión vs edad, composición corporal, acondicionamiento físico, estado de salud, alineación corporal y estado mental?
5. ¿Hay un esquema u orden del progreso en la rehabilitación o depende de factores físicos individuales?
6. ¿Cuál es el orden de recuperación de movimientos y cumplimiento de metas de la terapia?
7. ¿Cuál es la frecuencia indicada para la rehabilitación?
8. ¿Sería bueno para usted, como profesional, conocer el progreso del paciente durante el tiempo de la recuperación?
9. ¿Qué tan bien cumplen los deberes asignados los pacientes?
10. ¿Cuáles son los canales de comunicación que se utilizan para brindar información acerca del procedimiento a los pacientes?
11. ¿Qué tan efectivos son dichos canales?
12. ¿Cuál es la actitud con la que llegan los pacientes a los centros de recuperación, como es esta cuando terminan las terapias?
13. Al asignar un deber, ¿está usted preocupado por que el paciente posiblemente no lo cumpla?
14. ¿Existe alguna forma de evaluar los deberes asignados?
15. ¿Cuáles son las principales razones que exponen los pacientes para no cumplir sus deberes?
16. ¿Recomienda a los pacientes, al finalizar la terapia, incluir en sus AVD ejercicios de fortalecimiento muscular para prevenir lesiones recidivantes y nuevas lesiones?
17. ¿Cuáles son las marcas de dispositivos de ayuda más comunes?
18. ¿Cuáles son los equipos que más utiliza para la rehabilitación de hombro?
¿Porque?
19. ¿Qué recomendación haría a los dispositivos/protocolos existentes para la rehabilitación de hombro?
20. ¿Qué opina acerca de la posibilidad de llevar el dispositivo a su casa y ser supervisado por el profesional a través de internet?

Preguntas finales (Para todos): Teleoperación

1. ¿Qué recomendación haría a los dispositivos/protocolos existentes para la rehabilitación de hombro?
2. ¿Qué opina acerca de la posibilidad de llevar el dispositivo a su casa y ser supervisado por el profesional a través de internet?

Tabla 17. Profesionales de la salud entrevistados.

Profesional	Nombre	Ocupación	Lesión más tratada	INSTITUCIÓN
1	Victoria Cifuentes	Practicante Fisioterapeuta	Esguince Tobillo grado I,II	Escuela del Deporte
2	Sebastián Guarnizo	Practicante Fisioterapeuta	Esguince Tobillo grado I,II	Escuela del Deporte
3	Marcela Collazos	Practicante Fisioterapeuta	Esguince Tobillo grado I,II	Escuela del Deporte
4	Sirley	FISIOTERAPEUTA	Esguince Tobillo grado I,II	Centro de Rehabilitación María Isabel Mejía

Tabla 18. Pacientes entrevistados.

PACIENTES	NOMBRE		Edad [años]	Peso [Kg]	Estatura [cm]	TOBILLO LESIONADO		GRADO	OCUPACIÓN
						D	I		
Actuales	1	Esthefania Estupiñan Paredes	22	50	150		X	Esguince I	Estudiante Universitario
Recuperados	1	David Salazar	22	74	171		X	Esguince II	Estudiante
	1	Diego	36	70	163		X	Esguince II	Desarrollador

PACIENTE CON LESIÓN EN MOMENTO DE LA ENCUESTA

Pregunta	Respuesta
Pregunta 1	Estudiante universitario
Pregunta 2	22 años
Pregunta 3	50Kg
Pregunta 4	150Cm
Pregunta 5	Pie derecho lesionado
Pregunta 6	Lesión de primer grado, restricción de mvto, dolor.
Pregunta 7	NO
Pregunta 8	SÍ
Pregunta 9	SÍ
Pregunta 10	N.A
Pregunta 11	Buena
Pregunta 12	Elementos Básicos
Pregunta 13	Hasta ahora bien, sin embargo apenas estoy empezando hacerlos no podría decirle con exactitud si hay mejoría.
Pregunta 14	Son balones así que son normales, el tiempo de llevar acabo terapia es muy extenso
Pregunta 15	Es la única forma de llevar a cabo un proceso de mejoría.
Pregunta 16	Poca resistencia porque no podía apoyar el pie, actualmente puede llevar acabo ejercicios de propiocepción
Pregunta 17	El dolor solo duro un día pero al día siguiente no podía hacer ninguna actividad como caminar, ducharse y otras actividades que sean de desplazamiento.
Pregunta 18	De 1-10 un 60%, en la medida que podía caminar pero no correr.
Pregunta 19	N.A
Pregunta 20	Sería bueno, porque sería una terapia todo en uno; una máquina de fortalecimiento sin ejercicios variados da seguridad de un proceso de evolución.

PACIENTES RECUPERADOS

Pregunta	Respuesta paciente1	Respuesta paciente 2
Pregunta 1	Estudiante universitario	
Pregunta 2	22 años	36años
Pregunta 3	2 Meses	5meses

Pregunta 4	74Kg	70Kg
Pregunta 5	171Cm	160Cm
Pregunta 6	Lado dominante el Derecho la lesión fue en el izquierdo.	Lado dominante el Derecho la lesión fue en el izquierdo.
Pregunta 7	Dolor, restricción de movimiento e hinchazón alarmante.	Lesión de tobillo II Grado, sufrido durante un salto en el cual cayó sobre el pie.
Pregunta 8	Buena	Buena
Pregunta 9	Puesto de Salud de la empresa, inmovilización del miembro con cartón. Clínica a la que me remitieron, verificación de fractura con rayos x y posterior inmovilización con férula.	Procedimiento diferente incapacitaron 7 días y lo iban a inmovilizar pero pido q no; la doctora si le solicitó que se tenía que quedar muy quieto y se pusiera una tobillera y si se iba a mover con muletas. A la cuarta semana seguía hinchado la terapeuta de la empresa le aconsejo ejercicio se propuso un Teraband y hacer ejercicio de estiramiento por igual a las dos piernas. Revisa los rangos de cuanto había perdido
Pregunta 10	Algo demorado para el diagnóstico inicial.	Por el tiempo era imposible asistir a terapia ya que todas eran por la mañana; no volví a terapia pero creo que son necesarias; nunca fue a terapia.
Pregunta 11	Faltó la facilitación de muletas para poder moverme por parte de la clínica.	Realmente nunca fui a terapia y las pocas veces que fue eran ejercicio de fortalecimiento para trabajar en casa
Pregunta 12	No	Todavía no ha curado en su totalidad la primera, pero si me da miedo volver a recaer
Pregunta 13	N.A	N.A
Pregunta 14	Si	Ejercicios de estiramiento y manejo de dolor con agua tibia; además de fortalecimiento todos para desarrollar en casa por el tiempo; nunca fue a control solo dos veces la última vez me mandaron a trabajar con el peso.
Pregunta 15	Se ha trabajado el fortalecimiento de la pierna afectada y de la otra, en mi concepto personal el trabajo ha sido pesado pero me beneficiara a futuro.	Como los he desarrollado por iniciativa creo que no es lo mismo si hubiera tenido acompañamiento del terapeuta sin embargo las veces que la fisio reviso me aconsejaba los siguientes y como llevarlos a cabo.
Pregunta 16	Se presenta molestia en las mañanas cuando hace frio.	Sí, dolor a caminar, bajar y subir escaleras en el trabajo.
Pregunta 17	Sí, sentía mucho dolor hasta para apoyar el pie y después de la rehabilitación a veces siento molestia para realizar actividad física.	Sí, especialmente caminar y cuando estaba mucho tiempo sentado ponerse de pie cuando está en el trabajo, como subir escaleras y bajarlas; además de subir a la moto.
Pregunta 18	Fue útil porque hubo mejoría	pue se logra mientras se están haciendo pero se logra por iniciativa propia en la casa
Pregunta 19	Sí reconocí elementos de rehabilitación pero no eran dispositivos que se pudieran calibrar.	No, pero sí elementos de estiramiento que me aconsejaban para trabajar en casa.

Pregunta 20	Si, aunque después de 2 meses todavía siento dolor al realizar trabajos específicos.	Realmente el cambio lo he dado por iniciativa propia, al no asistir a terapia.
Pregunta 21	Si, además de una protección adicional (Tobilleras) para cuando realizo actividad física.	sí
Pregunta 22	Si eran cómodos aunque nunca usé un equipo que necesitara ajustar medidas.	Todos se realizaron en casa y fueron implementos de estiramiento como vendas y Teraband.
Pregunta 23	si	Claro que sí, creo que es necesario para saber cómo va el proceso.

Profesionales

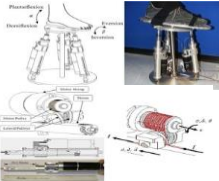
Profesional	1, 2, 3	4
Pregunta 1	En su mayoría son de la ciudad	Hay de diferentes partes, son comunidades aledañas a Cali, son por ahí un 30% del total de personas que vienen aquí.
Pregunta 2	La lesión más común es la de esguince de tobillo grado I,II; Fractura y luxación. Protocolo de fortalecimiento de tobillo: Ejercicios Isotónicos, cadena cinética cerrada. Trabajamos mucho con el Teraband, trabajamos propiocepción, coordinación. Se trabaja el fortalecimiento de los músculos que protegen el ligamento. Si es una lesión aguda se trabaja lo que es la modulación del dolor con medios y si tiene edema se baja la inflamación para poder empezar con ejercicios de fortalecimiento.	Muscular tendinosa a nivel de esguince.
Pregunta 3	Se tiene que hacer una valoración por un deportólogo y él da el diagnóstico, para luego nosotros realizar el programa de rehabilitación.	Ellos cuando llegan lo que se hace una valoración fisioterapéutica, luego con eso se fija unos objetivos a nivel terapéutico, el objetivo principal es recuperar la movilidad articular.
Pregunta 4	Es necesario una valoración para determinar rangos de movilidad y grado de lesión depende de cada paciente.	valoración fisioterapéutica,
Pregunta 5	Dependen de factores físicos e individuales	No hay un test específico, uno ve el progreso del paciente a medida que se realiza la terapia.
Pregunta 6	Se empieza con ejercicios isométricos (no requiere desplazamiento en la articulación), luego ejercicios isotónicos luego isotónicos concéntricos y excéntricos	Factores individuales
Pregunta 7	Depende qué tan grave y cómo haya evolucionado el paciente. "entre más rápido se empieza a ganar los rangos de movimiento, más rápida es la recuperación"	Inicialmente plantar flexión y dorsiflexión
Pregunta 8	Sí	Si
Pregunta 9	Los pacientes cumplen con el proceso: los pacientes particulares faltan mucho, pero ahora que estoy con pacientes deportistas ellos si cumplen más, porque ellos necesitan una pronta recuperación para empezar su práctica deportiva. Los pacientes particulares cumplen con las primeras terapias, pero no cumplen con terapias que se mandan después de una nueva valoración. Aquí se maneja que si tienes 3 faltas injustificables a terapias te cancelan el proceso de rehabilitación.	Muy poco

Pregunta 10	La comunicación se da en el momento que ellos acuden por primera vez a la valoración.	Valoración inicial y a medida que va evolucionando
Pregunta 11	Normales	Normales
Pregunta 12	Los pacientes particulares cumplen con las primeras terapias, pero no cumplen con terapias que se mandan después de una nueva valoración. Aquí se maneja que si tienes 3 faltas injustificables a terapias te cancelan el proceso de rehabilitación.	Con intención de recurrir pero al finalizar muchos desertan, creen ya estar recuperados o por lo menos en su totalidad para desarrollar actividades de la vida diaria
Pregunta 13	Claro porque depende de ello su recuperación y el avance.	Sí, Muchos no lo cumplen
Pregunta 14	Con los alcances de rangos y ángulos de movimiento además de los ejercicios y alcance de dolor.	Cuando vuelven a las terapias se da uno cuenta que no ha hecho ejercicios caseros porque los alcances de movilidad disminuyen
Pregunta 15	La mayoría de pacientes aquí son estudiantes, entonces lo más común es que no puedan venir porque tengan clases o parciales (actividades académicas).	El no tener la herramienta adecuada para desarrollarlos
Pregunta 16	Sí, se les aconseja hacer ejercicio de estiramiento con material que puedan tener en la casa guiados con los que se desarrollan durante la terapia.	Sí, ejercicio de estiramiento y fortalecimiento
Pregunta 17	De máquinas en sí no, se utiliza Teraband, y pelotas para la propiocepción.	Elemento prácticos
Pregunta 18	Teraband y pelotas propioceptivas.	Teraband y pelotas propioceptivas.
Pregunta 19	que la máquina tenga forma de manejar sus resistencias por tiempo (etapa de fortalecimiento) "Sería muy beneficioso tener una máquina de sólo tobillo porque se puede tener más tiempo para atender otros pacientes"	Me parece bien que maneje todos los rangos de movilidad y que de pronto me posibilite recuperar más rápido la lesión. Uno son ganar los rangos de movilidad, de pronto una máquina de fuerza muscular así como la de los gimnasios y que de una u otra forma se pueda graduar la resistencia.
Pregunta 20	Buena	Buena

Anexo 2

En este anexo se presenta la matriz de las máquinas, las cuales se sacaron las características más importantes de la lista de dispositivos del estado del arte para posteriormente plantear los requerimientos.

Tabla 19. Matriz del estado del arte.

Máquina #	Imagen	Lugar de Desarrollo	Año de última publicación	Modelo Máquina	Objetivo de la Máquina	Costo/Producción	Tipo de Terapia	Posición de la Terapia	Torque	Mecanismo	Tipo de contacto: músculo/mecanismo
1		Estados Unidos		System 4 Pro	Características pioneras en las pruebas neuromusculares y la tecnología de la rehabilitación.	N.D	isocinético, isométrico, isotónico, reactivo excéntrico y pasivo	Sedente	Máx 680 Nm	Dinamómetro permite sólo la rotación, mecanismo por engranes	velcro, sostenedor materiales sintéticos
2		Italia	2009	Redundantly Actuated Parallel Mechanism of Ankle Rehabilitation	Recuperación de la amplitud de movimiento y la fuerza del tobillo lesionado	N.D	Pasiva y activa (Isométrica e Isotónica)	Sedente	Plantar/Dorsiflexión: 80 Nm máx Inversión/Eversión: 40 Nm máx	Motores DC, engranes, poleas, pistones (Actuador lineal)	Correas de textil y aluminio en la base
3		Estados Unidos	2012	Optiflex Ankle	Mejorar las capacidades de movimiento del tobillo	N.D	Pasiva	Decúbito, sedente	N.D	N.D	Velcro, materiales sintéticos
4		Estados Unidos	2012	A Spherical Parallel Three Degrees-of-Freedom Robot for Ankle-Foot Neuro-Rehabilitation	Neuro-rehabilitación del tobillo	N.D	Pasiva y activa	Sedente	Máx 52 Nm	Motores DC Poleas Correas	Velcro y aluminio
5		Estados Unidos		Kinetec™ Breva™	Recuperación de la amplitud de movimiento	N.D	Pasiva	Sedente, decúbito, bipedestación	N.D		Velcro, materiales sintéticos (polímeros de alta densidad).
6		Estados Unidos		Thera-band	Mejoramiento de la fuerza muscular, equilibrio, tenacidad, postura, funcionalidad, movilidad y flexibilidad	N.D	Activa	Sedente, decúbito, bipedestación	De diferentes tensiones		Latex

Movimientos	RoM	Velocidad	Aceleración	Peso [Kg]	Dimensiones [m]	Portabilidad	Estrategia de Control	Instrumentación
Eversión Inversión Dorsiflexión Plantarflexión	N.D	Velocidad concéntrica hasta 500 deg/sec; Velocidad excéntrica 300 deg/sec	N.D	N.D	- Base silla con dinamómetro (131 x 162 cm) - Estación de datos (64 x 48 cm) - Accesorio (85 x 51 cm)	NO	Sistema operativo Windows	dinamómetro, encoder
Plantar/Dorsiflexión Inversión/Eversión	Plantar/Dorsiflexión: -60°,30° Inversión/Eversión: -30°,15°	Isocinética: 500°/s	N.D	N.D	N.D	Sí, pero limitada	PD	Celda de carga (Honeywell, Sensotech M11), Encoder de 4095 pulsos
Plantar/Dorsiflexión Inversión/Eversión	Dorsal/Plantar Flexion: 40 - 0 - 60° Inversion/Eversion: 40 - 0 - 20°	2 velocidades desconocidas	N.D	21 Kg	56 cm x 47 cm x 72 cm	Sí	N.D	N.D
Plantar/Dorsiflexión Inversión/Eversión Tibial internal/external	N.D	Velocidad máx eje: 90°/s Velocidad máx rodillo: 20°/s Velocidad máx pitch: 20°/s Velocidad máx Guiñada: 20°/s	N.D	12 Kg	Base de area redonda de 0,17 m ²	Sí, pero limitada	PID, gnu/Linux	Sensores
	Dorsiflexion:30° Eversion:25° Inversion:25° Plantar Flexion:40°	Velocidad: desde 50° a 150° por minuto	N.D	12,5 Kg	56cm. x 37cm. x 45m.	Sí	N.D	Sensores, encoder
Plantar/Dorsiflexión Inversión/Eversión Tibial internal/external					de 2 a 3 m de longitud	Sí		

Restricción de Mvto	Manufacturabilidad	Materiales	Proceso de producción	Seguridad	Teleoperación Geográfica Local	Teleoperación Geográfica Distribuida	Valoración
Programación	De configuración compleja y por su tamaño puede ser costosa.	Materiales estándar	N.D	ETL and cETL listed to UL 60601-1, CAN/CSA C22.2 No.: 601-1-M90 and EN 60601-1, CE conformity to M.D.D. 93/42/EEC	Sí	No	Sí
Dada por los mecanismos y por programación	Sencilla	Materiales estándar	N.D	N.D	sí	No	Sí
Programación	Sencilla	Materiales estándar	N.D	CSA - 601-1-M90, UL - 2601-1	N.D	No	No
Dada por los mecanismos y por programación	Sencilla	Aluminio	N.D	N.D	Sí	No	N.D
Dada por los mecanismos y por programación		Materiales estándar	N.D	IEC 601.1. y tiene certificado CE (93/42/EEC directiva anexo II, punto 3).).	Sí	No	Sí
	Sencilla	Latex	N.D	Fabricados bajo cuidados de materiales elásticos	No	No	No

Mantenimiento	Ajuste Dimensiones	Comfort Térmico	Impresión Táctil	Sonido
Difícil ya que debe ser realizado por personal calificado	Deslizante y barras telescópicas		(sintético) apoyos que aportan confort por su adaptabilidad al cuerpo.	La presencia de ruido es aislado ya que las partes mecánicas se encuentran aisladas del exterior.
Alguno de sus componentes presentan facilidad para el mantenimiento ya que son estándar	No	La superficie no produce contacto con la piel.	El material (aluminio) la rigidez y la estructura formal de este no aportan confort;a demás tieneun aspecto robótico que genera cierta distancia con el usuario(interacción).	Probablemente los actuadores lineales produzcan una cantidad de ruido molesto ya que no están aislados
Alguno de sus componentes presentan facilidad para el mantenimiento ya que son estándar	Deslizante	La superficie de agarre en contacto con la piel son mínimas lo cual reduce los índices de asepsia	Polimero en apoyos material con bajo porcentaje de aspereza, brinda una sensación de porosidad, estructura de aluminio a la vista que da aspecto robótico	No se ve partes mecánicas al descubierto, aunque se ve que no presenta un aislamiento especial
Alguno de sus componentes presentan facilidad para el mantenimiento ya que son estándar	No	La superficie no produce contacto con la piel.	El material (aluminio) la rigidez y la estructura formal de este no aportan confort;a demás tieneun aspecto robótico que genera cierta distancia con el usuario(interacción).	Las partes mecánicas se encuentran al descubierto y no cuenta con ningún tipo de aislamiento sonoro
Alguno de sus componentes presentan facilidad para el mantenimiento ya que son estándar	Deslizante y barras telescópicas	las zonas apoyo en contacto con la piel estan hechas de P.U Densidad media con dimensiones que no abarcan grandes extensiones de la piel,de este modo el calor corporal no se ve afectado por la temperatura ni el material.	De aspecto liso, limpio, resistente.	No se ve partes mecánicas al descubierto, aunque se ve que no presenta un aislamiento especial
Cambio de banda	Cambio de banda	La superficie en contanto con la piel es redicida, sin embargo la acumulacion de sudor y residuos pueden disminuir su eficacia.	De aspecto liso, limpio, resistente.	No presenta ruido alguno

Estético Formal	Color (cromoterapia//señalética)	Impacto de uso de la máquina	Percepción de seguridad
su estructura de gran tamaño la hace una máquina estable y segura teniendo en cuenta que no tiene salientes peligrosas para el usuario.	BLANCO: es el color del confort, alivia la sensación de desespero y de shock emocional.	De estructura robusta sin llegar a ser invasiva con el paciente.	su estructura permite brindar seguridad al encontrarse sus mecanismos aislados del paciente.
Su tamaño la hace una máquina portable, de aspecto rígido y mecánico que la vuelve independiente y aparentemente de fácil uso debido a la postura que adopta el paciente para funcionamiento.	GRIS: Color neutro que debilita las reacciones psicológicas; expresa duda y frialdad.	De estructura ligera, sin llegar a ser invasiva con el paciente pues formalmente genera una rápida relación con la parte del cuerpo a tratar.	Debido a su forma y ligereza estructural la seguridad del paciente se ve afectada, al no tenerse referencia del modo de uso no se sabe si el paciente se encuentra en posición bípoda.
Forma ligera, liviana gracias a su portabilidad, apariencia de buenos acabados a demás juega con la forma y el color y los materiales, lo cual la hace ver sencilla y práctica.	BLANCO: es el color del confort, alivia la sensación de desespero y de shock emocional; es un color que evoca tranquilidad, calma, modestia.	Estructura no invasiva, práctica en cuanto a que se adecua a cualquier espacio para su uso.	su estructura formal y de detalle ofrecen la seguridad de utilidad sin embargo su uso funcional se ve expuesto a la falta de sujeción ya que no muestra correas ni velcros que afirmen las posturas.
Estructura pequeña y robusta, que la hace estable, sin embargo se encuentra aparatosa y pesada ya que tiene muchas partes que se entrecruzan haciendo que se aprecie como un dispositivo robótico.	GRIS: Color neutro que debilita las reacciones psicológicas; expresa duda y frialdad. Hace que los objetos se vean pesados.	Estructura compleja, robusta en relación a su tamaño, pero no es un dispositivo invasivo.	La seguridad se ve disminuida en cuanto a la falta de protección del material.
Estructura ligera y compacta que brinda sensación de seguridad, de tonalidades suaves y frescas lo cual juega con su forma estructural que lo hace ver liviano como un aporte a su portabilidad.	VERDE: Relaja, calma los nervios, produce equilibrio emocional, poco agresivo.	De estructura ligera, sin llegar a ser invasiva con el paciente pues formalmente genera una rápida relación con la parte del cuerpo a tratar, además que puede ser utilizada de manera sedente o acostado.	Percepción de seguridad alta, pues su estructura se encuentra completamente protegida y cubierta con materiales lisos y redondeados en las partes que presentan salientes, además el color es un buen determinante de diseño al tenerse en cuenta que es para rehabilitar una parte del cuerpo que genera dolor.
Ligera.	El color es un determinante de su función.	Estructura no invasiva y práctica, se adecua a cualquier espacio para su uso.	La seguridad se ve afectada por el uso individual con el que cada paciente la utilice.

Forma= Sistema de Objetos	Antropometría	Funcionalidad	Ciclo de vida	Conclusiones
La máquina se percibe como un sistema de tres estaciones complementarias.	De ajuste para amplio rango de medidas antropométricas.	la participación del especialista es necesarias para llevarse a cabo el perfecto funcionamiento del dispositivo.	No se determina rehuso, pero existen componente que si podrian ser parte de un proceso de reciclaje.	Máquina diseñada para etapa de fortalecimiento durante proceso de rehabilitación; completa en funcionalidad pero limitada por su tamaño y costos.
Es una máquina que se articula completamente para ser percibida como un objeto completo.		Tienen la deseable características de baja inercia, alta rigidez , compacidad, una mayor portabilidad.	No se determina rehuso, pero existen componente que si podrian ser parte de un proceso de reciclaje.	Buen dispositivo en relación a su portabilidad y estructura formal y funcional, siembargo perceptualmente no es un dispositivo que cumpla con requisitos de confort y adaptabilidad.
Carece de sistemas de agarre pero se enriquece formalmente, es percibida completamente como un objeto.	Posee un sistema de seguridad pasiva (bordes y y topes sin filos)	para realizar movimientos suaves y control en terapias de rehabilitación para ayudar a los pacientes a realizar repetitivo movimientos en un intervalo bien definido y una velocidad dada. (aliviar el problema de la rigidez post-operatorio).	No se determina rehuso, pero existen componente que si podrian ser parte de un proceso de reciclaje.	Dispositivo que aporta un conjunto de cualidades formales y funcionales para llevar a cabo un buen desarrollo de rehabilitación.
Se acopla a un solo objeto dispuesto para un solo funcionamiento.	De ajuste para amplio rango de medidas antropométricas.	la participación del especialista es necesarias para llevarse a cabo el perfecto funcionamiento del dispositivo.	No se determina rehuso, pero existen componente que si podrian ser parte de un proceso de reciclaje.	Es un dispositivo que posiblemente ayude notoriamente en la rehabilitacion del paciente gracias a que abarca casi todo el rango de movimiento fisiológico (funcional) del tobillo, sin embargo su composicion estético formal necesita ser evaluada debido complejidad estructural.
Es una máquina que se articula completamente para ser percibida como un objeto completo, seguro y funcional.	ajustable para determinado tipo de medidas. Tamaño del Pie: desde 19 cm. a 29 cm. -Peso: 12.5 kg.	Control de mano avanzado para maximizar programas y protocolos.	No se determina rehuso, pero existen componente que si podrian ser parte de un proceso de reciclaje.	Dispositivo que aporta un conjunto de cualidades formales y funcionales para llevar a cabo un buen desarrollo de rehabilitación.
Cuenta como un solo objeto.	De ajuste para amplio rango de medidas antropométricas.	Mejoran la fuerza muscular, el equilibrio, la tenacidad, la postura, la funcionalidad, la movilidad y la flexibilidad y reducen el dolor, la presión sanguínea y la incapacidad y previenen las caídas.		Es una banda versátil que se adapta a cualquier tipo de lesión y permita desarrollar una gran variedad de ejercicios de fortalecimientos musculares y articulares.

Anexo 3.

En este apartado se muestran los requerimientos propuestos para la máquina, y su propuesta conceptual, para simplificación y aplicación dentro del proyecto se descartaron algunos requerimientos.

Tabla 20. Organización de los requerimientos planteados para el dispositivo rehabilitador de tobillo.

	CATEGORIAS	Requerimiento	Descripción	Propuestas conceptuales	Usuario	REQUERIMIENTO
FUNCIONAL	MOVIMIENTO	Trabajar los 4 movimientos principales de la articulación del tobillo.	El sistema debe permitir rehabilitar los principales movimientos []	Cadenas cinemáticas con 2 GDL	Paciente Especialista	Trabajar los 4 movimientos principales de la articulación del tobillo.
		Trabajar dentro del rango de ángulos para las AVD	La máquina debe funcionar por lo menos con los rangos de movilidad de las AVD []	Actuadores que giren al menos 180°	Paciente	Trabajar dentro del rango de ángulos para las AVD
		Rangos de velocidad regulables; MOVER EN RANGOS DE VELOCIDAD DEFINIDA POR EL PROTOCOLO	El sistema deberá realizar los ejercicios a una velocidad de 50 a 150°/min Rango de velocidad tomado de []	Programación y sistemas de transmisión de potencia	Paciente Especialista	MOVER EN RANGOS DE VELOCIDAD de 50 a 150°/min
		Desarrollar movimientos de terapia activa y pasiva	La máquina debe generar el movimiento y también dejarse mover por el paciente para cumplir las dos terapias: activa y pasiva.	Actuadores y resistencias de movimiento para reproducir terapia por medio de motor DC	Paciente Especialista	Desarrollar movimientos de terapia activa y pasiva

		Evitar sobresaltos dentro del movimiento	Garantizar un movimiento continuo aplicando un sistema de control retroalimentado	Sistema de control	Paciente	Contar con un sistema de control para obtener un tiempo de respuesta mínimo
		Iniciar y finalizar movimiento en una posición segura.	Iniciar y finalizar el movimiento en una posición segura, evaluada del paciente.	Sensar el rango de movilidad del paciente.	Paciente Auxiliar	Iniciar y finalizar en posición neutra (0°) justo entre dorsiflexión y plantar flexión.
	POSICIÓN TERAPIA	Aplicar protocolo para posición sedente y cúbito	El ejercicio terapéutico deberá aplicarse permitiendo la mejor aplicación del protocolo.	Estructura que se adapte a la posición sedente.	Paciente	Aplicar protocolo para posición sedente y cúbito
	EVALUACIÓN PACIENTE	Medir la evolución del paciente durante el proceso	Sensar variables que permitan llevar un control de la terapia como la velocidad, posición, fuerza y repeticiones.	Sensores de posición (ángulos), velocidad y fuerza.	Paciente Auxiliar Especialista	Medir evolución del paciente durante las terapias
		Registrar la evolución del paciente.	Hacer un registro cronológico de la evolución del paciente con variables de velocidad, posición, fuerza y repeticiones.		Auxiliar Especialista	Registrar la evolución del paciente.
		Almacenar	Guardar el registro cronológico de la evolución del paciente; además el sistema deberá presentar una arquitectura que permita realizar adaptaciones para que en futuros desarrollos sea compatible con Protocolos de comunicación DICOM/HL7	Conexión a través de un puerto USB, comunicación inalámbrica		Almacenar evolución del paciente.

	INTERFAZ DE USUARIO	Interfaz de hardware		El sistema debe tener la capacidad de ser operada por una persona.		Botones		Auxiliar		Interfaz de hardware		
		Interfaz de software		El sistema debe ofrecer comunicar al usuario el proceso de ejecución.		Interfaz gráfica		Auxiliar		Interfaz de software		
ESTRUCTURAL	MANIPULACIÓN	Portabilidad	Portabilidad		Las dimensiones y materiales del sistema deben garantizar la portabilidad.		Peso < 10 [Kg]. Dimensiones de almacenamiento [m] ... Por definir		Auxiliar		Portable	
		Uso	Dimensiones antropométricas variables		La máquina debe tener la capacidad de ajustarse para las características antropométricas de los pacientes sin afectar la cinemática del sistema		Sistemas modulares, ajustes discretos o continuos.		Paciente		Contar con dimensiones antropométricas variables	
	MANTENIMIENTO	Fácil limpieza		Las piezas deben ser reutilizables		Materiales de fácil limpieza.		auxiliar				
	CONSTRUCCIÓN	Componentes estándares		El sistema debe contar con piezas de especificaciones técnicas estándares para facilitar su construcción		Componentes estándares		Auxiliar		Contar con materiales de construcción estándar		
CONFORT	PRECEPCIÓN	Formal/ Estético	Generar seguridad		la máquina debe generar seguridad, motivación		La máquina debe contar con unos elementos del lenguaje visual formal, colores, textura, tamaño.		Paciente		Brindar condiciones de seguridad	
			provocar sensación de comodidad		Motivación				paciente		Ofrecer condiciones de confort	
									paciente			
		Funcional /Estético	sensación agradable		confort				paciente			

			que se sienta cómoda	confort		paciente	
			fácil uso	La máquina debe permitir la mejor en relación paciente/máquina en estructura y modo de uso		paciente	Permitir fácil uso
			no invasiva	Los apoyos de la máquina deben ajustarse a las dimensiones ergonómicas y de confort ()		paciente	Ajustarse a dimensiones ergonómicas
Seguridad	TERAPIA	COMPONENTES	seguridad térmica	Los componentes deben estar aislados al contacto con el paciente (temperatura ambiente)	garantizar la resistencia térmica para que el calor de los componentes no lleguen al paciente	Paciente	Ofrecer seguridad térmica, eléctrica y mecánica.
			seguridad eléctrica	Los componentes deben estar aislados al contacto con el paciente	Garantizar aislamiento eléctrico en cada uno de los componentes conductores	Paciente	
			seguridad componentes mecánicos	Los componentes deben estar aislados al contacto con el paciente	Garantizar guardas en cada uno de los componentes mecánicos	Paciente	
			que no de alergia	Los materiales en contacto con el paciente deben ser antialérgicos	Materiales antialérgicos	Paciente	Prevenir condiciones alérgicas
		SISTEMA	Parada de emergencia	La máquina debe contar con un sistema de corte del fluido eléctrico para cualquier eventualidad.	Interruptor	Paciente Auxiliar	Interrumpir terapia en caso de no ser segura para el paciente.
			Chequeo de los componentes antes de arranque	La máquina debe ser capaz de comprobar sus elementos antes de una terapia	Programación del sistema	Paciente Auxiliar	Verificar componente mecánico.

			Seguridad dentro del rango de movimiento	La máquina debe funcionar dentro del rango seteado por el especialista	Topes mecánicos y Programación del sistema	Paciente	Operar dentro de los rangos seteados por especialista.
--	--	--	--	--	--	----------	--

Anexo 4

Este anexo presenta el diagrama de actividades durante el proceso de terapia para los actores Auxiliar, Especialista y Máquina. Aunque no representa el sistema del diagrama UML del capítulo 6, sí representa las actividades que ocurren fuera de él. Además su análisis aportó comprensión al diseñar algunos componentes y sistemas.

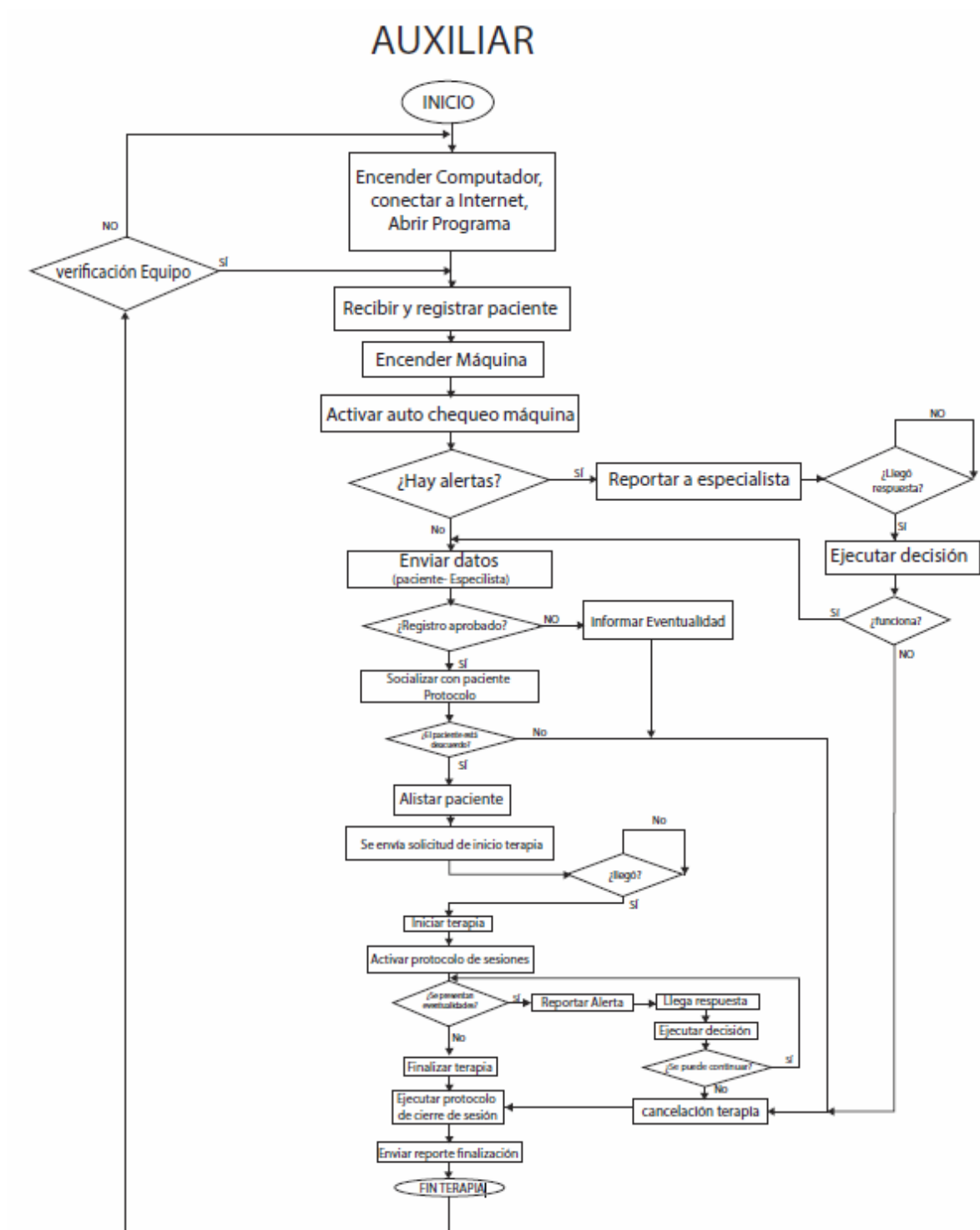


Figura 32. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.

ESPECIALISTA

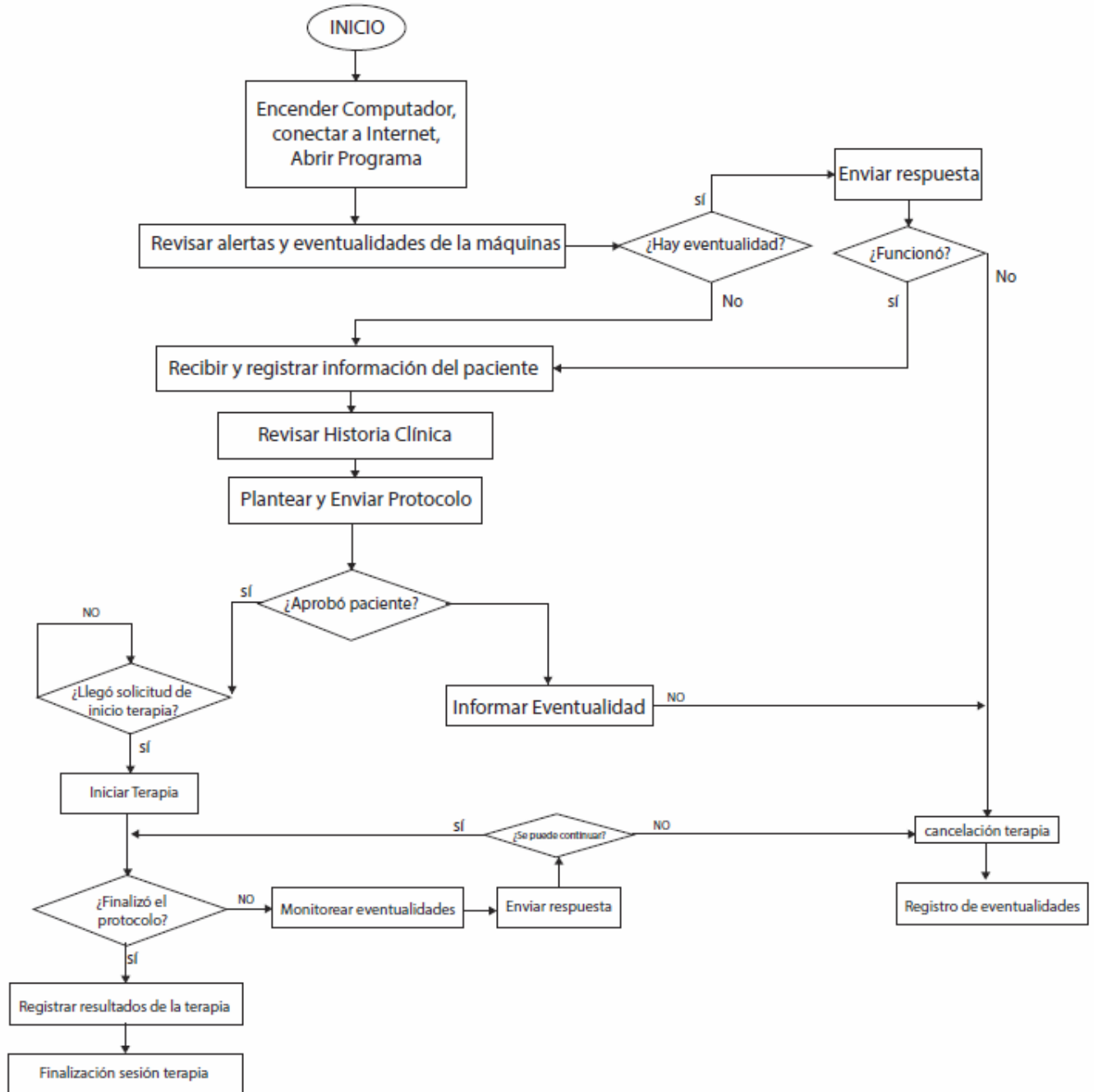


Figura 33. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.

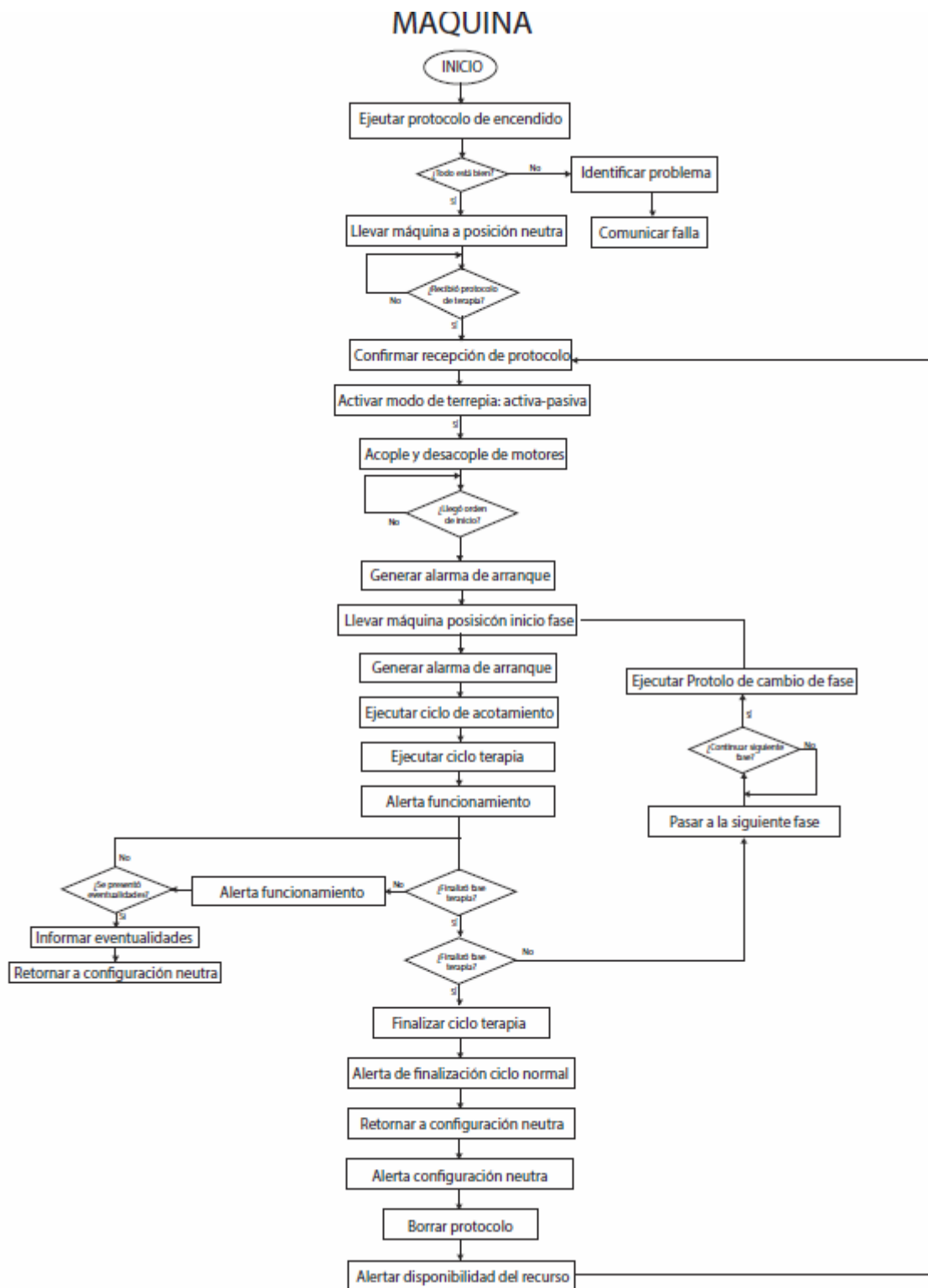


Figura 34. Diagrama de actividades UML para el sistema de rehabilitación de tobillo.

Anexo 5

A continuación se muestran las características de componentes seleccionados en el sistema electrónico.

Driver de potencia

Corriente pico: 150A

Máximo trabajo de corriente recomendada: 20A

Voltaje de operación recomendado: 12V ~ 26V

PWM: 0%-98%

Arduino

Microcontrolador: ATmega1280

Voltaje de operación: 5V

Memoria flash: 128 KB

SRAM: 8 KB

Velocidad de reloj: 16MHz

Encoder

Encoder absoluto A37

Resolución: 12 bits

Inalámbrico

Módulo xbee

250kbps máxima velocidad de datos

1mW de salida (0 dBm)

100m rango línea abierta, 30 metros en interiores

6 pines de 10bits para entrada ADC

8 pines de E / S digitales

Anexo 6

En este anexo se presentan los planos de las piezas del dispositivo rehabilitador de tobillo. Primero se muestra las dimensiones del actuador escogido y seguido se muestra una vista explosionada con la lista de los elementos de la máquina. Luego de la vista explosionada se expone cada uno de los planos de construcción de los elementos

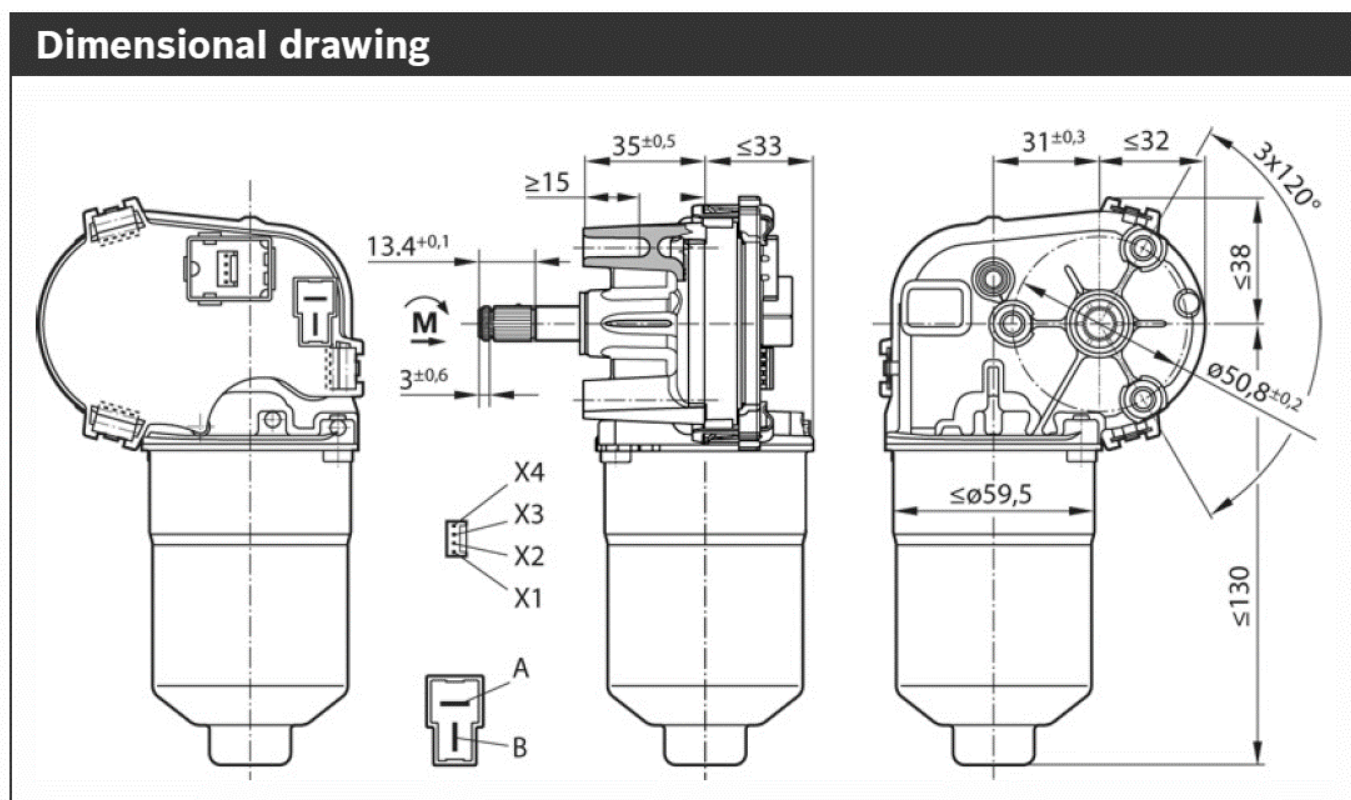
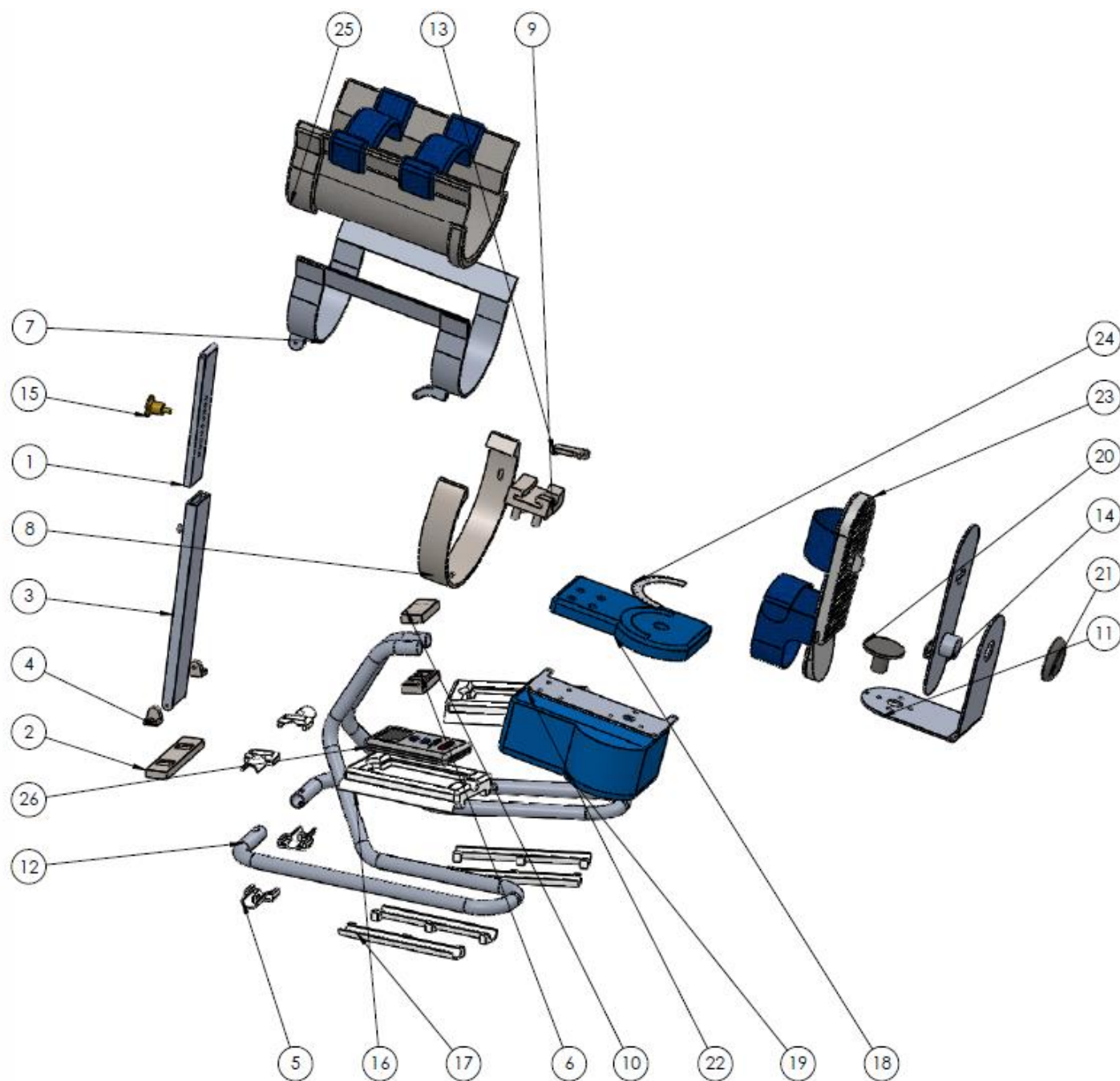
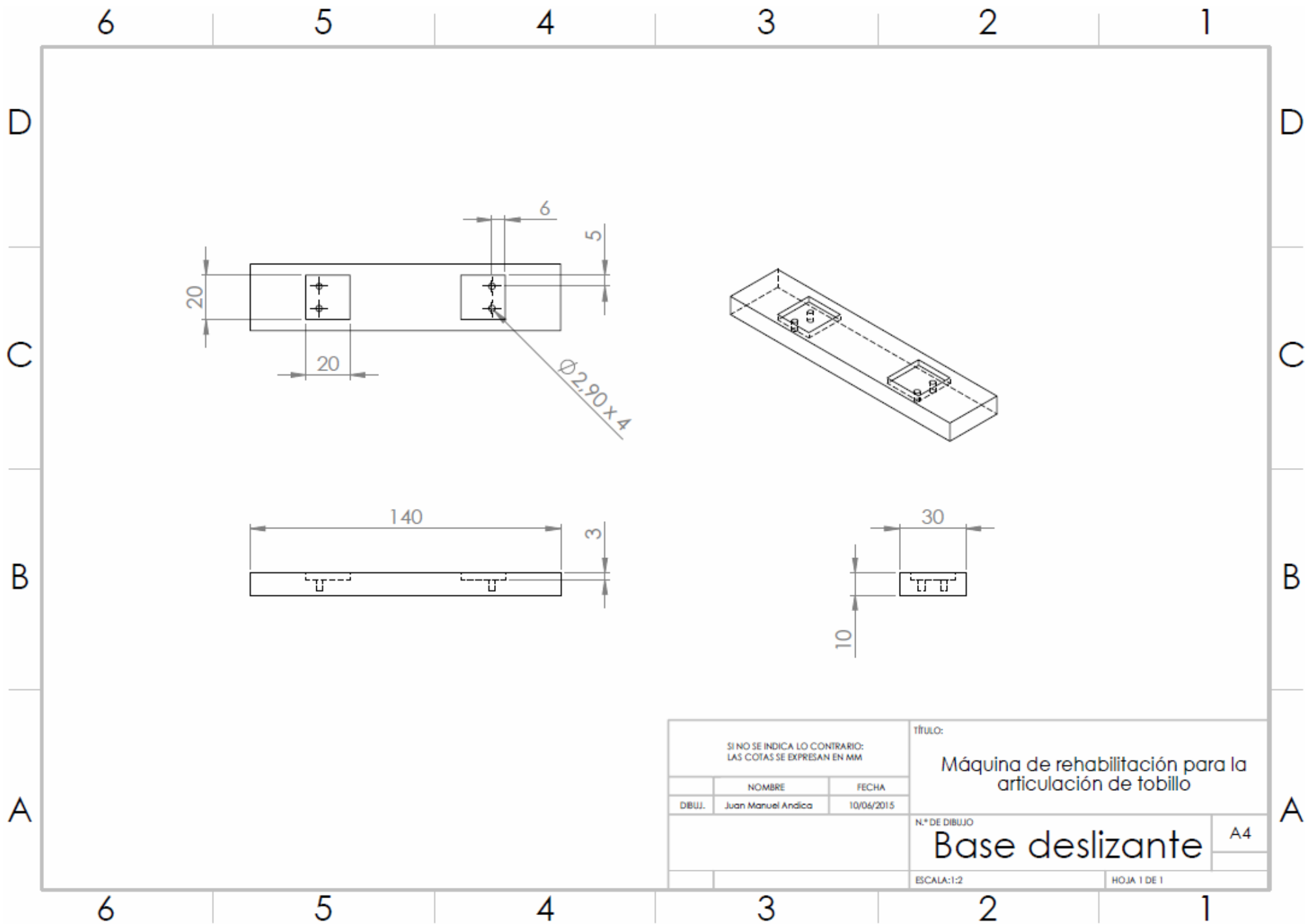


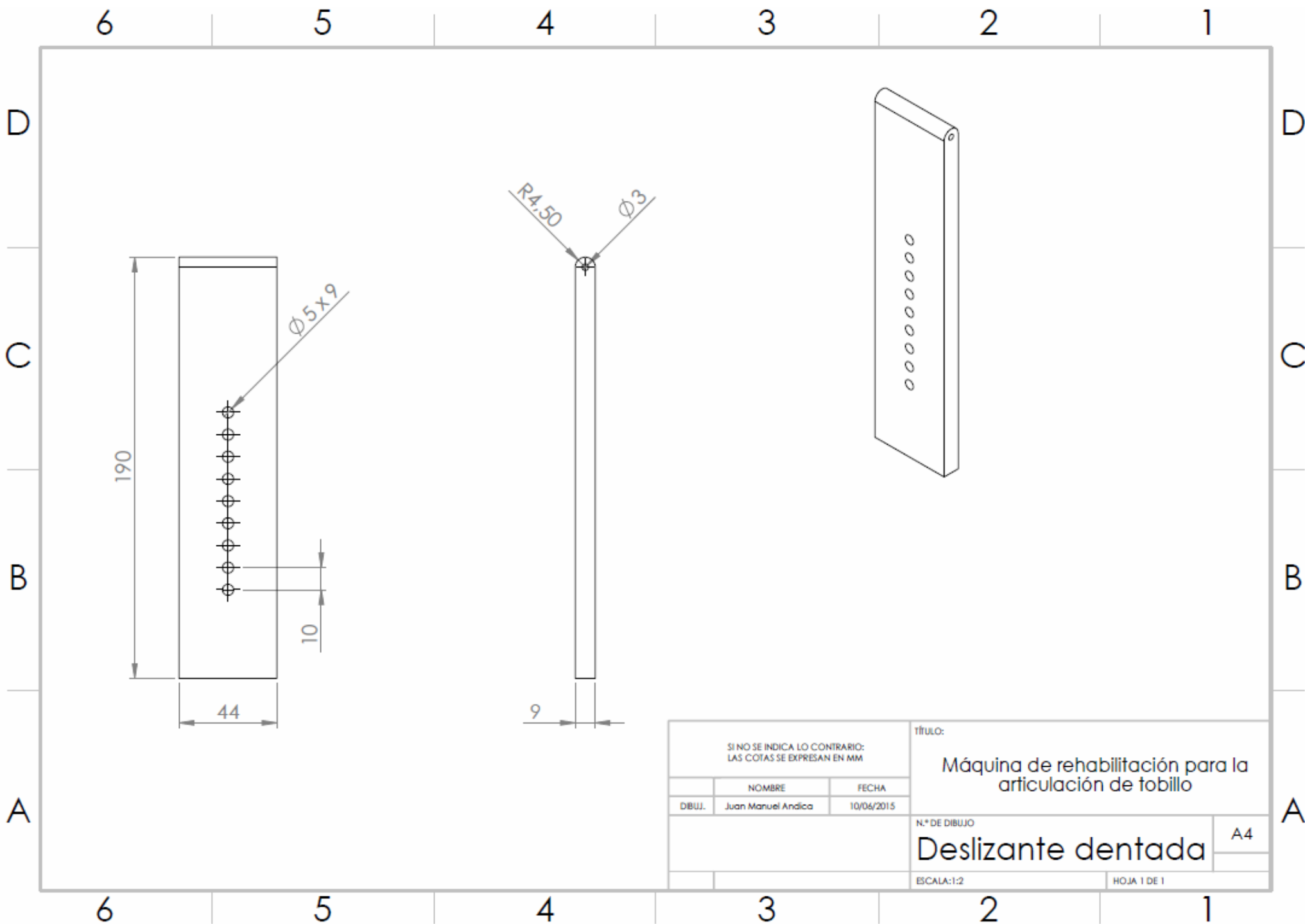
Figura 35. Medidas del actuados seleccionado.

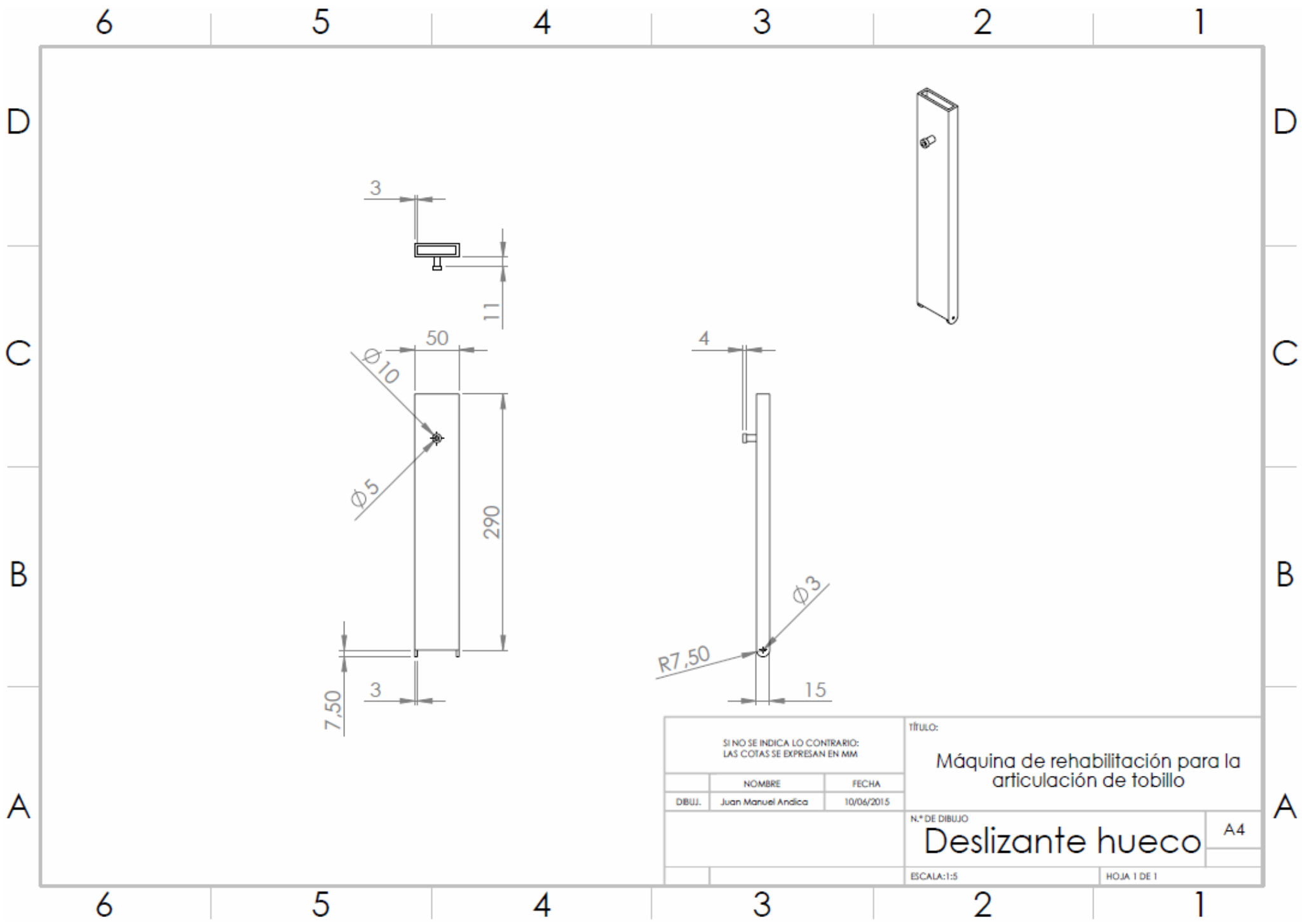


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Deslizante dentada	1
2	Base deslizante	1
3	Deslizante hueco	1
4	Pivotes deslizante hueco	2
5	Empalme base	4
6	Pieza2^Máquina Tobillo	1
7	Base Rodilla	1
8	Riel	1
9	Deslizador	1
10	pivote riel	2
11	Ele	1
12	Base I	1
13	Palanca deslizador	1
14	Lámina zapato	1
15	Botón	1
16	Base Control B	2
17	Base Control A	2
18	Carcasa motor A	1
19	Carcasa motor B	1
20	Acople motor	1
21	Ajuste ele	1
22	Estructura motor I	1
23	Zapato	1
24	Lamina grados	1
25	Felpa	1
26	Control	1

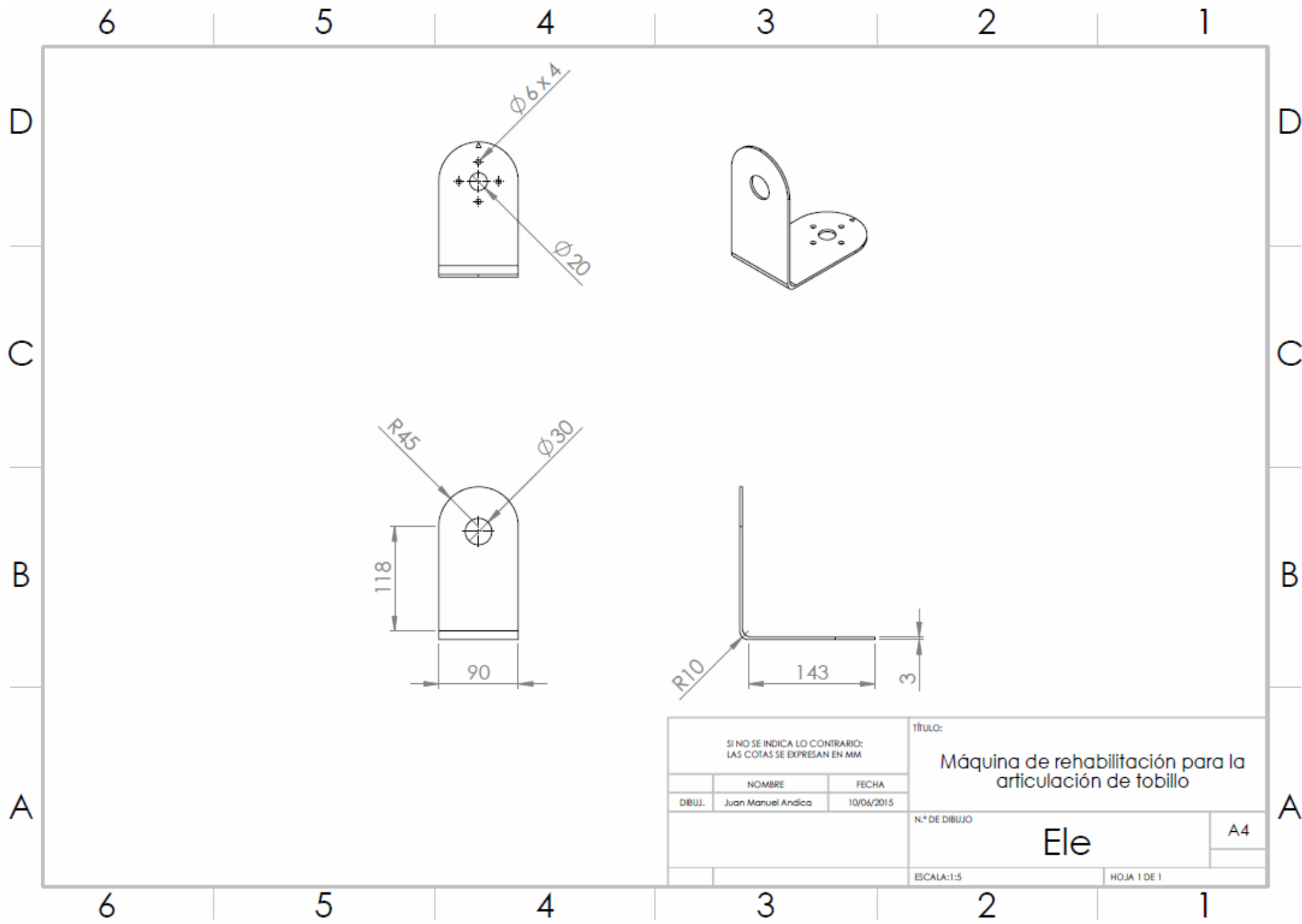


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO:	
NOMBRE		FECHA	Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015		
			N.º DE DIBUJO	A4
			Base deslizante	
			ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

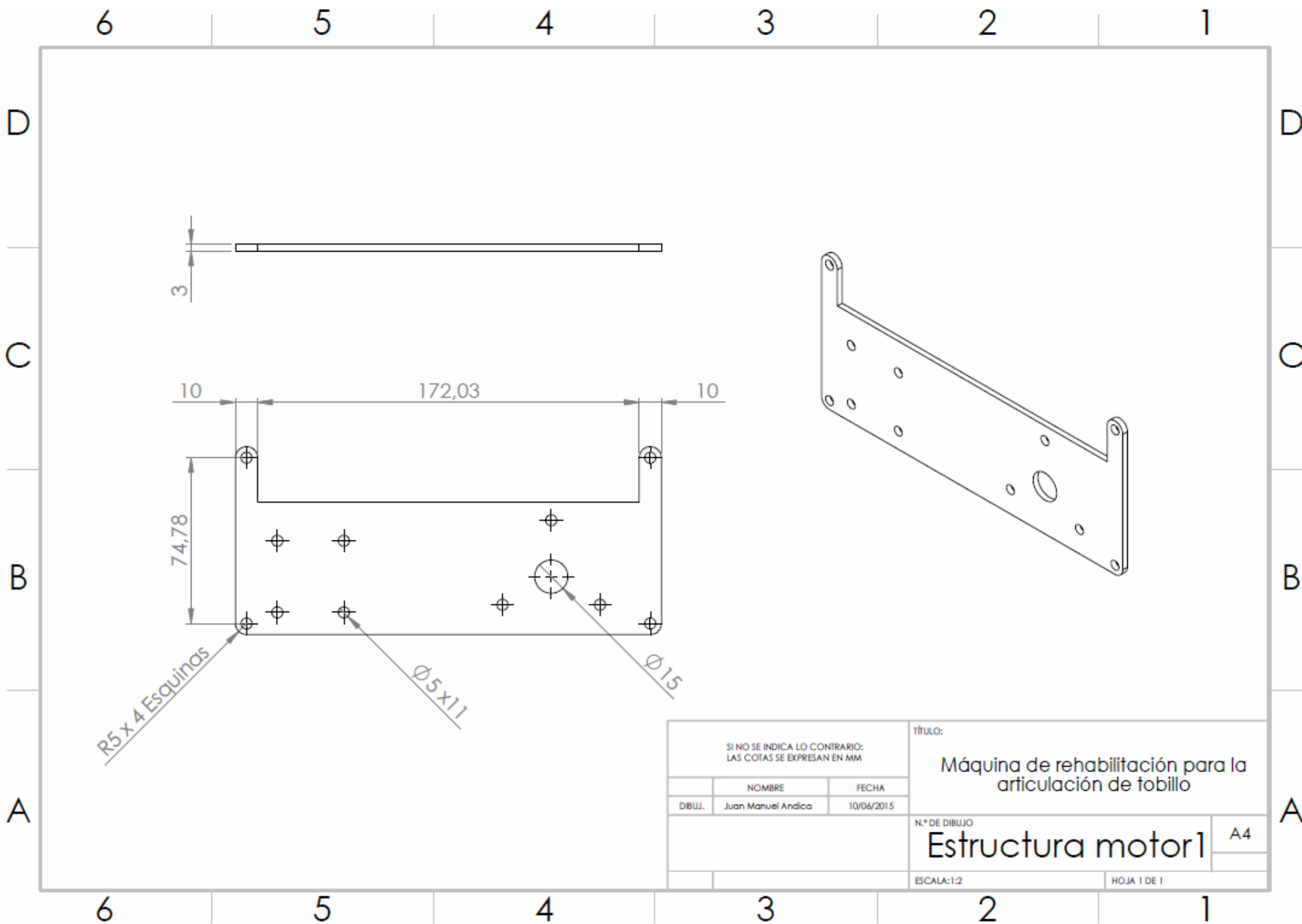




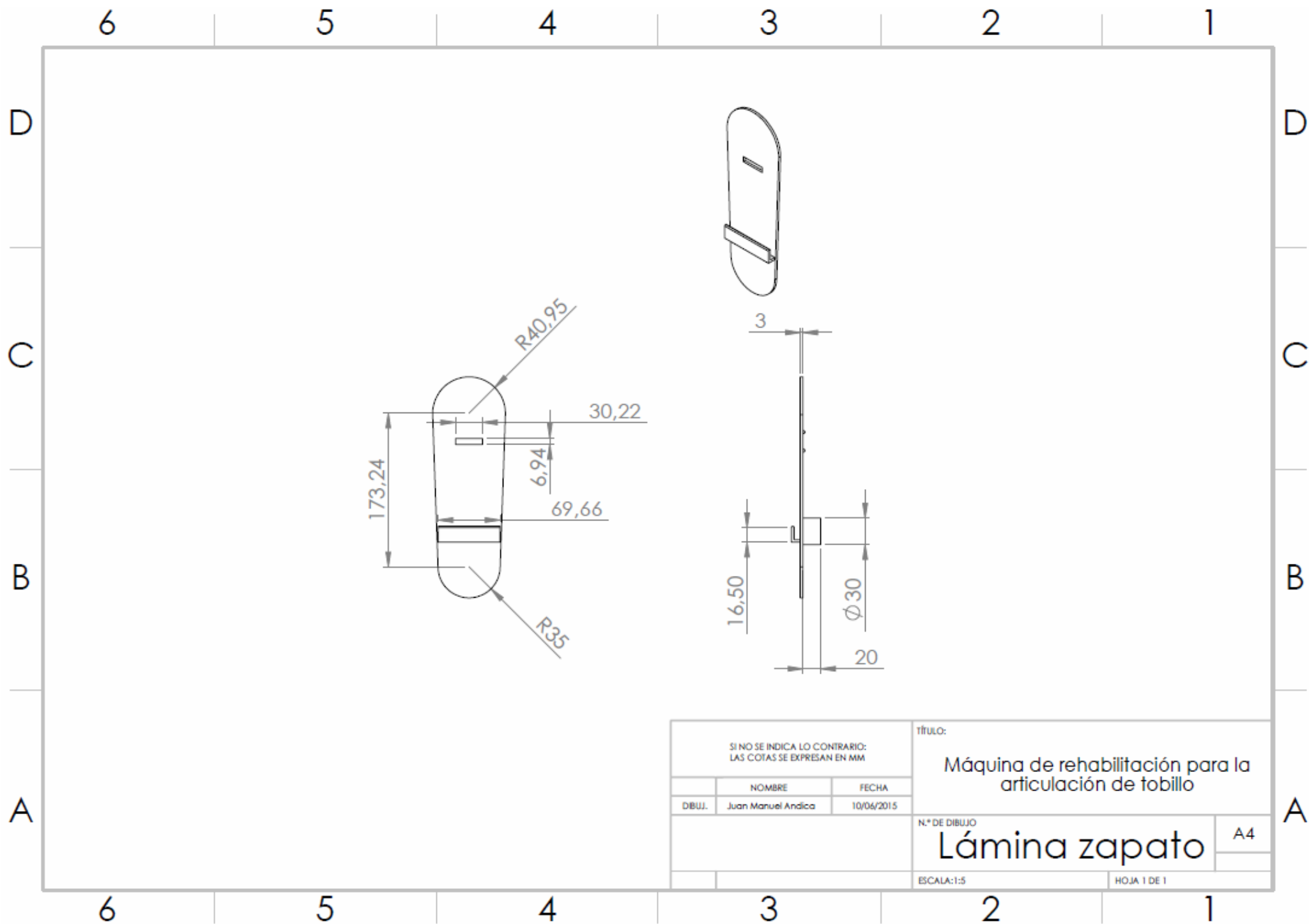
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO:	
			Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
	NOMBRE	FECHA	N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015		
			Deslizante hueco	
			A4	
			ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO: Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
NOMBRE		FECHA		N.º DE DIBUJO
DIBUJ. Juan Manuel Andica		10/06/2015		
			Ele	
			A4	
ESCALA: 1:5			HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO:	
NOMBRE		FECHA	Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015		
			N.º DE DIBUJO	A4
			Estructura motor1	
			ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

	NOMBRE	FECHA
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015

TÍTULO:

Máquina de rehabilitación para la
articulación de tobillo

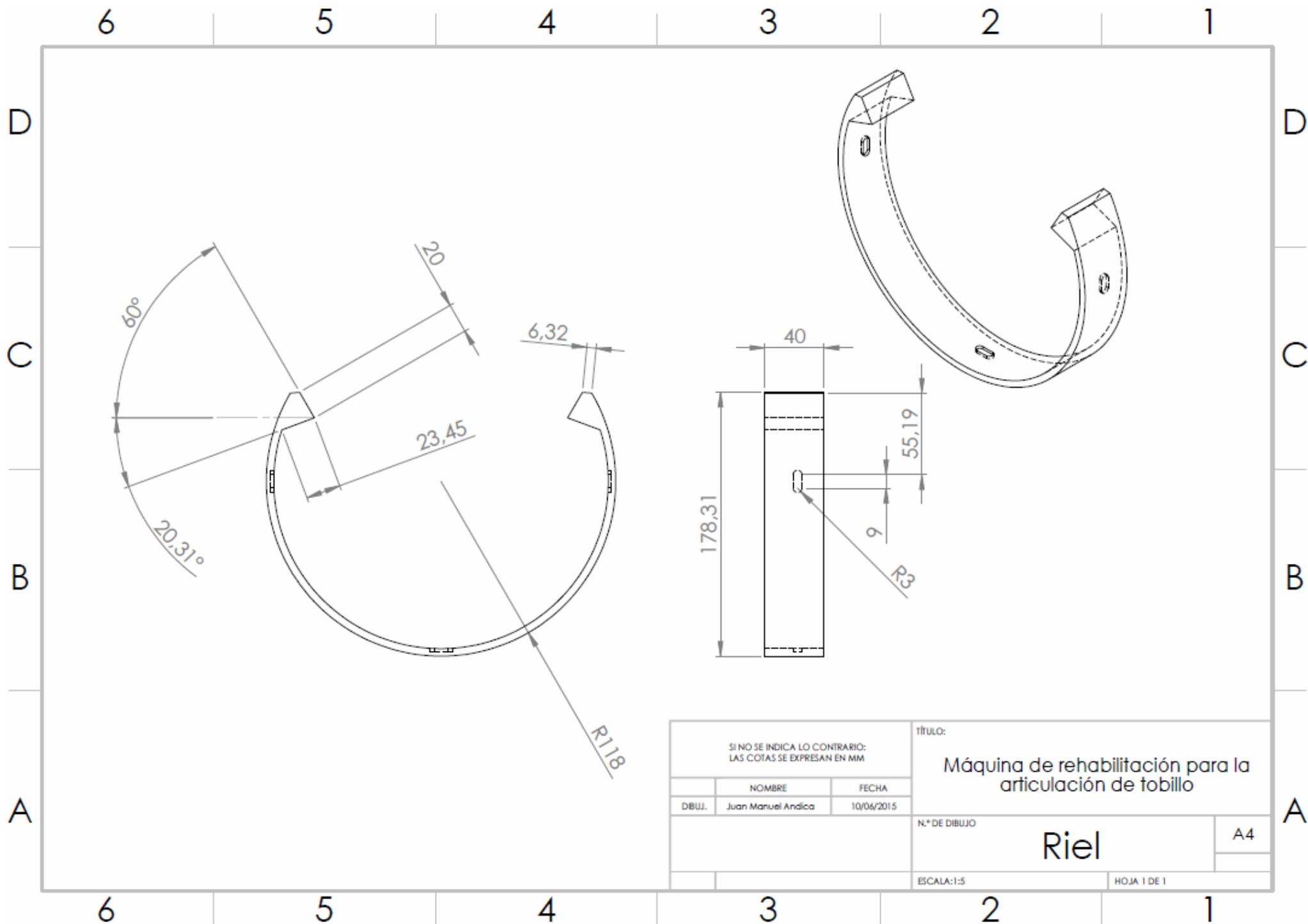
N.º DE DIBUJO

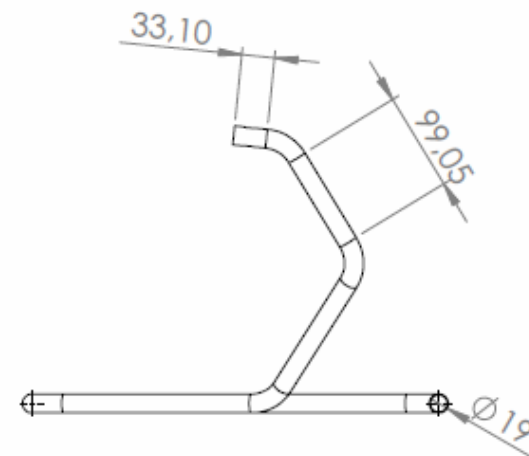
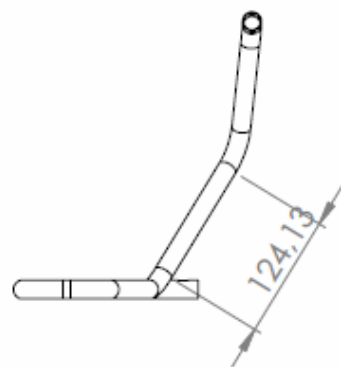
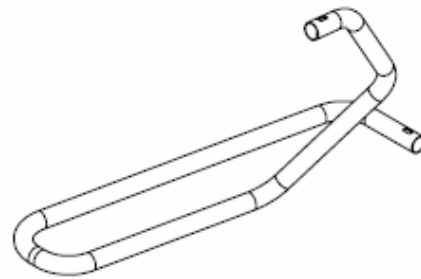
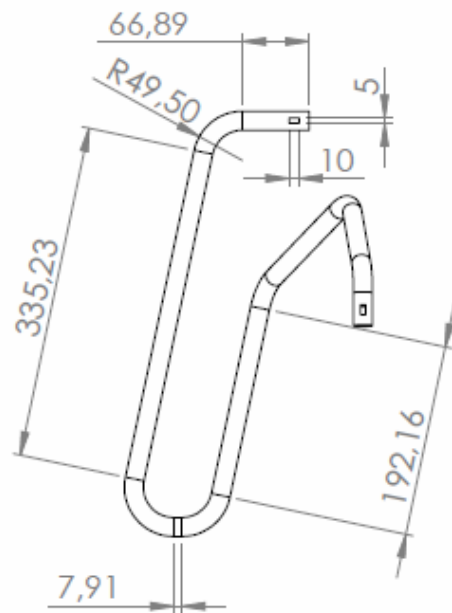
Lámina zapato

A4

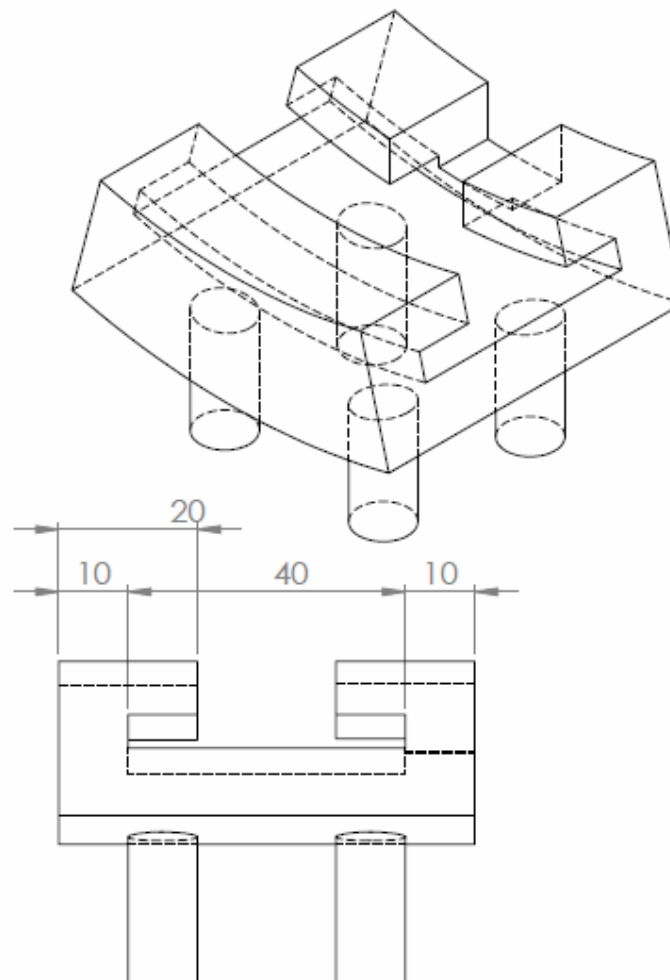
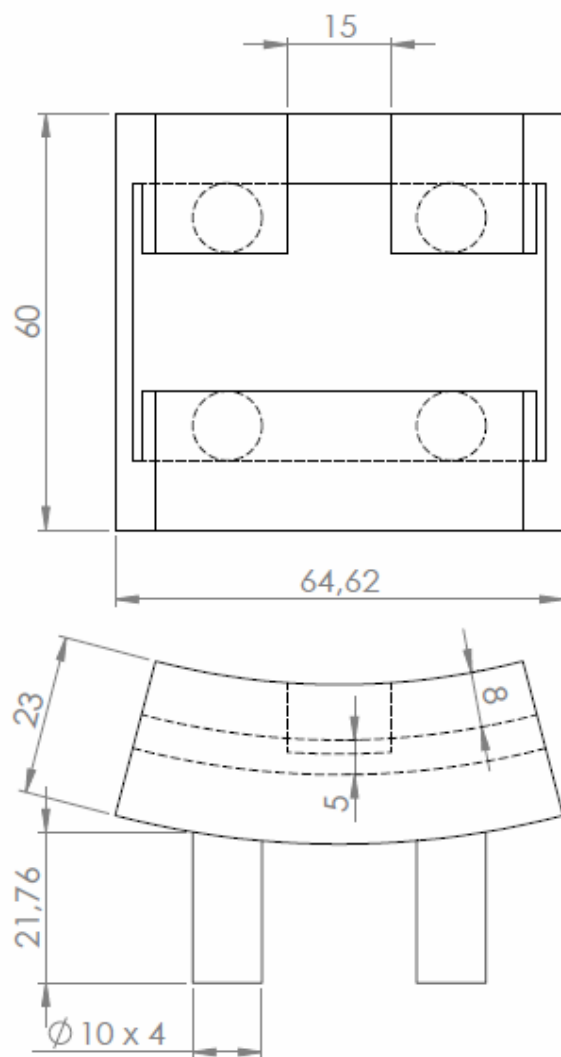
ESCALA: 1:5

HOJA 1 DE 1



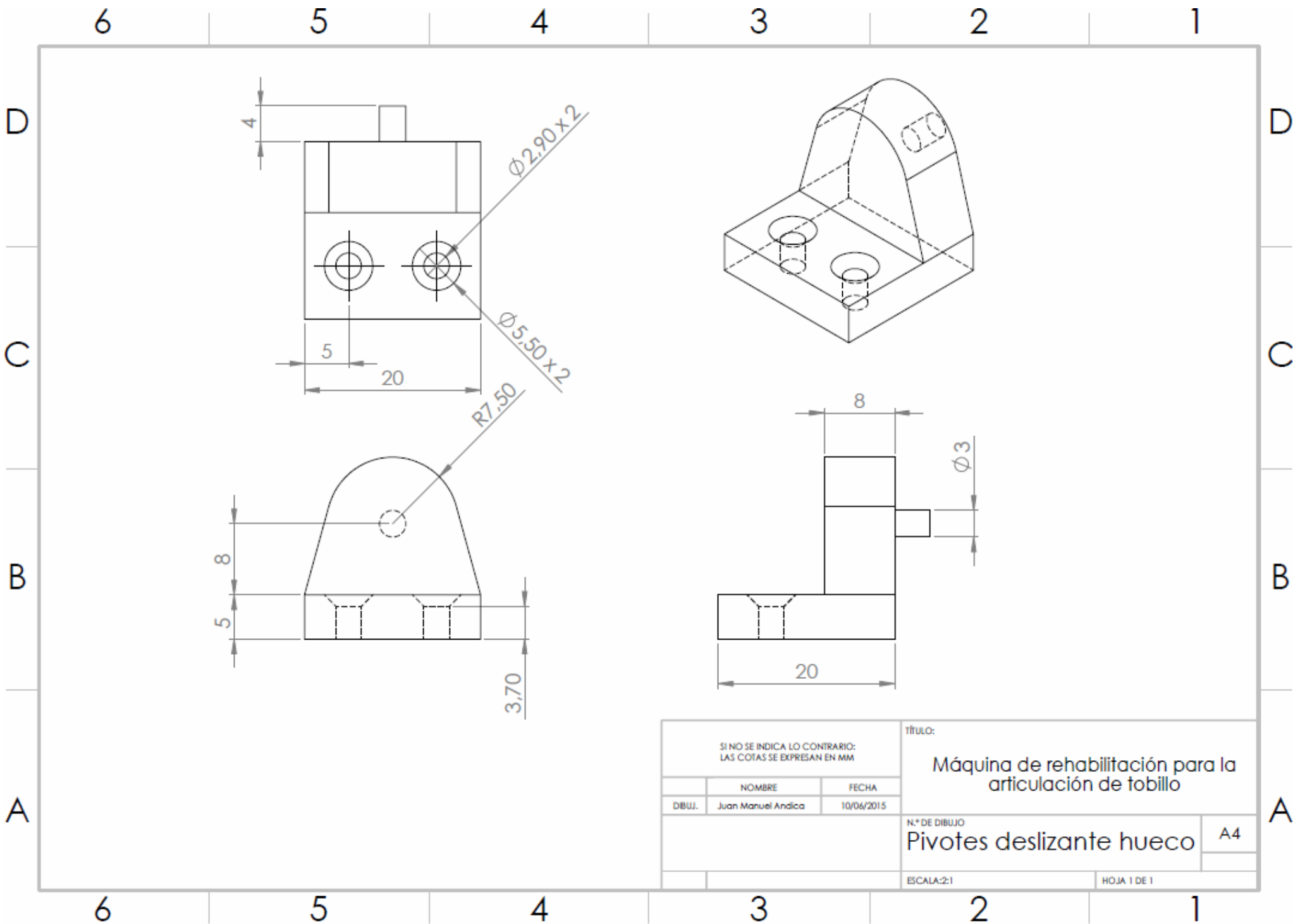


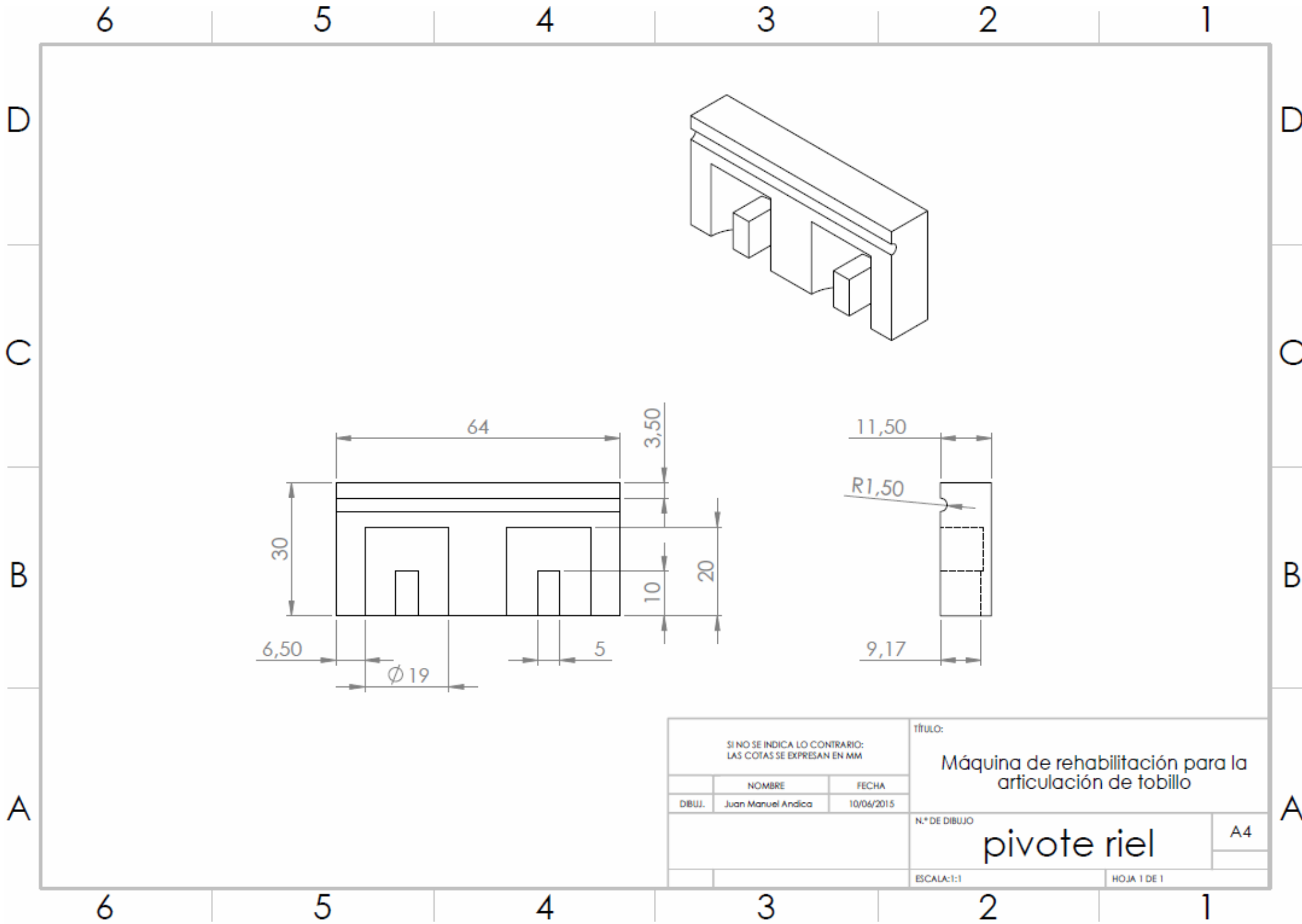
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO:	
NOMBRE		FECHA	Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015		
Cada dobléz del tubo es de 50 mm de radio			N.º DE DIBUJO	A4
			ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1
			Base1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		TÍTULO: Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
NOMBRE	FECHA	N.º DE DIBUJO Deslizador	
DBUJ.	Juan Manuel Andica		
Ver el radio en que desliza el elemento en la pieza Riel		ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

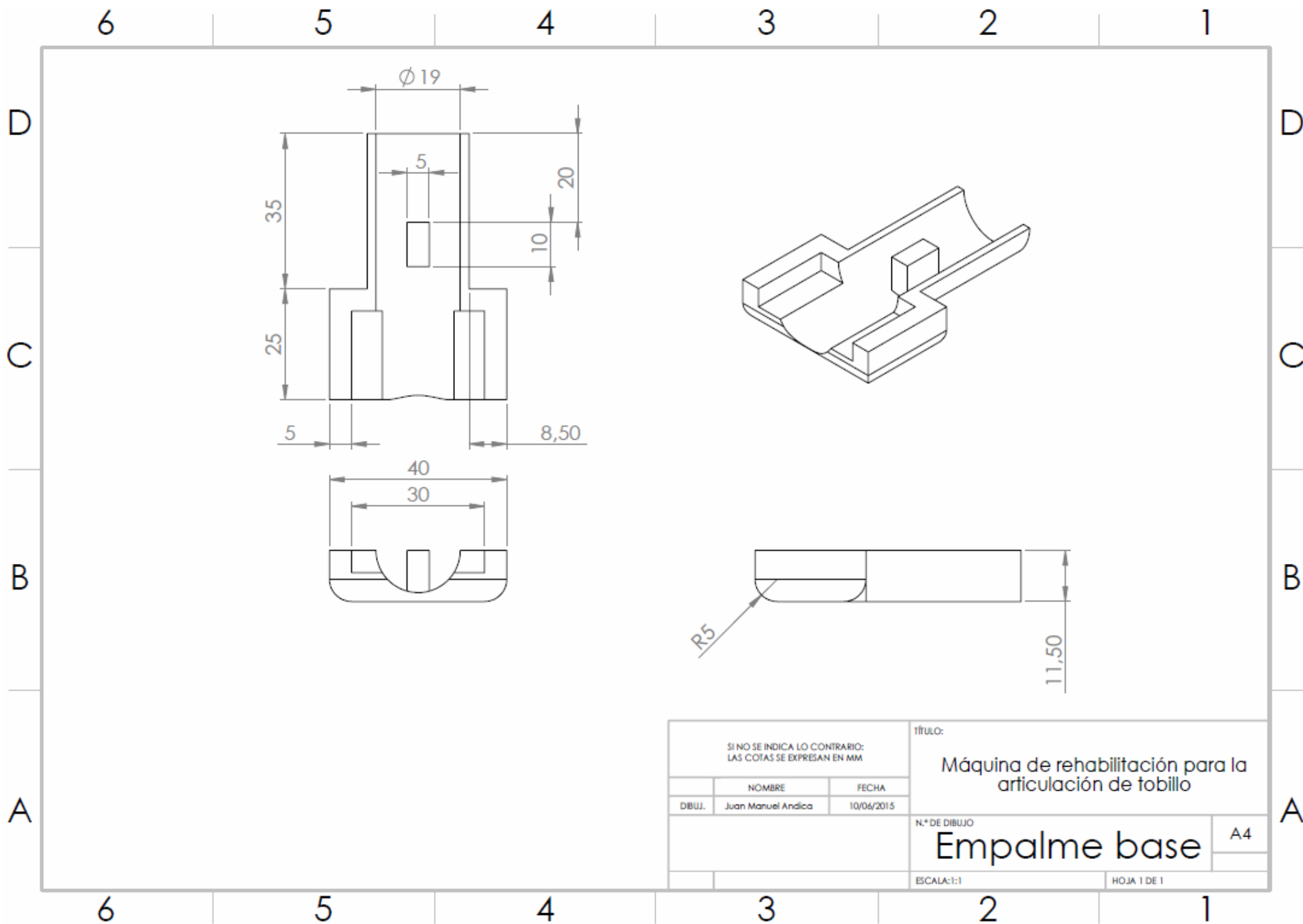
A4





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			título:	
			Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
	NOMBRE	FECHA	N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015		
			pivote riel	
			ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TÍTULO:	
			Máquina de rehabilitación para la articulación de tobillo	
NOMBRE	FECHA		N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Juan Manuel Andica	10/06/2015	Empalme base	
ESCALA: 1:1			HOJA 1 DE 1	

A4

